

*Посвящается 270-летию Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова*

СОДЕРЖАНИЕ

География и экология

- Иовлев П.С., Бобров А.В., Романов М.С., Здравчев Н.С., Тимченко А.С.,
Кандидов М.В., Васеха Н.Д., Михайлова А.А., Стеванович М.Б., Куцов К.В.,
Сорокин А.Н.* Расселение представителей семейства Liliaceae в связи
со строением их репродуктивных органов..... 3
- Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г., Кукушкин С.Ю., Янсон С.Ю.* Минералого-
геохимические особенности снежного покрова на антропогенно нарушенных
территориях Надым-Пуровского междуречья (север Западной Сибири)..... 17
- Ковбашин Д.И., Светлов Н.М., Дронин Н.М.* Адаптация сельскохозяйственного проекта
к регулированию выбросов парниковых газов 32
- Екимовская О.А., Гриценюк А.П., Сороковой А.А., Шеховцов А.И., Сизых А.П.*
Современное состояние и эффективность реосвоения заброшенных
сельскохозяйственных угодий в речных бассейнах юго-западного Забайкалья..... 43
- Манаенков А.С.* Условия произрастания и выращивание дубрав на плакорах
и склонах Приволжской и Ергенинской возвышенностей и равнинах
Сало-Маньчского междуречья..... 53

Методы географических исследований

- Терешина М.А., Ерина О.Н., Соколов Д.И.* Оценка чувствительности одномерной
модели озера к входным данным..... 64
- Буданцева Н.А., Васильчук Ю.К., Васильчук А.К.* Изоскейпы и палеоизотермы
среднеянварской температуры воздуха в голоцене на севере Западной
Сибири (по данным изотопно-кислородного состава повторно-жильных льдов)..... 78

Динамика природных процессов

- Болиховская Н.С., Молодьков А.Н.* Развитие и хронология климато-
фитоценологических событий позднего неоплейстоцена (МИС 5–МИС 3)
на юго-восточном побережье Финского залива..... 89
- Лисина А.А., Сазонов А.А., Фролова Н.Л., Крыленко И.Н., Мотовилов Ю.Г.*
Чувствительность водного стока реки Колымы к современным
климатическим изменениям..... 108

Региональные исследования

- Сумкина А.А., Иванов В.В., Кивва К.К.* Тепловой баланс поверхности Баренцева
моря в холодный период года..... 123
- Тарбеева А.М., Крыленко И.В., Сурков В.В., Михайлова Н.М.* Современные
процессы в четковидных руслах степных рек Хоперско-Бузулукской равнины..... 135
- Котеньков С.А., Макшаев Р.Р., Лобачева Д.М., Матлахова Е.Ю.*
Волго-Каспийский канал в XVIII в.: историко-географическая реконструкция
судоходного маршрута..... 149

CONTENTS

Geography and ecology

<i>Iovlev P.S., Bobrov A.V., Romanov M.S., Zdravchev N.S., Timchenko A.S., Kandidov M.V., Vasekha N.D., Mikhaylova A.A., Stevanovich M.B., Kuptsov K.V., Sorokin A.N.</i> Disperal of the Liliaceae representatives in relation to the structure of their reproductive organs	3
<i>Opekunov A.Yu., Opekunova M.G., Kukushkin S.Yu., Janson S.Yu.</i> Mineralogical and geochemical parameters of snow cover within the anthropogenically disturbed sites of the Nadym-Pur interfluve (northern part of Western Siberia).....	17
<i>Kovbashin D.I., Svetlov N.M., Dronin N.M.</i> Adaptation of an agricultural project to the regulation of greenhouse gas emissions.....	32
<i>Ekimovskaya O.A., Gritsenyuk A.P., Sorokovoj A.A., Shehovtsov A.I., Sizyh A.P.</i> Current status and efficiency of abandoned lands re-development in river basins of South-Western Transbaikalia.....	43
<i>Manaenkov A.S.</i> Conditions of the oak forests growth and cultivation on the top surfaces and slopes of the Near-Volga and Ergeni uplands and the plains of the Sal-Manych interfluve.....	53

Methods of geographical research

<i>Tereshina M.A., Erina O.N., Sokolov D.I.</i> Sensitivity of a 1D lake model to the input meteorological data.....	64
<i>Budantseva N.A., Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C.</i> Isoscapes and paleoisotherms of the Holocene mean January air temperature in the northwestern Siberia (based on stable oxygen isotope composition of ice wedges).....	78

Dynamics of natural processes

<i>Bolikhovskaya N.S., Molodkov A.N.</i> Climatic and phytocenotic events of the Late Pleistocene (MIS 5–MIS 3) at the southeastern coast of the Gulf of Finland.....	89
<i>Lisina A.A., Sazonov A.A., Frolova N.L., Krylenko I.N., Motovilov Yu.G.</i> Sensitivity of the Kolyma River runoff to modern climate change.....	108

Regional studies

<i>Sumkina A.A., Ivanov V.V., Kivva K.K.</i> Heat budget of the Barents Sea surface in winter.....	123
<i>Tarbeeva A.M., Krylenko I.V., Surkov V.V., Mikhailova N.M.</i> Modern processes in the beaded channels of steppe rivers of the Khoper-Buzuluk plain.....	135
<i>Kotenkov S.A., Makshaev R.R., Lobacheva D.M., Matlakhova E.Yu.</i> Volga-Caspian canal in the 18th century: historical and geographical reconstruction of a shipping route.....	149

ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 581.9, 581.5

РАССЕЛЕНИЕ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ СЕМЕЙСТВА LILIACEAE В СВЯЗИ СО СТРОЕНИЕМ ИХ РЕПРОДУКТИВНЫХ ОРГАНОВ

П.С. Иовлев¹, А.В. Бобров², М.С. Романов³, Н.С. Здравчев⁴, А.С. Тимченко⁵,
М.В. Кандидов⁶, Н.Д. Васеха⁷, А.А. Михайлова⁸, М.Б. Стеванович⁹,
К.В. Купцов¹⁰, А.Н. Сорокин¹¹

^{1, 3–5, 7–11} Главный ботанический сад имени Н.В. Цицина РАН, лаборатория тропических растений
^{2, 6, 9, 10} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
кафедра биогеографии

¹ Науч. сотр.; e-mail: iovlev.petr@gmail.com

² Проф., д-р биол. наук; e-mail: avfch_bobrov@mail.ru

³ Зав. лабораторией, вед. науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: romanovmikhail@hotmail.com

⁴ Науч. сотр.; e-mail: zdravchevnikita@yandex.ru

⁵ Мл. науч. сотр.; e-mail: ant.timchenko@yandex.ru

⁶ Аспирант; e-mail: mvkandidov@mail.ru

⁷ Садовый рабочий; e-mail: natashavasekha@yandex.ru

⁸ Мл. науч. сотр.; e-mail: ana.mikhaylova@list.ru

⁹ Стажер, магистрант; e-mail: stevanovich.mila@mail.ru

¹⁰ Стажер, студент бакалавриата; kirkkk88@bk.ru

¹¹ Ст. науч. сотр.; e-mail: a_n_sorokin@mail.ru

Семейство Liliaceae состоит из 15 родов, включающих более 700 видов, и занимает терминальное положение в порядке Liliales *sensu* [APG IV, 2016]. Ареал семейства включает большую часть Северного полушария, простирается на несколько природных зон – от лесотундр (виды *Gagea*) до тропических лесов (*Tricyrtis imeldae* Guthnick) – и охватывает три материка (Евразию, Северную Америку и Африку). Большинство родов представлено как в Евразии, так и в Северной Америке. Представители Liliaceae имеют сочные невоскрывающиеся ягоды или сухие воскрывающиеся коробочки. В большинстве случаев многосеменные ягоды являются диаспорой, тогда как в случае коробочек диаспорой в норме являются семена. При этом коробочки играют важнейшую роль в распространении семян. Структурные адаптации плодов позволили представителям Liliaceae расселиться на территории, составляющей современный ареал семейства.

Работа посвящена определению основных паттернов развития плодов представителей Liliaceae с различными типами диссеминации на основании изучения морфолого-анатомического строения плодов, а также его соотношения с географией, экологией и биологией диссеминации представителей родов семейства.

В результате исследования было выявлено, что наиболее типичным и распространенным агентом диссеминации у исследованных представителей Liliaceae является ветер, при этом наиболее специализированные к анемохории коробочки характерны для представителей подсемейства Lilioideae, обеспечивающие автоанемохорное, в том числе (преимущественно у представителей травяного яруса листопадных лесов умеренной и субтропической климатических зон Голарктического царства) и анемохионохорное, распространение семян; предполагается, что в отличие от коробочек, обеспечивающих анемохорию и активно участвующих в диссеминации, важнейшей задачей коробочек баромирмекохорных представителей является продуцирование семян, а не их распространение, что подтверждается особенностями их анатомического строения – большое количество межклетников и почти полное отсутствие лигнификации перикарпия; эндозоохорное распространение плодов Liliaceae эффективно для расселения дальним транспортом, в первую очередь птицами, но препятствует расселению среди большого количества экосистем, что отражается на ареалах родов *Clintonia*, *Prosartes* и *Streptopus*, являющихся представителями травяных ярусов хвойных и широколиственных лесов Голарктического царства.

Ключевые слова: анатомия плодов, анемохория, диссеминация, карпоэкология, мирмекохория, эндозоохория

ВВЕДЕНИЕ

Семейство Liliaceae состоит из 15 родов, включающих более 700 видов, и занимает терминальное положение в порядке Liliales *sensu* APG IV [2016]. Ареал семейства включает большую часть Северного полушария, простирается на несколько природных зон – от лесотундр (виды *Gagea*) до тропических лесов (*Tricyrtis imeldae* Guthnick) – и охватывает три материка – Евразию, Северную Америку и Африку (на севере последней семейство представлено средиземноморскими видами, не являющимися эндемиками этого континента) [Dahlgren et al., 1985]. Большинство родов представлено как во флоре Евразии, так и Северной Америки [Dahlgren et al., 1985]. Представители Liliaceae формируют ценокарпные сочные невскрывающиеся ягоды или сухие вскрывающиеся плоды – коробочки, которые играют важнейшую роль в распространении диаспор. Структурные адаптации плодов позволили представителям Liliaceae расселиться на территории, составляющей современный ареал семейства. С целью определения основных паттернов развития плодов представителей Liliaceae с различными типами диссеминации были изучены морфология и анатомия плодов, строение которых затем было соотнесено с данными географии, экологии и биологии представителей родов семейства.

Для диаспор Liliaceae характерны различные способы распространения. Диаспорой представителей Liliaceae может являться как плод (например, *Prosartes*, *Streptopus*, *Clintonia*), так и семя (например, виды Lilioideae, *Calochortus*, *Tricyrtis*). Редко, в случае представителей *Clintonia*, для которых характерно позднее растрескивание и высвобождение семян из перезревших ягод, диаспорой является как плод (в случае его эндозоохорного распространения) так и семя, в случае его высвобождения (выпадения) из ягоды (барохория), если плоды не были распространены животными. Семена лилейных могут быть бескрылыми уплощенными, иметь пленчатое крыло, обеспечивающее анемохорию (*Lilium*, *Notholirion*, *Tulipa* spp., *Fritillaria*, *Cardiocrinum*, *Calochortus* spp.) или жирозапасающие выросты – элайосомы, являющиеся аттрактантом для муравьев и синдромом мирмекохории (*Erythronium* spp., *Gagea* spp., *Amana edulis* (Miq.) Honda), или могут не иметь специализированных структур и распространяться барохорно (*Calochortus* spp., *Clintonia*, *Erythronium* spp., *Gagea* spp., *Tricyrtis*). Отметим, что плоды представителей Liliaceae, диаспорой которых являются семена, играют важную роль в распространении семян и регулируют их распространение.

Для разных типов сообществ характерна различная представленность типов распространения

диаспор растений [Ridley, 1930]. Так, в лесных сообществах наиболее эффективны биотические агенты распространения. Наиболее представленными типами распространения диаспор в лесах являются эпи- и эндозоохория, в частности орнитохория и мирмекохория [Левина, 1957]. Также для лесных видов лилейных, произрастающих в травяных ярусах, характерно автохорное распространение диаспор, при котором плоды выбрасывают семена с большой скоростью на большие расстояния [Левина, 1987; Ridley, 1930]. Этот вариант автохории достигается благодаря напряжению, создаваемому механическими тканями плода, которое позволяет створкам иссыхающего плода открываться с большой скоростью, разбрасывая семена на значительные расстояния (*Impatiens* spp., *Geranium* spp.) [Roth, 1977]. На открытых участках, в луговых и степных сообществах большую роль в распространении играет ветер, и диаспоры растений чаще всего имеют приспособления к анемохории [Левина, 1957]. Эти закономерности в целом отражаются и в эколого-географической дифференциации представителей семейства Liliaceae, при этом имеются некоторые исключения из общих паттернов распределения растений с разными типами распространения. Так, например, представители *Cardiocrinum*, *Lilium*, *Nomocharis*, *Fritillaria*, произрастающие в листопадных лесах умеренного и субтропического пояса, имеют специализированные автоанемохорные коробочки, выбрасывающие семена в результате раскачивания оси соплодия под действием ветра и уплощенные семена с развитым крылом, приспособленные к анемохории, что в целом не согласуется с общепринятой трактовкой автоанемохории как типа распространения диаспор, характерного для открытых сообществ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования были собраны плоды представителей Liliaceae. Плоды отдельных видов, для уточнения особенностей гистогенеза перикарпия были изучены в развитии (табл.). Образцы фиксировались в 70%-ном этаноле [Прокина, 1960]. Изготовление анатомических препаратов производилось на салазочном микротоме МС-2 с подключенным замораживающим столиком ОМТ-2802Е. Толщина срезов – 20–40 мкм. Для выявления лигнина препараты обрабатывались флороглюцином и соляной кислотой или (для обеспечения более контрастного отображения) сафранином и альциановым синим [Прокина, 1960; O'Brien, McCully, 1981]. Исследование препаратов производилось при помощи светового микроскопа Olympus CX 41.

Для описания анатомии плодов в статье использована терминология из [Bobrov, Romanov, 2019].

Изученный материал

№ п/п	Вид	Стадия развития	Место сбора	№ образца
1	<i>Amana edulis</i> (Miq.) Honda	Незрелый плод	Ботанический сад Дворца пионеров, Москва	3225
2	<i>Calochortus venustus</i> Douglas ex Benth	Зрелый плод	Ботанический сад, Бонн	1171
3	<i>Cardiocrinum glehnii</i> (F. Schmidt) Makino	Незрелый плод	Ботанический сад Дворца пионеров, Москва	3506
4	<i>Cardiocrinum glehnii</i> (F. Schmidt) Makino	Зрелый плод	о. Кунашир	408
5	<i>Clintonia udensis</i> Trautv. & C. A. Mey	Зрелый плод	Ботанический сад Дворца пионеров, Москва	3240
6	<i>Erythronium caucasicum</i> Woronow	Завязь	Ботанический сад Дворца пионеров, Москва	3685
7	<i>Erythronium caucasicum</i> Woronow	Незрелый плод	Ботанический сад Дворца пионеров, Москва	3738
8	<i>Erythronium caucasicum</i> Woronow	Зрелый плод	Ботанический сад Дворца пионеров, Москва	3822
9	<i>Erythronium revolutum</i> Sm.	Зрелый плод	Королевский ботанический сад, Эдинбург	3900
10	<i>Fritillaria meleagris</i> L.	Завязь	Ботанический сад Дворца пионеров, Москва	3226
11	<i>Fritillaria meleagris</i> L.	Зрелый плод	Ботанический сад Дворца пионеров, Москва	3909
12	<i>Gagea lutea</i> (L.) Ker Gawl.	Завязь	Ботанический сад Дворца пионеров, Москва	3688
13	<i>Gagea lutea</i> (L.) Ker Gawl.	Незрелый плод	Ботанический сад Дворца пионеров, Москва	3221
14	<i>Gagea lutea</i> (L.) Ker Gawl.	Зрелый плод	Ботанический сад Дворца пионеров, Москва	3856
15	<i>Lilium martagon</i> L.	Зрелый плод	Ботанический сад Дворца пионеров, Москва	4061
16	<i>Prosartes hookeri</i> Torr.	Зрелый плод	Ботанический сад Дворца пионеров, Москва	3937
17	<i>Streptopus amplexifolius</i> (L.) DC.	Зрелый плод	Ботанический сад Дворца пионеров, Москва	3869
18	<i>Tricyrtis latifolia</i> Maxim.	Почти зрелый плод	Ботанический сад Дворца пионеров, Москва	4059
19	<i>Tulipa sylvestris</i> subsp. <i>australis</i> (Link) Pamp.	Завязь	Ботанический сад Дворца пионеров, Москва	3222
20	<i>Tulipa sylvestris</i> subsp. <i>australis</i> (Link) Pamp.	Почти зрелый плод	Ботанический сад Дворца пионеров, Москва	3865
21	<i>Tulipa bifloriformis</i> Vved.	Зрелый плод	Ботанический сад Дворца пионеров, Москва	3236

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эндозоохорная диссеминация представителей Liliaceae. Представители родов *Prosartes*, *Streptopus* (Tricyrtidoideae – Streptopeae) и *Clintonia* (Medeoloideae) – лесные и опушечные геофиты, формирующие сочные плоды (рис. 1, Б, В) – верхние фрагмокарпные эндозоохорные ягоды.

Prosartes hookeri Torr. распространен от Западной Канады до Калифорнии и в горах Дикобраза (штат Мичиган) (рис. 2). *P. hookeri* – корневищный геофит, основными биотопами для которого являются умеренно-влажные хвойные (с преобладанием *Tsuga heterophylla* (Raf.) Sarg. или *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) и хвойно-широколиственные (с доминирующими *Tsuga canadensis* (L.) Carrière, *Acer saccharum* Marshall) леса. Вид является мезофитом, сциофитом, эвтрофом. *P. hookeri* характеризуется продолжительным периодом цветения (с марта по июнь) [Utech et al., 1995].

Streptopus amplexifolius (L.) DC имеет обширный ареал с дизъюнкцией на три фрагмента: Центральную и Южную Европу и Кавказ, Восточную Азию, а также умеренные широты Северной Америки (см. рис. 2). *S. amplexifolius* – корневищный мезофит, типичный вид лесного травяного яруса, встречающийся как в мелколиственных (образованных *Prunus padus* L.), так и в широколиственных лесах (в которых доминируют *Carpinus betulus* L. или *Acer pseudoplatanus* L.). Основным лимитирующим фактором распространения этого вида является увлажненность [Wilczek et al., 2016].

Clintonia udensis Trautv. & C.A. Mey – многолетний травянистый корневищный весенне-летний эфемероид, произрастающий в основном в травяном ярусе лиственных лесов Восточной Азии, Гималаев и Дальнего Востока (см. рис. 2). Этот вид обычно встречается в разреженных или тенистых альпийских лесах на высотах от 1600 до 4000 м [Li et al., 1996; Wang et al., 2010]. Для представителей

рода *Clintonia* характерно расселение на обширные участки биотопов из-за формирования развитой сети подземных корневищ [Li et al., 1996].

Плоды *P. hookeri* – верхние фрагмокарпные ягоды слегка продолговатой формы, до 1,2 см в длину, от оранжевого до красного цвета, с редким опушением.

Плоды *S. amplexifolius* – верхние фрагмокарпные ягоды шаровидной формы 1–1,5 см в диаметре, красного цвета, гладкие.

Плоды *C. udensis* – верхние трехгнездные фрагмокарпные ягоды почти шаровидной формы, 1–1,5 см в диаметре, с тремя бороздками, идущими от апекса

плода к его основанию в проксимальной его части. Ягоды *C. udensis* синей окраски, не имеют запаха.

Ягоды изученных видов *Prosartes* и *Streptopus* имеют общие особенности анатомического строения. Перикарпий *Prosartes* и *Streptopus* сложен 10–15 слоями паренхимных клеток. При созревании плода в клетках экзокарпия накапливаются красные пигменты, обеспечивающие яркую окраску и привлекательность плодов для диссеminatивов. Клетки мезокарпия, вероятно, содержат большое количество питательных веществ. Единственными одревесневающими клетками перикарпия являются клетки ксилемы проводящих пучков.

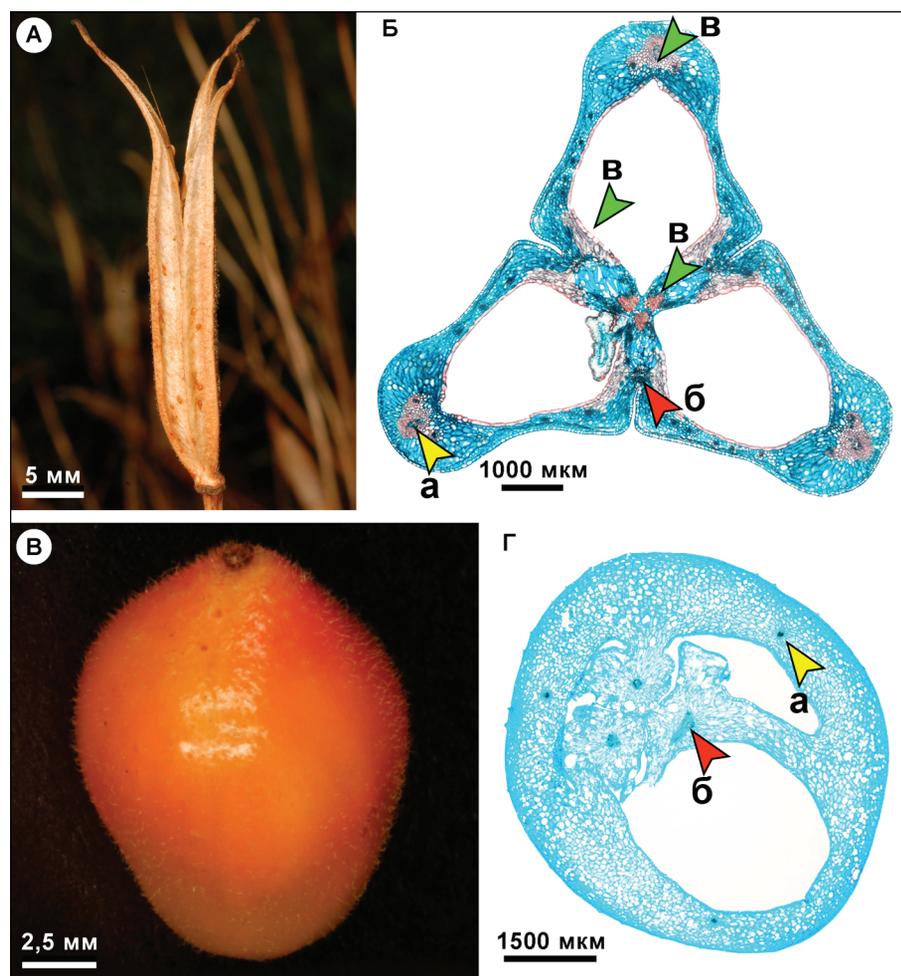


Рис. 1. Зрелые плоды *Calochortus venustus* (А – внешний вид; Б – поперечный срез) и *Prosartes hookeri* (В – внешний вид; Г – поперечный срез). Стрелки: а – дорзальные проводящие пучки; б – вентральные проводящие пучки; в – элементы механического каркаса плода

Fig. 1. Mature fruit of *Calochortus venustus* (А – appearance; Б – cross section) and *Prosartes hookeri* (В – appearance; Г – cross section). Arrows а – dorsal vascular bundles; arrows б – ventral vascular bundles; arrows в – elements of “fruit mechanical frame”

Яркая оранжевая или красная окраска плодов и отсутствие у них запаха являются характерными чертами синдрома орнитохории [Бобров и др., 2016;

Pijl, 1982; Ridley, 1930]. Поскольку в перикарпии изученных видов отсутствуют зоны непрерывного одревеснения, которые могли бы образовывать

косточку, защиту семян от поедания у *Prosartes* и *Streptopus* выполняет одревесневающая экзотеста семян (ориг. данные).

Строение перикарпия *C. udensis* схоже с таковым у *Prosartes* и *Streptopus*, он сложен 8–9 слоями паренхимных клеток, вероятно запасующих питательные вещества. В экзокарпии к моменту созревания накапливаются пигменты, обуславливающие яркую окраску плода. В перикарпии отсутствуют зоны непрерывного одревеснения, и функцию защиты семян выполняет экзотеста (ориг. данные). Основным отличием перикарпия *Clintonia* от перикарпия остальных эндозоохорных Liliaceae является наличие истончения перикарпия у дорзальных пучков в проксимальной части плода, которое возникает благодаря прекращению роста клеток мезокарпия на стадии завязи. Это истончение является рудиментом механизма вскрывания и может указывать на морфогенетический паттерн перехода от сухих вскрывающихся плодов к сочным невскрывающимся

ся и параллельно – на изменение типа диссеминации от барохории к эндозоохории.

Цвет плода и сочная структура перикарпия указывают на эндозоохорию [Левина, 1957], но диаспорой *Clintonia* могут также являться и семена: в случае, когда плоды *Clintonia* длительное время остаются на материнском растении, ягоды могут растрескиваться по дорзальным швам, в следствие чего происходит высыпание семян. Эффективность барохории несоизмеримо ниже, так как распространение семян вблизи материнского растения почти полностью исключает возможность расселения на большие расстояния [Левина, 1987]. Плоды *Clintonia* являются примером превращения ягоды в коробочку, зрелый невскрывшийся плод, содержащий зрелые семена, рассматривается как ягода, а перезревший и трескающийся / вскрывающийся по дорзальному шву плод может рассматриваться как сочная коробочка Galanthus-типа [Bobrov, Romanov, 2019].



Рис. 2. Ареалы изученных эндозоохорных видов Liliaceae [ориг. по: Si-Feng, Zhao-Yang, 1996; Utech, 2003]

Fig. 2. Geographical range of studied endozoochorous Liliaceae species [orig. by: Si-Feng, Zhao-Yang, 1996; Utech, 2003]

Таким образом, у исследованных представителей лилейных с эндозоохорной диссеминацией, произрастающих в умеренно-влажных хвойных, смешанных и широколиственных лесах Северной Америки и Восточной Азии, выявлены следующие структурные адаптации плодов к эффективно-

му распространению семян: яркая окраска плодов (*Prosartes* и *Streptopus*), привлекательная в первую очередь для птиц; отсутствие зон непрерывного одревеснения в перикарпии; *Clintonia* имеет адаптации как к эндозоохории, так и к барохории и имеет два типа диаспор (плоды и семена), что, подобно

автоанемохорным коробочкам Liliaceae, позволяет разносить во времени распространение диаспор, разделяя его на несколько этапов.

Баромирмекохорная диссеминация представителей Liliaceae. Распространение диаспор муравьями характерно для большинства экосистем, мирмекохоры отсутствуют лишь в тундровых и болотных сообществах [Левина, 1987; Левина, 1957; Pijl, 1982]. В лесных сообществах к мирмекохории приспособлены преимущественно травянистые растения с плодоношением в течение первого или второго года жизни, так как мирмекохория способствует массовому распространению на небольшие расстояния (десятки и первые сотни метров). Растениям древесного яруса выгоднее использование ветра в качестве агента распространения, так как его скорость на уровне крон значительно выше, чем на приземном уровне, и дальность распространения анемохорных диаспоркратно превышает таковую у мирмекохоров [Левина, 1987; Левина, 1957; Ridley, 1930].

Для ряда представителей трибы Tulipeae (Lilioideae) характерны семена с жирозапасающими выростами – элайосомами, которые привлекают муравьев. Элайосомы характерны для семян *Gagea*, некоторых видов *Erythronium* [Комар, 1985], вероятнее всего для видов *Amana* [Zhang et al., 2023]. Предполагается, что, в отличие от коробочек, обеспечивающих анемохорию и активно участвующих в диссеминации, важнейшей задачей коробочек баромирмекохорных представителей является продуцирование семян, а не их распространение, что подтверждается особенностями их анатомического строения. Так, характерными чертами анатомического строения коробочек *Gagea*, мирмекохорных видов *Erythronium* и *Amana edulis* является наличие в перикарпии большого количества межклетников, образующих обширные полости, отсутствие механической ткани (обычно одревесневают только стенки клеток элементов ксилемы проводящих пучков), однако в перикарпии *G. lutea* (L.) Ker Gawl. лигнифицируется эндокарпий, причем степень одревеснения и толщина стенок уменьшаются акропетально. Развитие механизма вскрывания, сформированного недифференцированными клетками (в зоне дорзального пучка клетки перикарпия практически не увеличиваются в размерах со стадии гинецея и не одревесневают). Плоды мирмекохорных *Gagea* и *Erythronium* spp. сохраняют понижающую ориентацию, так как их плодоножки не имеют вторичного одревеснения, в отличие от остальных Liliaceae со вскрывающимися плодами [Tamura, 1998]. В связи с этим их семена распространяются в первую очередь посредством высыпания из плодов (барохорно), и впоследствии растаскиваются муравьями (мирмекохорно). Эта особенность диссеминации обуславливает также специфику форми-

рования популяций. Так, виды *Gagea* часто произрастают группами из разновозрастных растений с большим количеством растений первого года жизни с еще несформировавшимися луковицами. Расстояния между отдельными группами представителей одного вида обычно составляет от 5 до 10 м [Tamura, 1998]. Такие особенности формирования популяций обуславливаются небольшими дистанциями разноса семян муравьями и достаточно частыми случаями исключительно барохории, при которой семена остаются и прорастают вблизи материнского растения.

Изученные виды мирмекохорных Liliaceae – лесные или опушечные растения умеренного или субтропического климатических поясов.

G. lutea имеет дизъюнктивный ареал, состоящий из трех фрагментов (рис. 3). Самая обширная часть ареала включает Европу и Кавказ. Вторым фрагментом ареала является Памирская популяция вида. Третья часть ареала включает в себя Корейский полуостров и Японские острова. *G. lutea* – ранневесенние травянистые эфемероидные луковичные геофиты. В течение большей части года растения находятся в состоянии покоя и вегетируют в течение 2–4 месяцев. *G. lutea* – типичный мезофит. Основными типами местообитания этого вида являются опушки широколиственных, смешанных и бореальных лесов, образованных широким спектром пород.

Виды *Erythronium* разделяются на две систематические группы; данные морфологии и молекулярной филогении указывают на обособленность западно-североамериканских видов и родство восточно-североамериканских и евроазиатских видов [Allen et al., 2003; Clennett et al., 2012; Mathew, 1992]. Это разделение выражается и в карпоэкологических различиях между этими группами видов. Западно-североамериканские виды являются автоанемохорами, в то время как строение плодов и семян восточно-североамериканских и евроазиатских видов указывает на баро- и мирмекохорию. Нами было изучено анатомическое строение западно-североамериканского вида *E. Revolutum* Sm., имеющего адаптации к автоанемохории и баромирмекохорного кавказско-иранского *E. caucasicum* Woronow.

E. caucasicum имеет ареал, охватывающий горные системы Кавказа и Эльбурса (см. рис. 3). Этот вид имеет широкий экологический диапазон. Он произрастает на каменистых склонах с кустарниковой растительностью, в луговых сообществах и в широколиственных, преимущественно буковых (*Fagus orientalis* Lipsky) лесах.

A. edulis – ранневесенний эфемероид, произрастающий в мелколиственных и смешанных лесах умеренного пояса Восточной Азии (см. рис. 3) [Christenhusz et al., 2013; Li et al., 2017].

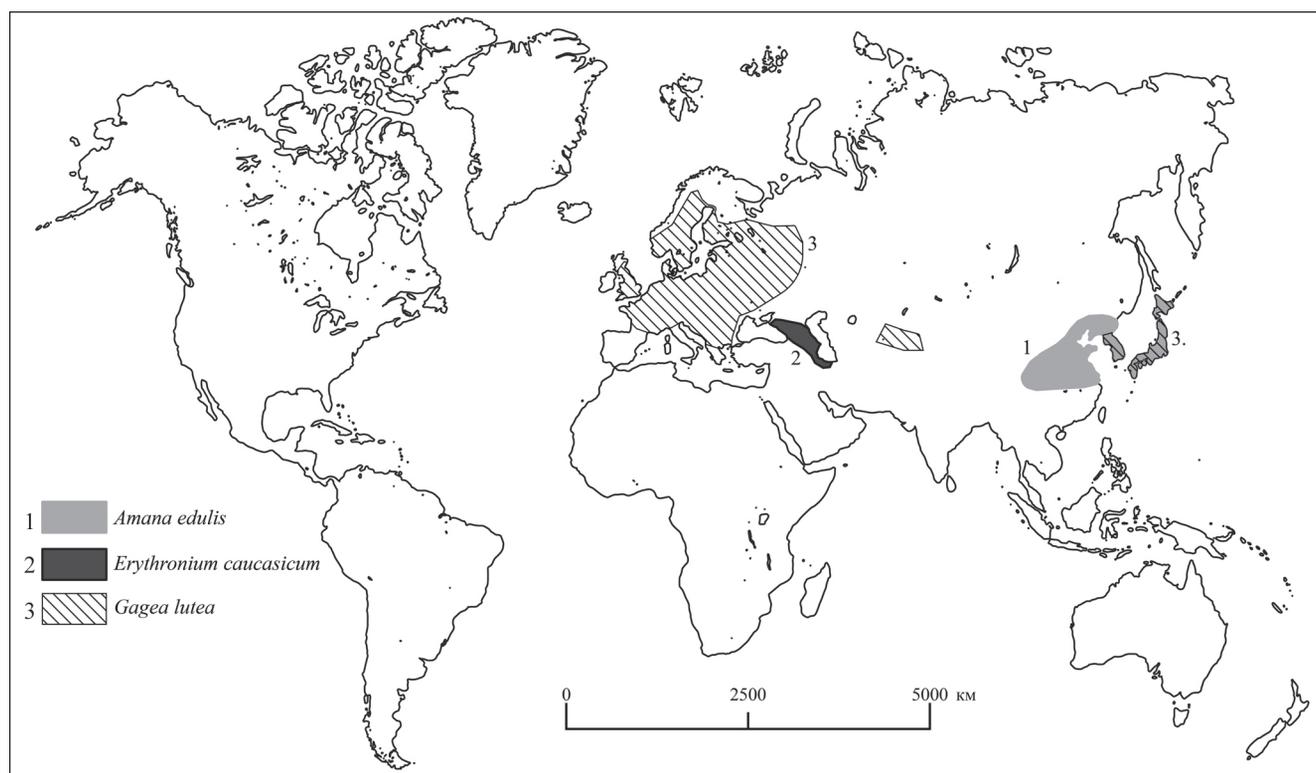


Рис. 3. Ареалы изученных баро-мирмекохорных видов Liliaceae [ориг. по: Комаров, 1935, Wang et al., 2023]

Fig. 3. Geographical range of studied baro-myrmecochorous Liliaceae species [orig. by: Komarov, 1935, Wang et al., 2023]

Плод *Gagea lutea* – верхняя ложнотрехгнездная локулицидная коробочка с базипетальным вскрыванием обратно-грушевидной формы, треугольная на поперечном срезе, длиной до 0,8 см.

Плод *E. caucasicum* – ложно-трехгнездная (редко – четырехгнездная) локулицидная коробочка грушевидной формы, 3–3,5 см в длину.

Плод *A. edulis* – ложнотрехгнездная фрагмокарпная локулицидная коробочка длиной до 2 см.

Перикарпий *G. lutea* сложен 5–6 слоями клеток. В мезокарпии присутствуют межклетники. Характерной чертой коробочек является их высыхание в процессе созревания, вследствие чего паренхимные клетки перикарпия теряют тургор и сжимаются. При этом структуру коробочек позволяет сохранить механический каркас, роль которого у *G. lutea* выполняет одревесневающий эндокарпий. Для видов *Gagea*, в отличие от большинства Liliaceae, характерно сохранение поникающего положения зрелого плода из-за отсутствия одревеснения плодоножки [Тамуга, 1998]. При базипетальном вскрывании коробочки ориентированы раскрывшимися створками к земле, вследствие чего высыпание семян из коробочек происходит исключительно под действием силы тяжести. Механизм вскрывания коробочек *Gagea* формируется благодаря отсутствию утолщения перикарпия у дорзального проводящего пучка в процессе развития плода вследствие прекращения роста клеток,

располагающихся внутри и снаружи от дорзального пучка. Вскривание происходит в дистальной части иссохшей коробочки по зоне утоньшения перикарпия, возникающего в зоне механизма вскрывания в результате отсутствия роста клеток со стадии гинецея.

E. caucasicum, как и большинство евроазиатских и восточно-североамериканских видов, имеет семена с элайосомами. Для перикарпия *E. caucasicum* характерно формирование большого количества межклетников, размер которых часто сопоставим или превышает размер клеток перикарпия. Межклетники в перикарпии сливаются, формируя обширные полости. Подобная анатомическая организация перикарпия характерна и для мирмекохорного рода *Gagea* и, вероятнее всего, мирмекохорного, *Amana*.

Роль механического каркаса плода у *E. caucasicum* выполняют клетки перикарпия, имеющие большое количество пор, что указывает на начальную стадию лигнификации клеточных стенок. В первую очередь это клетки эндокарпия и мезокарпия. Стенки клеток экзокарпия у *E. caucasicum* утолщаются лишь на финальной стадии созревания плода.

Коробочки *E. caucasicum* вскрываются локулицидно базипетально. Механизм вскрывания плодов формируется благодаря прекращению роста клеток перикарпия у дорзального пучка и, как следствие – отсутствию утолщения перикарпия в процессе развития в зоне дорзального пучка.

Перикарпий *A. edulis* имеет сходные с таковыми у мирмекохорных *Gagea* и *Erythronium* особенности анатомического строения. В перикарпии уже на незрелой стадии присутствует большое количество межклетников, образующих обширные полости. Механизм вскрывания формируется благодаря прекращению роста клеток у дорзальных пучков на стадии завязи. В перикарпии отсутствуют зоны лигнификации. Семена *A. edulis* имеют выросты, вероятнее всего, являющиеся элайосомами [Zhang et al., 2023]. Исследований анатомического строения семян видов *Amana* не проводилось, поэтому с уверенностью говорить о мирмекохорном синдроме семян *A. edulis* нельзя, при этом структура перикарпия этого вида соотносится с таковой у изученных мирмекохорных видов *Gagea* и *Erythronium*.

Можно подытожить, что у исследованных представителей лилейных с баромирмекохорной диссеминацией, произрастающих в листопадных широколиственных лесах умеренной зоны Евразии, выявлены следующие структурные адаптации плодов к эффективному распространению семян: 1 – образование механизма вскрывания, сформированного не дифференцированными клетками; 2 – вскрывание коробочек по всей их высоте, позволяющее единомоментно высвободить из плода все семена; 3 – понижающее положение плодов (*Gagea*, *Erythronium* spp.); 4 – редуцирование механического каркаса плода из-за частичного (*Gagea*) или почти полного (*Amana*, *Erythronium* spp.) отсутствия одревеснения в перикарпии.

Также отличительной особенностью коробочек баромирмекохорных Liliaceae является наличие в перикарпии большого количества межклетников, образующих полости.

Автоанемохорная диссеминация представителей Liliaceae. Плоды *Tricyrtis* (Tricyrtidoideae – Tricyrtidoideae), *Calochortus* (Calochortidoideae) и большинства представителей Lilioideae (*Cardiocrinum*, *Erythronium* spp., *Fritillaria*, *Lilium*, *Tulipa*) – коробочки, адаптированные к автоанемохории (см. рис. 1, А, Б). В роде *Erythronium* только группа западно-североамериканских видов имеет адаптации к автоанемохории, в то время как все остальные виды этого рода являются мирмекохорными (см. выше). Несмотря на то что большинство представителей этих родов имеют уплощенные семена с пленчатым крылом, заметную роль в их расселении играют плоды. Высвобождение семян из плодов у этих родов происходит благодаря раскачиванию вскрывшихся коробочек на прямостоячих стеблях под действием ветра. Коробочки большинства автоанемохорных Liliaceae имеют специализированные структуры, которые удерживают семена в плоде, тем самым предотвращая их единовременное

барохорное высыпание, и обеспечивают продолжительное высевания семян в течение нескольких месяцев. Коробочки с гомологичными структурами, обеспечивающими длительную диссеминацию, являются универсальным признаком семейства, в то время как крылатые выросты семян являются дополнительной специализацией и отмечены только у части автоанемохорных видов Liliaceae.

Автоанемохорные виды Liliaceae могут иметь как преимущественно степное распространение (*Tulipa* spp.), так и исключительно лесное (*Cardiocrinum*). Несмотря на то что вскрывание автоанемохорных коробочек происходит в конце лета – начале осени, семена могут долгое время оставаться в плодах и распространяться зимой. При высевании плодов на снежный покров эффективность распространения крылатых семян – анемохория – значительно возрастает, по сравнению с попаданием их на почву. Исследования распространения семян *Picea* и *Pinus* показывают возможность разлета их семян по насту на расстояние до 50 км [Ильинский, 1945; Кожевников, 1950]. Вероятнее всего, наибольшая активность диссеминации автоанемохорных Liliaceae из листопадных лесов приходится на позднеосенний – зимний период, когда скорость ветра в лесных сообществах повышается после опадания листьев.

В ходе исследования нами было изучено анатомическое строение автоанемохорных коробочек *Tricyrtis*, *Calochortus*, *Tulipa*, *Erythronium*, *Cardiocrinum*, *Fritillaria*, *Lilium* из различных экосистем.

Tricyrtis latifolia Maxim. распространен в широколиственных лесах Восточной Азии в Китайских провинциях Хэбэй, Хэнань, Хубэй, Шеньси, Сычуань и на Японских островах (рис. 4), он является мезогигрофитом, эвтрофом, кальцефилом [Ohwi, 1965; Wu, Raven, 2000].

Calochortus venustus Douglas ex Benth. – эндемик штата Калифорния (см. рис. 4), произрастает на кислых песчаных почвах, образованных гранитными породами. Вид широко представлен как в луговых сообществах, так и в предгорных хвойно-широколиственных лесах Сьерра-Невады (с преобладанием *Pinus sabiniana* Douglas и *Quercus douglasii* Hook. & Arn.) и в хвойных лесах, образованных *Pinus jeffreyi* Balf. и *Pinus ponderosa* Douglas ex C. Lawson. *C. venustus* является луковичным геофитом с поздневесенним – летним цветением [Utech, 2003].

Изученные представители *Tulipa* – гелиофиты, ксерофиты, геофиты степей юга Восточной Европы и Центральной Азии. *Tulipa sylvestris* subsp. *australis* (Link) Pamp. произрастает в Украине, на Южном Кавказе и в Центральной Азии. *Tulipa bifloriformis*

Vved. – типичный представитель сухих степей Центральной Азии (см. рис. 4) [Комаров, 1935].

Ареал *Erythronium revolutum* протянулся полой шириной примерно в 100 км вдоль западного побережья Северной Америки по Береговому хребту на высотах 0–600 (до 1000) м на территориях Британской Колумбии, Калифорнии, Орегона и Вашингтона (см. рис. 4) [Utech, 2003]. *E. revolutum* – мезогигрофит, произрастающий в травяном ярусе прибрежных лесов из *Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl. и характеризующийся ранневесенним (март – апрель) цветением. Этот вид предпочитает наиболее увлажненные участки.

Cardiocrinum glehnii – мезофит, распространен в широколиственных листопадных, в том числе магнолиевых (*Magnolia obovata* Thunb.), лесах юга Сахалина, Кунашира, Хоккайдо и Хонсю (см. рис. 4) [Ohwi, 1965; Wu, Raven, 2000].

Fritillaria meleagris – гидрофит, основными местообитаниями для которого являются пойменные и долинные луга на высотах до 800 м. Ареал этого вида охватывает всю Европу кроме самых северных районов (см. рис. 4).

Lilium martagon L. – мезофит, геофит, кальцефил, самый северный вид рода, который является наиболее распространенным среди всех видов *Lilium* в Европе [Woodcock, Stearn, 1950]. *L. martagon* – типичный представитель лесных лугов, разреженных хвойных и смешанных лесов, произрастает также в березовых (*Betula pendula* Roth, *Betula alba* L.) рощах и на каменистых склонах на субальпийских лугах [Комаров, 1935]. Центр наибольшего разнообразия и происхождения вида – Южная и Восточная Европа, Кавказ [Persson et al., 1998]. Представители этого вида также встречаются на севере Малой Азии и в Западной Сибири (см. рис. 4) [Persson et al., 1998].

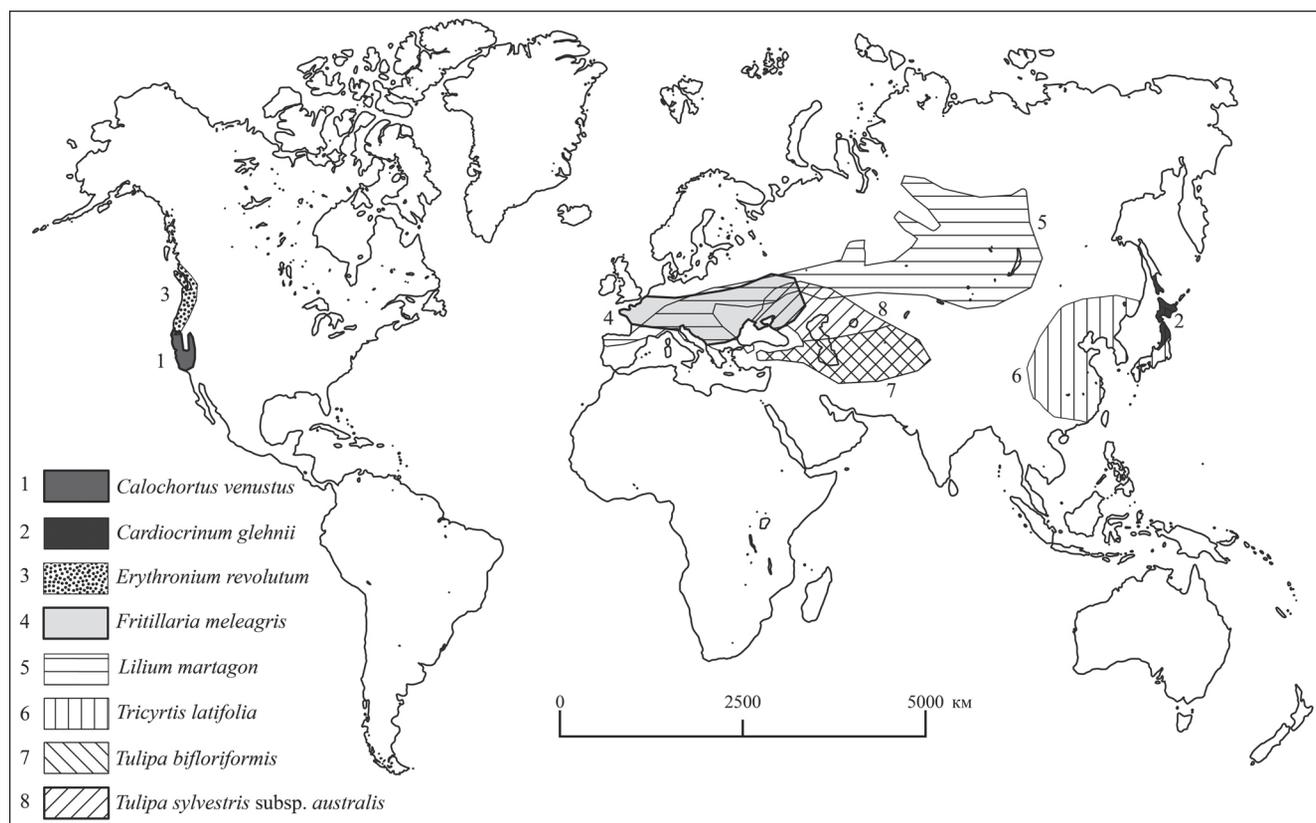


Рис. 4. Ареалы изученных автоанемохорных видов Liliaceae [ориг. по: Баранова, 1990; Комаров, 1935; Bolt, 2016; Takahashi, 1987; Utech, 2003]

Fig. 4. Geographical range of studied auto-anemochorous Liliaceae species [orig. by: Baranova, 1990; Komarov, 1935; Bolt, 2016; Takahashi, 1987; Utech, 2003]

Плоды *Tricyrtis* и *Calochortus* – верхние ложнотрехгнездные фрагмокарпные септицидные коробочки с базипетальным вскрыванием, содержащие большое количество мелких уплощенных бескрылых семян. Плоды изученных видов

Tulipa, *Erythronium*, *Cardiocrinum*, *Fritillaria* и *Lilium* – локулицидные коробочки, которые в отличие от коробочек *Tricyrtis* и *Calochortus*, имеют структуру, препятствующую одновременному высыпанию семян.

Плоды *T. latifolia* и *C. venustus* имеют развитый механический каркас, выполняющий функцию сохранения формы высохшей, готовой к вскрыванию коробочки, и позволяющий выполнять диссеминацию после его иссыхания. Этот механический каркас сформирован лигнифицированными зонами перикарпия: одревесневающим эндокарпием и составляющей с ним единую непрерывную зону лигнификации механической обкладкой вентральных проводящих пучков и тяжами склереид в ложных септах в центре плода.

Септицидное вскрывание коробочек обеспечивается благодаря формированию в перикарпии механизма вскрывания в зоне вентральных проводящих пучков в дистальной части плода. Механизм вскрывания *T. latifolia* сформирован путем уменьшения количества клеток мезокарпия у вентральных проводящих пучков. Экзокарпий в этой зоне загибается внутрь плода и примыкает к лигнифицированным клеткам механической обкладки вентральных пучков, благодаря формированию отделительного слоя мелких паренхимных клеток, примыкающих с внутренней стороны к механической обкладке вентрального пучка. При вскрывании плода его створки расходятся вследствие растрескивания волокон механической обкладки вентральных пучков, располагающихся в основании ложных септ, в самой тонкой части лигнифицированной зоны, в краевых ее частях. Створки плода при вскрывании также отделяются от ложных септ, которые сохраняются в виде колонки в центре вскрывшейся коробочки. Подобный принцип формирования механизма вскрывания характерен и для изученных плодов *C. venustus*.

Перикарпий изученных видов Lilioideae в латеральной части в основном сложен небольшим числом слоев клеток (от 5 до 10), но у *Cardiocrinum glehnii* толщина перикарпия в латеральных частях может достигать 30–35 слоев клеток.

Характерной особенностью коробочек изученных видов Lilioideae является их высыхание при созревании. При этом в зонах перикарпия, располагающихся между дорзальными и вентральными пучками, клетки мезокарпия сжимаются, и их границы становятся неразличимыми. Иссыхая, мезокарпий, клетки которого теряют тургор, перестает выполнять механическую функцию. Сохранение формы и целостности створок плода, необходимых для выполнения одной из его функций – эффективного распространения семян, достигается благодаря наличию механического каркаса, роль которого выполняют лигнифицированные зоны перикарпия. У коробочек *Tulipa*, *Lilium*, *Cardiocrinum* слабо выражено одревеснение эндокарпия и роль механического каркаса, в первую очередь, выполняют

механическая обкладка проводящих пучков и присутствующие в ложных септах (в месте их срастания в центре плода) мощные продольные склеренхимные зоны.

У западно-североамериканского *E. revolutum* функцию механического каркаса выполняют склеренхимные тяжи в ложных септах в месте их срастания в центре плода. Эти тяжи вместе с одревесневающим эндокарпием и механическими обкладками пучков образуют единую склерифицированную зону в средней и проксимальной частях плода.

Базипетальное локулицидное вскрывание коробочек Lilioideae достигается благодаря утолщению перикарпия у дорзального пучка и формированию, еще на стадии завязи, клетками мезофилла 2–4 радиальных параллельных рядов клеток – зоны вскрывания плода. Для коробочек Lilioideae характерно разделение центральной части гинецея по зоне срастания неодревесневающих слоев внутренней эпидермы ложных септ, разделяющих три продольных склеренхимных тяжа.

Коробочки изученных автоанемохорных Lilioideae (кроме *E. revolutum*) имеют специализированные структуры, формирующиеся у механизма вскрывания на всей высоте плода. Эти структуры позволяют удерживать семена во вскрывшихся плодах, предотвращая их одновременное высыпание. Несмотря на морфологическое сходство и общую экологическую роль, эти структуры имеют различное строение. У коробочек *Tulipa* на каждой створке вскрывшегося плода сформированы ряды одревесневших волосков из 2–3 клеток, которые являются выростами эндокарпия. У коробочек *Fritillaria* и *Cardiocrinum* подобные волоски сформированы клетками мезо- и эндокарпия. У коробочек *Lilium* функцию удержания семян выполняет механическая обкладка дорзальных проводящих пучков, формирующая сеть, частично перекрывающая швы вскрывшихся коробочек. После вскрывания плода его створки расходятся, а щели остаются закрытыми сетью механической обкладки пучков. Описанные структуры представляют собой замечательный пример параллельной эволюции, решения одной функциональной задачи (в данном случае, регуляции высевания семян из вскрывшегося плода) различными морфолого-анатомическими приспособлениями.

Суммируя, можно заключить, что у исследованных представителей лилейных с автоанемохорной диссеминацией, произрастающих в широком спектре лесных и степных сообществ Евразии и Северной Америки, выявлены следующие структурные адаптации плодов к эффективному распространению семян: формирование специализированного механизма вскрывания плодов в зоне дорзального

(*Cardiocrinum*, *Erythronium* spp., *Fritillaria*, *Lilium*, *Tulipa*) или вентральных (*Calochortus*, *Tricyrtis*) проводящих пучков. Механизм вскрывания позволяет организовывать и регулировать процессы диссеминации; формирование механического каркаса плода одревесневающими клетками в перикарпии; формирование структур, частично закрывающих щели вскрывания коробочек, для регуляции высева семян из плодов (*Cardiocrinum*, *Fritillaria*, *Lilium*, *Tulipa*).

ВЫВОДЫ

У исследованных представителей Liliaceae выявлены морфолого-анатомические адаптации в структуре плодов, которые обеспечивают следующие типы диссеминации: автоанемохория, анемохория, баромирмекохория, эндозоохория.

Наиболее типичным и распространенным агентом диссеминации у исследованных представителей Liliaceae является ветер, при этом наиболее специализированные к анемохории коробочки характерны для представителей подсемейства Lilioideae, обеспечивающие автоанемохорное распространение семян.

У изученных автоанемохорных представителей *Cardiocrinum*, *Fritillaria*, *Lilium* и *Tulipa* в плодах имеется специализированный механический каркас и специфические выросты эндокарпия (*Tulipa*), перикарпия в целом (*Cardiocrinum*, *Fritillaria*) или обособляющаяся механическая обкладка дорзальных проводящих пучков (*Lilium*), частично перекрывающие щели вскрывания. Таксоны, обладающие подобными адаптациями, распространены в хвойных, смешанных и широколиственных лесах, степях, на альпийских лугах Евразии и Северной Америки.

Базипетальное вскрывание преимущественно вертикально ориентированных коробочек представителей Liliaceae травяного яруса листопадных лесов и наличие специализированных структур, способных удерживать семена в уже вскрывшихся коробочках, обеспечивают продолжительное («растянутое» во времени) сохранение семян на материнском растении до наступления наиболее благоприятных для распространения погодных условий. При наступлении

оптимальных условий (отсутствие осадков, сильные порывы ветра, установление устойчивого снегового покрова) обеспечивается «порционное» высвобождение семян через щели в дистальной части плода, и таким образом повышается эффективность распространения (в том числе по снегу – анемохионохорно) при усиливающейся силе ветра в приземном слое после листопада. Описанный выше процесс представляется наиболее эффективным модусом распространения диаспор на дальние расстояния.

Плоды баромирмекохорных представителей Liliaceae (*Gagea*, *Erythronium* spp., *Amana*) имеют менее развитый, по сравнению с коробочками автоанемохорных видов, механический каркас, большое количество межклетников, образующих обширные полости в перикарпии, и не дифференцированный механизм вскрывания. Одной из главных функций плодов баромирмекохорных представителей является продуцирование семян, а не их распространение. Таксоны, обладающие подобными адаптациями, распространены в листопадных широколиственных, смешанных и хвойных лесах умеренного пояса Евразии и Северной Америки.

Цвет плодов и запасание питательных веществ в перикарпии сочных не вскрывающихся плодов *Clintonia*, *Prosartes* и *Streptopus* указывает на эндозоохорию. Диаспорами *Clintonia* могут также являться и семена, способные высыпаться из оставшейся на родительском растении и растрескивающейся ягоды; эффективность такого барохорного распространения несоизмеримо ниже эндозоохории.

Эндозоохорное распространение плодов Liliaceae эффективно для расселения дальним транспортом, в первую очередь птицами, но препятствует расселению среди большого количества экосистем, что отражается на ареалах родов *Clintonia*, *Prosartes* и *Streptopus*, являющихся представителями травяных ярусов хвойных и широколиственных лесов Голарктического царства. При этом *Streptopus* имеет дизъюнктивный ареал и распространен в пределах всего Северного полушария, *Clintonia* имеет восточноазиатско-западносевероамериканский ареал, а *Prosartes* распространен исключительно в умеренных широтах Северной Америки.

Благодарности. За ценные и необходимые замечания к работе авторы выражают благодарность Н.Б. Леоновой, доценту кафедры биогеографии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и А.И. Константиновой, доценту кафедры высших растений биологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. За помощь в сборе материала авторы благодарят куратора Ботанического сада Дворца пионеров (Москва) П.В. Лодыгина.

Исследование выполнено при поддержке Программы развития МГУ (П. 1220) и в рамках ГЗ Главного ботанического сада имени Н.В. Цицина РАН № 122042700002–6 (ПСИ, МСР, НСЗ, АСТ, НДВ, ААМ, МБС, КВК, АНС), ГЗ № 121051100137-4 «Пространственно-временная организация экосистем в условиях изменений окружающей среды» (АВБ, МВК, МБС, КВК) и в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды» (АВБ, МВК, МБС, КВК) на УНУ «Фондовая оранжерея».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баранова М.В. Лилии. Л.: Агропромиздат, 1990. 384 с.
- Бобров А.В., Юрманов А.А., Романов М.С. Реконструкция формирования ареала растений семейства Монимиевые: молекулярно-генетический и морфологический анализ // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2016. № 5. С. 47–53.
- Ильинский А.П. Расселение растений (основные понятия и термины) // Природа. 1945. № 5. С. 45–55.
- Кожевников А.В. Весна и осень в жизни растений. М.: Изд-во МОИП, 1950. 239 с.
- Комар Г.А. Liliaceae // Сравнительная анатомия семян. Т. 1 / под ред. А.Л. Тахтаджян. Л.: Наука, 1985. С. 71–77.
- Комаров В.Л. Флора СССР. Л.: Изд-во АН СССР, 1935. Т. 4. 760 с.
- Левина Р.Е. Морфология и экология плодов. Л.: Наука, 1987. 160 с.
- Левина Р.Е. Способы распространения плодов и семян. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1957. 361 с.
- Прозина М.Н. Ботаническая микротехника. М.: Высшая школа, 1960. 207 с.
- Allen G.A., Soltis D.E., Soltis P.S. Phylogeny and biogeography of *Erythronium* (Liliaceae) inferred from chloroplast matK and Nuclear rDNA ITS sequences, *Systematic Botany*, 2003, vol. 28, p. 512–523.
- APG IV. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV, *Botanical Journal of the Linnean Society*, 2016, vol. 181, p. 1–20.
- Bobrov A.V.F.Ch., Romanov M.S. Morphogenesis of fruits and types of fruit of angiosperms, *Botany letters*, 2019, vol. 166, p. 366–399.
- Bolt Ph. The genus *Cardiocrinum*: its identification and cultivation, 2016. 73 p.
- Christenhusz M.J.M., Govaerts R., David J.C. et al. Tiptoe through the tulips – cultural history, molecular phylogenetics and classification of *Tulipa* (Liliaceae), *Botanical Journal of the Linnean Society*, 2013, vol. 172, p. 280–328.
- Clennett J.C.B., Chase M.W., Forest F. et al. Phylogenetic systematics of *Erythronium* (Liliaceae): morphological and molecular analyses, *Botanical Journal of the Linnean Society*, 2012, vol. 170, p. 504–528.
- Dahlgren R.M.T., Clifford H.T., Yeo P.F. Order Liliales, *The families of the Monocotyledons*, Berlin, New York, Tokio, Springer, 1985, p. 220–374.
- Li P., Lu R.S., Xu W.Q. et al. Comparative genomics and phylogenomics of east Asian Tulips (*Amana*, Liliaceae), *Frontiers in Plant Science*, 2017, vol. 8, p. 451.
- Li S.F., Chang Z.Y., Yuan Y.M. The origin and dispersal of the genus *Clintonia* Raf. (Liliaceae): evidence from its cytogeography and morphology, *Caryologia*, 1996, vol. 49, p. 125–135.
- Mathew B. A taxonomic and horticultural review of *Erythronium* L. (Liliaceae), *Botanical Journal of the Linnean Society*, 1992, vol. 109, p. 453–471.
- O'Brien T.P., McCully M.E. *The study of plant structure principles and selected methods*, Melbourne, Termarcarphi Pty. Ltd., 1981, 358 p.
- Ohwi J. *Flora of Japan* (in English). Washington, Smithsonian Institution, 1965, 1067 p.
- Persson H.A., Lundquist K., Nybom H. RAPD analysis of genetic variation within and among populations of Turk's-cap lily (*Lilium martagon* L.), *Hereditas*, 1998, vol. 128, p. 213–220.
- Pijl L. *Principles of dispersal in higher plants*, Berlin, Heidelberg, New York, Springer, 1982, 161 p.
- Ridley H.N. *The Dispersal of Plants throughout the World*. Ashford, Kent, L. Reeve & Company, 1930, 744 p.
- Roth I. *Fruits of Angiosperms*, Berlin, Stuttgart, Gebrüder Borntraeger, 1977, 675 p.
- Si-Feng L., Zhao-Yang Ch. A cytogeographical study on *Clintonia udensis* (Liliaceae), *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 1996, vol. 34, p. 33–37.
- Takahashi H. Distribution of *Tricyrtis* and its phytogeographical problems, *Acta Phytotaxonomica et Geobotanica*, 1987, vol. 38, p. 123–132.
- Tamura M.N. Liliaceae, *The Families and Genera of Vascular Plants*, vol. 3, Liliaceae (except Orchidaceae), Monocotyledons, K. Kubitzki (ed.), Berlin, Springer, 1998, p. 343–353.
- Utech F.H. Liliaceae Jussieu, *Flora of North America*, vol. 26, Magnoliophyta, Liliidae, Liliales and Orchidales, OUP USA, 2003, p. 11–21.
- Utech F.H., Shinwari Z.K., Kawano S. Biosystematic studies in *Disporum* (Liliaceae-Asparagoideae-Polygonateae) (VI): recognition of the North American section *Prosartes* as an autonomous genus, *Memoirs of the Faculty of Science, Kyoto University, Series of biology, New series*, 1995, vol. 16, p. 1–41.
- Wang M., Fan X., Zhang Y. et al. Phylogenomics and integrative taxonomy reveal two new species of *Amana* (Liliaceae), *Plant Diversity*, 2023, vol. 45, p. 54–68.
- Wang Y., Li X., Guo J. et al. Chloroplast DNA phylogeography of *Clintonia udensis* Trautv. & Mey. (Liliaceae) in East Asia, *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2010, vol. 55, p. 721–732.
- Wilczek Z., Zarzycki W., Pasko I. Distribution and phytoecological characteristics of *Streptopus amplexifolius* (L.) DC (Liliaceae) natural habitats in the Żywiec Basin (Western Carpathians), *Acta Geographica Silesiana*, 2016, vol. 22, p. 83–94.
- Woodcock H.B.D., Stearn W.T. *Lilies of the World. Their Cultivation and Classification*, London, Country Life Limited, 1950, 431 p.
- Wu Z.Y., Raven P.H. Liliaceae, *Flora of China*, vol. 24 (Flagellariaceae through Marantaceae). Beijing, Science Press, 2000, p. 73–264.
- Zhang W., Zhao J., Xue L. et al. Seed morphology and germination of native *Tulipa* species, *Agriculture*, 2023, vol. 13, no. 2, p. 466, DOI: 10.3390/agriculture13020466.

Поступила в редакцию 26.09.2023

После доработки 15.11.2023

Принята к публикации 14.02.2024

DISPERAL OF THE LILIACEAE REPRESENTATIVES IN RELATION TO THE STRUCTURE OF THEIR REPRODUCTIVE ORGANS

P.S. Iovlev¹, A.V. Bobrov², M.S. Romanov³, N.S. Zdravchev⁴, A.S. Timchenko⁵, M.V. Kandidov⁶, N.D. Vasekha⁷, A.A. Mikhaylova⁸, M.B. Stevanovich⁹, K.V. Kuptsov¹⁰, A.N. Sorokin¹¹

^{1, 3-5, 7-11} Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Tropical plants

^{2, 6, 9, 10} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Biogeography

¹ Scientific Researcher; e-mail: iovlev.petr@gmail.com

² Professor, D.Sc. in Biology; e-mail: avfch_bobrov@mail.ru

³ Head of the Laboratory, Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: romanovmikhail@hotmail.com

⁴ Scientific Researcher; e-mail: zdravchevnikita@yandex.ru

⁵ Junior Scientific Researcher; e-mail: ant.timchenko@yandex.ru

⁶ Post-graduate student; e-mail: mvkandidov@mail.ru

⁷ Gardener; e-mail: natashavasekha@yandex.ru

⁸ Junior Scientific Researcher; e-mail: ana.mikhaylova@list.ru

⁹ Intern, Master student; e-mail: stevanovich.mila@mail.ru

¹⁰ Intern, Bachelor Student; e-mail: kirkkk88@bk.ru

¹¹ Senior Scientific Researcher; e-mail: a_n_sorokin@mail.ru

The Liliaceae family is a terminal one in the order Liliales *sensu* APG IV (2016) and consists of 15 genera with more than 700 species. The family's geographical range covers most of the Northern hemisphere and extends through several natural zones, from forest tundra (*Gagea* species) to tropical forests (*Tricyrtis imeldae* Guthnick), within three continents, i. e. Eurasia, North America and Africa. Most Liliaceous genera occur both in Eurasia and North America. Representatives of Liliaceae develop coenocarpous fleshy indehiscent berries or dry dehiscent capsules. In most cases, multi-seeded berries themselves are a diaspore, whereas in the case of capsules, the seeds are normally a diaspora. The capsules play a vital role in seed dispersal. Structural adaptations of fruits allowed representatives of Liliaceae to spread into the territories that make up the modern range of the family.

The aim of the study is to determine the principal patterns of fruit development for the representatives of Liliaceae with different types of dissemination. The study is based on the investigation of morphological and anatomical structure of fruits which is related to geography, ecology and biology of the Liliaceae taxa dissemination.

The study has revealed that the wind is the most typical and widespread agent of dissemination for the investigated representatives of Liliaceae. The specialized capsules responsible for anemochory, i.e. auto-anemochory and anemochionochory (mainly in representatives of the ground cover of deciduous forests in temperate and subtropical climatic zones of the Holarctic Kingdom), are characteristic of representatives of the Lilioideae subfamily. Unlike the capsules supporting the anemochory, which actively participate in dissemination, the primary function of capsules of baro-myrmecochorous representatives of Liliaceae is seed production rather than their dispersal, which is reflected in the anatomical structure of the capsules, with numerous intercellular spaces in the pericarp and almost complete lack of its lignification. The endozoochory of fleshy berries of Liliaceae is effective for dispersal by long-distance transport, primarily by birds. Supposedly, the ornitochory prevents dispersal among a large number of ecosystems, which is echoed in the ranges of *Clintonia*, *Prosartes* and *Streptopus* genera, representatives of the ground cover of coniferous and broad-leaf forests of the Holarctic Kingdom.

Keywords: fruit anatomy, anemochory, dissemination, carpocology, myrmecochory, endozoochory

Acknowledgments. The authors would like to thank N.B. Leonova, Associate Professor of the Department of Biogeography, Lomonosov MSU Faculty of Geography, and A.I. Konstantinova, Associate Professor of the Department of Higher Plants, Lomonosov MSU Faculty of Biology, for their valuable and necessary comments, and also P.V. Lodygin, Curator of the Botanical Garden of Moscow Palace of Pioneers, for his assistance in material collection.

The work was supported by the MSU Program of Development (P.1220) and carried out at the Unique Scientific Facility Reserve Plant Collection in accordance with the Tsitsin Main Botanical Garden research project no. 122042700002-6 (PSI, MSR, NSZ, AST, NDV, AAM, MBS, KVK, ANS) and in accordance with research project no. 121051100137-4 the M.V. Lomonosov Moscow State University theme "The geographical legitimacy of origin of the biodiversity" (AVB, MVK, MBS, KVK) and the MSU Development Program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School "Future Planet and Global Environmental Change" (AVB, MVK, MBS, KVK).

REFERENCES

- Allen G.A., Soltis D.E., Soltis P.S. Phylogeny and biogeography of *Erythronium* (Liliaceae) inferred from chloroplast matK and Nuclear rDNA ITS sequences, *Systematic Botany*, 2003, vol. 28, p. 512–523.
- APG IV. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV, *Botanical Journal of the Linnean Society*, 2016, vol. 181, p. 1–20.
- Baranova M.V. *Lilii* [Lilias], Leningrad, Agropromizdat Publ., 1990, 384 p. (In Russian)
- Bobrov A.V., Yurmanov A.A., Romanov M.S. Reconstruction of the formation of the Monimiaceae family range: molecular-genetic and morphological analysis, *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2016, no. 5, p. 47–53. (In Russian)
- Bobrov A.V., Romanov M.S. Morphogenesis of fruits and types of fruit of angiosperms, *Botany letters*, 2019, vol. 166, p. 366–399.
- Bolt Ph. *The genus Cardiocrinum: its identification and cultivation*, Philip Bolt, 2016, 73 p.
- Christenhusz M.J.M., Govaerts R., David J.C. et al. Tiptoe through the tulips – cultural history, molecular phylogenetics and classification of Tulipa (Liliaceae), *Botanical Journal of the Linnean Society*, 2013, vol. 172, p. 280–328.
- Clennett J.C.B., Chase M.W., Forest F. et al. Phylogenetic systematics of *Erythronium* (Liliaceae): morphological and molecular analyses, *Botanical Journal of the Linnean Society*, 2012, vol. 170, p. 504–528.
- Dahlgren R.M.T., Clifford H.T., Yeo P.F. Order *Liliales*, *The families of the Monocotyledons*, R.M.T. Dahlgren (ed.), Berlin, New York, Tokyo, Springer, 1985, p. 220–374.
- Il'inskii A.P. Rasselenie rastenii (osnovnye ponyatiya i terminy) [Plant dispersal (the main notions and terms)], *Priroda*, 1945, no. 5, p. 45–55. (In Russian)
- Komar G.A. [Liliaceae], *Anatomia Seminum Comparativa*, A. Takhtajan (ed.), Tomus 1, Leningrad, Nauka Publ., 1985, p. 71–77. (In Russian)
- Komarov V.L. *Flora SSSR* [Flora of the USSR], vol. 4, Leningrad, Editio Academiae Scientiarum URSS Publ., 1935, 760 p.
- Kozhevnikov A.V. *Vesna i osen' v zhizni rastenii* [Spring and autumn in plants' life], Moscow, Izdatel'stvo MOIP Publ., 1950, 239 p. (In Russian)
- Levina R.E. *Morfologiya i ekologiya plodov* [Fruit morphology and ecology], Leningrad, Nauka Publ., 1987, 160 p. (In Russian)
- Levina R.E. *Sposoby rasprostraneniya plodov i semyan* [Fruit and seeds dispersal mechanisms], Moscow, Izd-vo Mosk. Un-ta Publ., 1957, 361 p. (In Russian)
- Li P., Lu R.S., Xu W.Q. et al. Comparative genomics and phylogenomics of east Asian Tulips (*Amana*, Liliaceae), *Frontiers in Plant Science*, 2017, vol. 8, p. 451.
- Li S.F., Chang Z.Y., Yuan Y.M. The origin and dispersal of the genus *Clintonia* Raf. (Liliaceae): evidence from its cytogeography and morphology, *Caryologia*, 1996, vol. 49, p. 125–135.
- Mathew B. A taxonomic and horticultural review of *Erythronium* L. (Liliaceae), *Botanical Journal of the Linnean Society*, 1992, vol. 109, p. 453–471.
- O'Brien T.P., McCully M.E. *The study of plant structure principles and selected methods*, Melbourne, Termarcarphi Pty. Ltd., 1981, 358 p.
- Ohwi J. *Flora of Japan (in English)*, Washington, Smithsonian Institution, 1965, 1067 p.
- Persson H.A., Lundquist K., Nybom H. RAPD analysis of genetic variation within and among populations of Turk's-cap lily (*Lilium martagon* L.), *Hereditas*, 1998, vol. 128, p. 213–220.
- Pijl L. *Principles of dispersal in higher plants*, Berlin, Heidelberg, New York, Springer, 1982, 161 p.
- Prozina M.N. *Botanicheskaya mikrotehnika* [Botanical microtechnique], Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1960, 207 p. (In Russian)
- Ridley H.N. *The Dispersal of Plants throughout the World*, Ashford, Kent, L. Reeve & Company, 1930, 744 p.
- Roth I. *Fruits of Angiosperms*, Berlin, Stuttgart, Gebrüder Borntraeger, 1977, 675 p.
- Si-Feng L., Zhao-Yang Ch. A cytogeographical study on *Clintonia udensis* (Liliaceae), *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 1996, vol. 34, p. 33–37.
- Takahashi H. Distribution of Tricyrtis and its phytogeographical problems, *Acta Phytotaxonomica et Geobotanica*, 1987, vol. 38, p. 123–132.
- Tamura M.N. Liliaceae, *The Families and Genera of Vascular Plants*, K. Kubitzki (ed.), vol. 3, Liliales (except Orchidaceae), Monocotyledons, Berlin etc., Springer, 1998, p. 343–353.
- Utech F.H. Liliaceae Jussieu, *Flora of North America*, vol. 26, Magnoliophyta, Liliidae, Liliales and Orchidales, OUP, USA, 2003, p. 11–21.
- Utech F.H., Shinwari Z.K., Kawano S. Biosystematic studies in *Disporum* (Liliaceae-Asparagoideae-Polygonateae) (VI): recognition of the North American section *Prosartes* as an autonomous genus, *Memoirs of the Faculty of Science, Kyoto University. Series of biology. New series*, 1995, vol. 16, p. 1–41.
- Wang M., Fan X., Zhang Y. et al. Phylogenomics and integrative taxonomy reveal two new species of *Amana* (Liliaceae), *Plant Diversity*, 2023, vol. 45, p. 54–68.
- Wang Y., Li X., Guo J. et al. Chloroplast DNA phylogeography of *Clintonia udensis* Trautv. & Mey. (Liliaceae) in East Asia, *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2010, vol. 55, p. 721–732.
- Wilczek Z., Zarzycki W., Pasko I. Distribution and phytoecological characteristics of *Streptopus amplexifolius* (L.) DC (Liliaceae) natural habitats in the Żywiec Basin (Western Carpathians), *Acta Geographica Silesiana*, 2016, vol. 22, p. 83–94.
- Woodcock H.B.D., Stearn W.T. *Lilies of the World. Their Cultivation and Classification*, London, Country Life Limited, 1950, 431 p.
- Wu Z.Y., Raven P.H. *Flora of China*, vol. 24 (Flagellariaceae through Marantaceae), Beijing, Science Press, 2000, p. 73–264.
- Zhang W., Zhao J., Xue L. et al. Seed morphology and germination of native *Tulipa* species, *Agriculture*, 2023, vol. 13, no. 2. P. 466.

Received 26.09.2023

Revised 15.11.2023

Accepted 14.02.2024

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА АНТРОПОГЕННО НАРУШЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ НАДЫМ-ПУРОВСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ (СЕВЕР ЗАПАДНОЙ СИБИРИ)

А.Ю. Опекунов¹, М.Г. Опекунова², С.Ю. Кукушкин³, С.Ю. Янсон⁴

¹⁻³ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра геоэкологии

⁴ Санкт-Петербургский государственный университет, ресурсный центр «Микроскопии и микроанализа»

¹ Проф., д-р геол.-минерал. наук; e-mail: a_opekunov@mail.ru

² Проф., д-р геогр. наук; e-mail: m.opekunova@mail.ru

³ Доц., канд. геогр. наук; e-mail: stepic@yandex.ru

⁴ Зам. директора, канд. геол.-минерал. наук; e-mail: jansn.sv@gmail.com

В статье проведен анализ содержания металлов в твердой фазе и в талой воде, отобранных на антропогенно нарушенных и фоновых территориях Надым-Пуровского междуречья. Приведены результаты микроскопических исследований твердофазного вещества, показавших наличие вторичных минералов, техногенных образований, а также большого количества пирита в пробах восточной части района исследований. Максимальные концентрации металлов в пыли установлены в снеге санитарно-защитных зон объектов размещения отходов, за исключением Са, который преобладает в снежном покрове г. Новый Уренгой (до 10% сух. в-ва). Урбанизированная территория характеризуется наибольшими значениями пылевой нагрузки (до 111 мг/м²·сут). Отмеченное загрязнение Ва в пределах полигонов захоронения отходов в г. Новый Уренгой носит локальный характер и связано с местами переработки буровых отходов. С использованием факторного анализа выделены основные ассоциации металлов, присущие твердофазному веществу разных функционально используемых территорий: Са-Со-V-Mn (город), Ва-Sr-K-Na и Cd-Cu-Pb (полигоны захоронения отходов), Cu-Ni-Cd (вся территория). На основе изучения содержания растворенных форм в талой воде выявлена высокая подвижность металлов в северных ландшафтах и ее снижение в условиях городской среды. Минералого-геохимический анализ снега дает основание говорить о влиянии Норильского промышленного района на восточную часть Надым-Пуровского междуречья, индикаторами которого являются Zn, Cu, Ni, Pb и минерал пирит. Риски загрязнения окружающей среды при аэротехногенном переносе связаны с высоким содержанием в пыли Zn, Cu, Ni, Pb и Ва. Расчет индекса вероятности токсичности (MERMQ) показал, что некоторые пробы пыли с территории полигонов обладают высокой вероятностью биологических эффектов. С использованием данных по химическому составу почв и почвенной воды установлено отсутствие видимого влияния загрязнения снега на рост концентраций металлов в почве и почвенной воде за исключением локального загрязнения Ва, которое привело к двукратному росту содержания этого металла в верхнем горизонте почв.

Ключевые слова: снег, талая вода, твердофазное вещество (пыль), вторичные минералы, металлы, загрязнение почв

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.2

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы при оценке состояния атмосферного воздуха и определении роли воздушного переноса поллютантов в загрязнении природных и техногенных ландшафтов особое внимание уделяется изучению снежного покрова [Шевченко и др., 2015; Опекунов и др., 2021; Moskovchenko et al., 2021; Zhang et al., 2021; Opekunova et al., 2020; Pozhitkov et al., 2020; Siudek et al., 2015; Vlasov et al., 2020; Wang et al., 2015; Xue et al., 2020; Yakovlev et al., 2022]. Это доступный и относительно дешевый метод исследования. Снег имеет высокую сорбционную способность и не проявляет биохимическую

активность [Kurbakov et al., 2020], накапливает как растворенные химические вещества, так и твердые взвеси. Количество и химический состав пыли и талой воды отражают масштаб поступления загрязняющих веществ из приземного слоя атмосферы на земную поверхность и в водные объекты. Он определяется через пылевую, металльную и ионную нагрузки [Касимов и др., 2012; Опекунов и др., 2021] или запасы тяжелых металлов [Zhang et al., 2021].

Получаемые при изучении снежного покрова данные позволяют оценить потенциальные риски для экосистем от выброса загрязняющих веществ в почву при таянии снега [Kurbakov et al., 2020;

Zhang et al., 2021]. Такие оценки дают прямой вклад атмосферного переноса в загрязнение почв и природных вод. Считается, что основным механизмом поступления Cd, Cu, Zn, Hg и Pb в почвы является атмосферное осаждение [Lim et al., 2006], а вблизи источников загрязнения перечень таких элементов существенно расширяется. Так, расчеты показывают, что примерно 92,5% Pb в обрабатываемых почвах Китая поступает в результате атмосферных выпадений [Peng et al., 2019].

Благодаря высокой информативности, снежный покров стал широко использоваться в качестве объекта мониторинга загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами. Сочетание изучения твердой и растворенной фаз, а также применение микроскопических методов исследования дают комплексную информацию о формах металлов и позволяют идентифицировать источники их поступления в атмосферу [Опекунов и др., 2021; Zhang et al., 2021].

Настоящее исследование состояния снежного покрова проведено на севере Западной Сибири в районе освоения нефтегазоконденсатных и газоконденсатных месторождений (НГКМ и ГКМ) и урбанизации на территории Надым-Пуровского междуречья. По данным метеостанции Уренгой, средняя продолжительность залегания снега здесь составляет 231 день, максимальная высота – 113 см. Таким образом, снег в течение 7–8 месяцев «фиксирует» загрязнение атмосферного воздуха и в районах активной хозяйственной деятельности может стать потенциальным источником вторичного загрязнения почв, природных вод, растительности. Цель исследований – определение пылевой и ионной нагрузки, изучение минералогического и химического составов твердой фазы, содержания металлов в талой воде в зависимости от функционального использования территории, а также определение риска загрязнения почв при таянии снега.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Отбор снега проводился в 2021–2022 гг. на лицензионных участках Пырейного ГКМ и Юбилейного НГКМ, в г. Новый Уренгой, в пределах санитарно-защитных зон (СЗЗ) территории объектов размещения отходов (ТОРО): твердых коммунальных отходов (ТКО) (г. Новый Уренгой и пгт Коротчаево) и промышленных отходов (г. Новый Уренгой), а также на условно-фоновых участках (рис. 1). Территория расположена в пределах северной тайги и лесотундры. Все перечисленные объекты, за исключением условно-фоновых участков, подвержены химическому загрязнению за счет атмосферного выпадения поллютантов разного происхождения, что приводит к трансформации природных потоков вещества [Опекунова и др., 2018; Opekunov et al., 2022].

Всего в ходе исследований было отобрано 40 проб снега снегомером ВС-43. Число кернов определялось, исходя из условия получения общего объема воды в пробе 1,9–2,1 л. При отборе снег взвешивался для определения плотности и запаса воды. Отбор проб проводился 17–18 апреля 2021 г. и 8–10 апреля 2022 г. В 2021 г. продолжительность залегания снежного покрова до взятия образцов составила 179–180 дней, в 2022 г. – 167–169 дней.

Снег растапливался при комнатной температуре, рН талой воды измерялся рН-метром фирмы HoriBa, минерализация воды – кондуктометрическим методом (СОМ-100, Южная Корея). Талая вода фильтровалась через мембранные фильтры с диаметром пор 0,45 мкм для разделения растворенной (и коллоидной) и твердой фаз вещества, подкислялась концентрированной HNO_3 .

В летний период в точках взятия проб снега были отобраны почвы (в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-2017). Из них центрифугированием (центрифуга СМ-6М, скорость 3500 об/мин в течение 20 мин) отжаты почвенные воды.

Анализ содержания металлов (Na, Ca, K, Fe, Mn, Cd, Cr, Zn, Sr, Cu, Ni, Ba, Pb, Co, V) в пыли, в талой воде, почвах и почвенных водах выполнен в Центральной лаборатории ВСЕГЕИ им. А.П. Карпинского методом ИСП-МС на приборе ELAN-6100 DRC. Определялся вес твердой фазы на фильтрах, проводилось полное кислотное вскрытие образцов, а также проб почв в соответствии с ПНД Ф 6.1:2.3:3.11-98.

Микроминералогические исследования выполнены методом растровой электронной микроскопии на оборудовании ресурсного центра «Микроскопии и микроанализа» (Научный парк СПбГУ) – сканирующем электронном микроскопе Quanta 200 3D (FEI, Нидерланды) с аналитическим комплексом Pegasus 4000 (EDAX, USA) и микроскопе-микроанализаторе Hitachi TM3000. Оптические фотографии получены с помощью стереомикроскопа Leica M205 C (Leica, Германия, 2007).

При интерпретации полученных материалов рассчитывались пылевая, металльная и ионная нагрузки. Пылевая нагрузка ($\text{мг}/\text{м}^2$ в сутки) оценивает количество твердых частиц, поступающих на поверхность земли в течение суток. Металльная нагрузка характеризует массу поступающего в твердых осадках изучаемого металла ($\text{мкг}/\text{м}^2$ в сутки). Расчет ионной нагрузки, т. е. количества растворенного металла в талой воде, приходящегося на единицу площади территории ($\text{мкг}/\text{м}^2$ в сутки), проводился с учетом запаса воды в снегу на изученных участках. Подробно методика расчета указанных выше характеристик приведена в предыдущих работах [Опекунов и др., 2021; Opekunova et al., 2020].

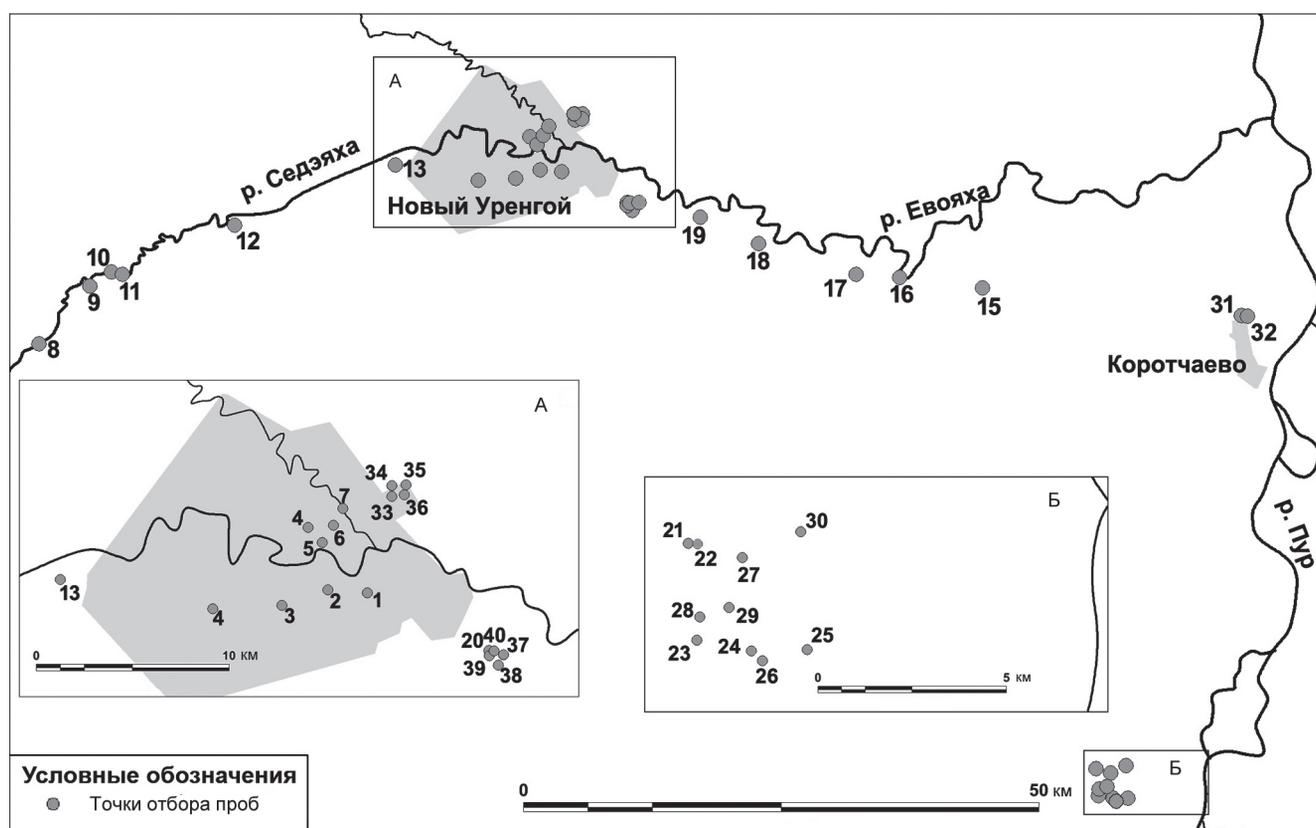


Рис. 1. Карта-схема отбора проб снега:

А – Новый Уренгой с полигонами промышленных отходов (пробы 33–36) и ТКО (пробы 37–40); Б – лицензионный участок Пырейное; лицензионный участок Юбилейное (пробы 9–11); территория полигона ТКО пгт Коротчаево (пробы 31 и 32)

Fig. 1. Schematic map of snow sampling:

А – Novy Urenгой with industrial (samples 33–36) and municipal (samples 37–40) waste landfills; Б – the Pyreynoye license site; the Yubilejnoye license site (samples 9–11); area of the municipal waste landfill of the Korotchaevo urban-type settlement (samples 31 and 32)

Математическая обработка результатов осуществлялась с использованием описательной статистики и факторного анализа методом главных компонент (ФА МГК) в программном пакете STATISTICA 28.0 (StatSoft).

Уровень загрязнения и вероятности проявления токсичности твердофазного вещества оценивался по индексу токсичности (MERMQ). Индекс используется для определения токсического воздействия тяжелых металлов на почвенную среду [Gao, Chen, 2012; Pejman et al., 2015] и рассчитывается по формуле:

$$MERMQ = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{C_n}{ERM}}{n},$$

где C_n – концентрация анализируемых металлов; ERM – медианная величина концентрации металла, выше которой биологические эффекты наблюдаются часто или всегда [Long et al., 1995]; n – количество используемых в расчете металлов.

В оценочной шкале $MERMQ$ приняты четыре уровня риска: менее 0,1 – низкий (средняя вероят-

ность токсичности пробы – 9%), 0,1–0,5 – средний (21%), 0,5–1,5 – высокий (49%), более 1,5 – очень высокий (вероятность токсичности – 76%).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Минералогический и вещественный составы пыли. Микроскопические исследования проведены для четырех образцов: по одному образцу с каждого из изученных полигонов (пр. 34 – полигон промышленных отходов, пр. 37 – полигон ТКО в г. Новый Уренгой, пр. 31 – полигон ТКО в пгт Коротчаево), а также проба с территории лицензионного участка Пырейного ГКМ (пр. 26). В пробах отмечены зерна кварца, полевых шпатов, глинистых минералов, слюд (гидрослюды), а также акцессорные и вторичные минералы. Размер частиц в основном алеврит-пелитовый с редкими псаммитовыми зернами. Форма в большинстве образцов обломочная угловатая. Образец 31 представлен окатанными псаммит-алевритовыми зернами кварца и полевых шпатов с небольшим количеством глинистых частиц.

Во всех образцах встречаются оксиды / гидроксиды железа с включениями самородного металла. Морфологически это обломочные зерна (обр. 26, 31 и 37) (рис. 2, А), агрегаты (все образцы) (см. рис. 2, Б), скелетные образования (обр. 37), а также сферулы различных размеров (обр. 26, 31 и 34) (см. рис. 2, В). В образце 37 часты псевдосферические агрегаты оксидов / гидроксидов железа (см. рис. 2, Г), сцементированные глинистыми минералами. Минералы железа в образце 34 – это оксиды и гидроксиды в виде обломков или микрокристаллических агрегатов, а также частицы самородного железа. Сульфидов в этом образце не обнаружено. В образце 37 оксиды железа установлены в виде мелких зерен в пустотах и порах органики. В образцах 26 и 31, кроме вышеописанных форм, зафиксировано множество зерен частично окисленного пирита в форме крупных (десятки микрон) обломков кристаллов и в виде рассеянной пыли в комковатых глинистых агрегатах.

Акцессорные минералы немногочисленны, кроме пирита. В образцах 31 и 37 обнаружены зерна циркона и сфалерита. Во всех пробах есть минералы титана: рутил (анатаз), ильменит. Вторичные минералы представлены большим количеством мелких зерен барита в образцах 34 и 37 (рис. 2, Д). Встречаются техногенные материалы – металлы, сплавы, силикатные шарики, шлаки (Fe–Mn–Ti, Fe–Cu и др.), а также синтетические волокна в пробах с полигонов захоронения отходов (см. рис. 2, Е–З).

В пробах присутствуют органические остатки, особенно они многочисленны в образцах 37 и 34 (см. рис. 2, И, К). В образцах 26 и 31 – это округлые пористые образования, похожие на пыльцу.

Химический состав пыли. По химическому составу особенно выделяются пробы с объектов размещения отходов (табл. 1). В пределах их СЗЗ отмечается максимальное содержание Na, K, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, Sr, Cd, Ba, Pb. Городская территория отличается от других высокой концентрацией Ca. Пыль, отобранную в городе и в пределах ТОРО, объединяет повышенное содержание V. На условно-фоновых территориях, городских и лицензионных участках близкое содержание в твердой фазе Na, K, V, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, Sr, Ba, Pb. Это свидетельствует о том, что твердофазное вещество в снежном покрове изученных территорий в основном имеют одни и те же источники эмиссии. Существенно, что в г. Новый Уренгой и на прилегающих территориях отсутствуют крупные промышленные объекты, а теплоэнергетические предприятия работают в основном на газе. На ТОРО загрязнение снега происходит при перемещении и разгрузке отходов, и состав твердых частиц отличается от атмосферной пыли.

Анализ распределения металлов в твердой фазе вещества выполнен на основе показателя контраст-

ности содержания элементов (отношение максимального и минимального значений медианы элемента по четырем группам изучаемых территорий – в скобках): Ba (16) > Ca (6,4) > Cd (4,0) > Zn (3,3) > Sr (2,1) > Pb (2,0) > Cu (1,9) > Na (1,8) > K (1,8) > Mn (1,7) > V (1,5) > Ni (1,5) > Fe (1,4) > Co (1,3). В твердой фазе наиболее контрастные содержания выявлены у Ba, Ca, Cd и Zn. Кроме того, они характеризуются высокими абсолютными значениями. Вероятно, одна из основных причин этого – техногенное загрязнение. Очень высокие содержания Ba в пыли снежного покрова (до 2,84%) установлены в СЗЗ объектов размещения промышленных отходов и ТКО в г. Новый Уренгой. В первом случае это вызвано функционированием в пределах полигона производства по переработке буровых шламов. Известно, что в составе буровых растворов в качестве утяжелителя широко используется барит [Опекунов et al., 2022]. На территории захоронения ТКО накопление Ba в снежном покрове обусловлено проведением буровых работ в непосредственной близости от полигона. Причиной концентрации Ca в твердых осадках г. Новый Уренгой являются строительные материалы, содержащие известь, в том числе штукатурная облицовка фасадов домов. Накопление в твердофазном веществе Cd и Zn также присуще пробам с ТОРО, вызванное пылением отходов, загрязненных металлами, и воздействием автотранспорта.

Расчет пылевой и металльной нагрузок показал существенный рост этих характеристик в пределах города. Пылевая нагрузка здесь в 2,6 раза выше, чем на других участках за пределами городской черты, где медианы нагрузок мало отличаются друг от друга (см. табл. 1). На урбанизированной территории все изученные элементы, за исключением Ba, характеризуются максимальными показателями металльной нагрузки (рис. 3). Источники поступления Ba на ТОРО были указаны выше.

Химический состав талой воды. Снегозапас меняется от 85 до 203 мм. Минимальное среднее значение отмечено в г. Новый Уренгой, максимальное установлено на территории лицензионных участков (табл. 2). Талая вода характеризуется низкой минерализацией с диапазоном значений 4,8–23,4 мг/л. В пределах города она увеличивается, что указывает на повышенный уровень загрязнения снежного покрова по отношению к другим районам исследований. Талая вода имеет в основном слабокислую реакцию, отражающую ландшафтно-геохимические условия северной тайги и лесотундры. На урбанизированной территории pH воды повышается до нейтральных значений с максимальной величиной 7,06. Подщелачивание природных вод, включая снег, является характерной чертой городов [Экогеохимия..., 1995; Опекунов и др., 2021; Pozhitkov et al., 2020].

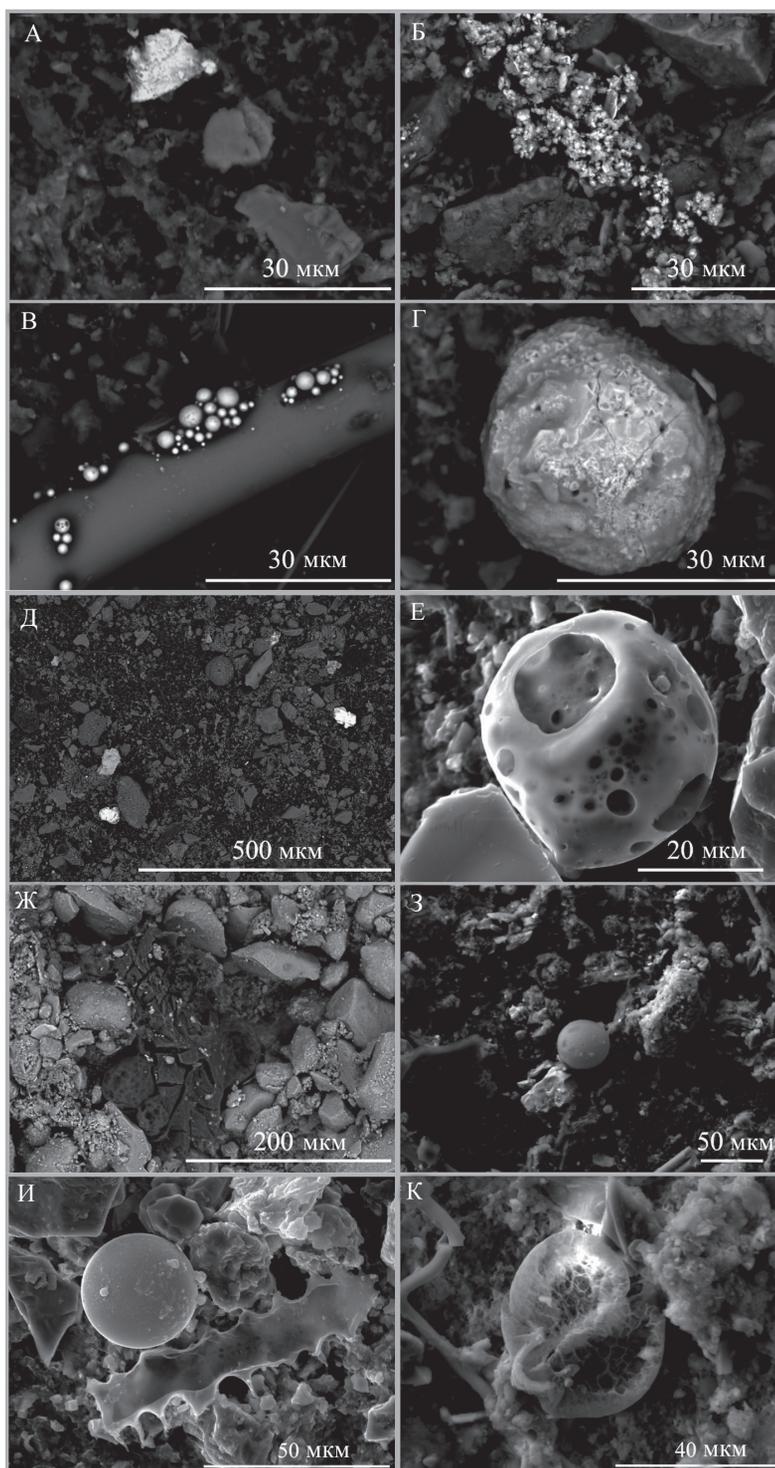


Рис. 2. Минеральные и органические фазы пыли (изображения СЭМ).

Соединения Fe, в том числе самородного: А – обломочное зерно самородного (?) Fe (обр. 26); Б – агрегаты оксидов / гидроксидов Fe (обр. 31); В – сферулы самородного Fe (обр. 34); Г – псевдосферические агрегаты оксидов / гидроксидов Fe (обр. 37); вторичные минералы и техногенные материалы: стекла, шлаки, стеклянные и металлические сферулы, волокна углеродные и минеральные (?): Д – включения зерен барита (белые зерна) (обр. 37); Е – шлак Fe–Mn состава (обр. 34); Ж – Fe–Cu сплавы (обр. 31); З – стеклянные сферулы, волокна (обр. 34); органические остатки: И – рядом со стеклянной сферулой (обр. 37); К – органические остатки и синтетические волокна (обр. 34)

Fig. 2. Mineral and organic components of dust (SEM images).

Compounds of Fe, including native ones: А – detrital grain of native (?) Fe (sample 26); Б – aggregates of Fe oxides/hydroxides (sample 31); В – spherules of native Fe (sample 34); Г – pseudospherical aggregates of Fe oxides/hydroxides (sample 37); secondary minerals and technogenic materials: glass, slag, glass and metal spherules, carbon and mineral fibers (?): Д – inclusions of barite grains (white grains) (sample 37); Е – slag of Fe–Mn composition (sample 34); Ж – Fe–Cu alloys (sample 31); З – glass spherules, fibers (sample 34); organic remains: И – next to the glass spherule (sample 37); К – organic residues and synthetic fibers (sample 34)

Статистические показатели химического состава пыли в снежном покрове, пылевой и суммарной металлической нагрузки на антропогенно нарушенных и условно-фоновых территориях Надым-Пуровского междуречья

Показатели и содержание	Антропогенно нарушенные территории			Условно-фоновая территория
	Город	ТОРО	Лицензионные участки	
Пылевая нагрузка, мг/м ² ·сут	<u>43,0</u> 19,1–111	<u>16,6</u> 7,7–69	<u>16,3</u> 6,5–109	<u>15,7</u> 14,4–37
Металлическая нагрузка, мкг/м ² ·сут	<u>4120</u> 745–10737	<u>972</u> 1005–6453	<u>542</u> 245–2761	<u>814</u> 217–3026
Химический состав пыли, мг/кг:				
Na	<u>3200</u> 1900–4800	<u>5900</u> 3400–10 000	<u>4700</u> 700–7300	<u>3400</u> 1700–10 200
K	<u>5200</u> 3500–6100	<u>9100</u> 5600–14 900	<u>7200</u> 3200–9600	<u>6100</u> 3200–13 900
Ca	<u>44100</u> 5900–107 100	<u>14600</u> 3400–37 300	<u>6900</u> 2900–67 400	<u>12500</u> 2700–58 800
V	<u>46,0</u> 30,8–109	<u>52,1</u> 18,8–90	<u>34,3</u> 10,9–59	<u>41,4</u> 20,6–72
Mn	<u>256</u> 150–650	<u>390</u> 140–660	<u>229</u> 49–535	<u>271</u> 101–558
Fe	<u>15800</u> 9300–27 900	<u>19470</u> 8100–31 800	<u>15700</u> 3360–27 370	<u>14200</u> 6400–25 900
Co	<u>6,74</u> 4,23–15,0	<u>8,28</u> 2,28–12,1	<u>6,19</u> 1,31–16,1	<u>6,68</u> 2,53–11,3
Ni	<u>30,5</u> 15,1–45	<u>45,2</u> 12,4–74	<u>42,6</u> 5,89–200	<u>41,0</u> 17,9–56
Cu	<u>88,2</u> 54,2–320	<u>169</u> 59,3–339	<u>146</u> 24,7–306	<u>134</u> 78,6–289
Zn	<u>280</u> 136–461	<u>751</u> 184–2590	<u>355</u> 70,4–767	<u>225</u> 102–608
Sr	<u>64,1</u> 46,2–142	<u>134</u> 57–281	<u>72,6</u> 25,1–114	<u>83,9</u> 25,8–114
Cd	<u>0,28</u> 0,13–0,84	<u>0,80</u> 0,087–1,51	<u>0,52</u> 0,068–1,45	<u>0,20</u> 0,13–0,56
Ba	<u>227</u> 164–1350	<u>3720</u> 246–28 400	<u>254</u> 163–932	<u>342</u> 165–547
Pb	<u>39,0</u> 14,2–100	<u>70,8</u> 14,2–249	<u>35,7</u> 12,6–93	<u>47,8</u> 25,7–77

Примечание. В числителе приведена медиана, в знаменателе – минимальное и максимальное значения.

В снежном покрове г. Новый Уренгой отмечено высокое содержание растворенных Ca, Cr, Mn, Co, Sr, в пределах ТОРО – Zn, Ba, Pb. Ряд снижения контрастности элементов жидкой фазы снега имеет следующую последовательность: Ba (17) > Pb (6,2) > Ca (4,4) > Cu (2,8) > Sr (2,7) > Cr (2,6) > Zn (2,6) > Mn (2,4) > Fe (2,1) > V (2,1) > Cd (1,8) > Na (1,8) > Co (1,7) > As (1,5) > K (1,4) > Ni (1,3), т. е. наиболее широкий диапазон значений рас-

творенной фазы металлов отмечаются у Ba, Pb и Ca. Высокая контрастность содержания щелочных металлов (Ca, Ba) была также отмечена в твердой фазе осадков, что вызвано техногенным загрязнением. Контрастность содержания Pb обусловлена низкой растворимостью металла в нейтральной среде, типичной для города, в сравнении с другими участками отбора проб (см. табл. 2).

Таблица 2

**Статистические показатели химического состава талой воды, значений рН, минерализации
и ионной нагрузки на антропогенно нарушенных и условно-фоновых территориях
Надым-Пуровского междуречья**

Показатели и содержание	Антропогенно нарушенные территории			Условно-фоновая территория
	Город	ТОРО	Лицензионные участки	
Снегозапасы, мм	<u>128</u> 89–169	<u>136</u> 113–200	<u>151</u> 122–203	<u>143</u> 85–180
Минерализация, мг/л	<u>12,3</u> 6,4–23,4	<u>6,5</u> 4,8–13,3	<u>6,1</u> 4,8–11,3	<u>8,2</u> 5,2–9,9
рН, усл. ед.	<u>6,97</u> 5,89–7,06	<u>5,53</u> 5,06–6,30	<u>5,33</u> 4,66–6,52	<u>5,68</u> 5,42–6,65
Химический состав талой воды, мкг/л:				
Na	<u>400</u> 190–1300	<u>305</u> 217–392	<u>550</u> 220–1600	<u>440</u> 150–940
K	<u>130</u> 80–230	<u>130</u> 95–264	<u>180</u> 90–320	<u>140</u> 70–190
Ca	<u>2400</u> 620–4700	<u>1100</u> 500–4500	<u>540</u> 250–2300	<u>690</u> 310–2400
V	<u>0,13</u> 0,07–0,21	<u>0,085</u> 0,053–0,44	<u>0,067</u> 0,032–0,11	<u>0,061</u> 0,029–0,11
Cr	<u>0,92</u> 0,70–1,48	<u>0,40</u> 0,19–0,86	<u>0,36</u> 0,22–1,29	<u>0,83</u> 0,40–1,37
Mn	<u>6,62</u> 2,33–28,2	<u>3,83</u> 3,22–9,19	<u>4,89</u> 1,95–21,5	<u>2,75</u> 1,67–4,25
Fe	<u><5,0</u> <5–9,36	<u>10,4</u> 5,83–18,9	<u>10,3</u> 5,51–87,1	<u>6,64</u> 6,43–10,7
Co	<u>0,10</u> 0,03–0,21	<u>0,058</u> 0,033–0,094	<u>0,075</u> 0,025–0,32	<u>0,061</u> 0,021–0,089
Ni	<u>0,71</u> 0,50–1,03	<u>0,61</u> 0,035–0,91	<u>0,79</u> 0,49–1,06	<u>0,82</u> 0,73–1,36
Cu	<u>1,94</u> 1,28–9,79	<u>1,53</u> 0,94–3,44	<u>2,09</u> 1,03–6,21	<u>4,36</u> 1,95–6,72
Zn	<u>15,7</u> 11,7–39	<u>41,6</u> 8,57–93	<u>33,5</u> 16,6–66	<u>24,1</u> 20,4–32
As	<u>0,083</u> 0,058–0,19	<u>0,070</u> 0,038–0,49	<u>0,074</u> 0,042–0,19	<u>0,057</u> 0,04–0,12
Sr	<u>4,83</u> 1,95–53	<u>2,36</u> 1,16–10,8	<u>2,30</u> 1,17–4,04	<u>1,76</u> 1,12–3,42
Cd	<u>0,028</u> 0,019–0,072	<u>0,029</u> 0,021–0,043	<u>0,050</u> 0,018–0,072	<u>0,033</u> 0,021–0,039
Ba	<u>21,0</u> 9,3–135	<u>82,4</u> 5,6–217	<u>7,91</u> 3,14–15,9	<u>4,86</u> 2,29–12,1
Pb	<u>0,14</u> 0,094–0,38	<u>0,87</u> 0,35–1,53	<u>0,67</u> 0,25–1,43	<u>0,24</u> 0,16–0,96
Ионная нагрузка, мкг/м ² ·сут	<u>2383</u> 730–3759	<u>1435</u> 685–5817	<u>1289</u> 652–3573	<u>972</u> 628–2952

Примечание. В числителе приведена медиана, в знаменателе – минимальное и максимальное значения.

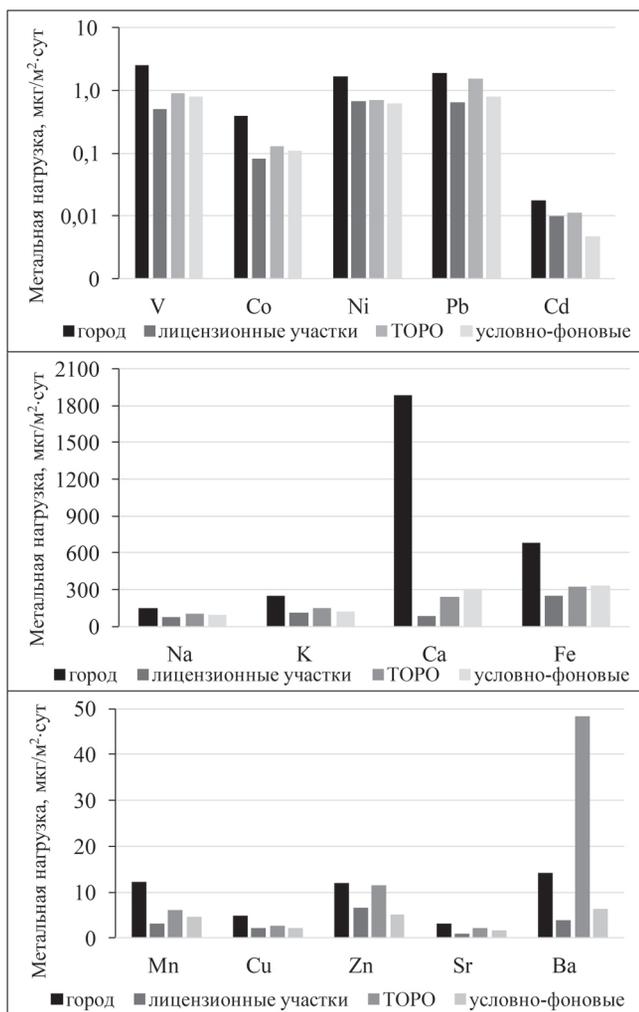


Рис. 3. Металльная нагрузка на антропогенно нарушенные и условно-фоновые территории

Fig. 3. Metal load on the anthropogenically disturbed and background territories

При анализе распределения и подвижности элементов проведена оценка соотношения растворенной и твердой фаз в талой воде, которая позволила выделить три группы металлов. Первая группа объединяет Na (78), Ca (74), Zn (76), Cd (76) (здесь и далее в скобках – процент растворимых форм), концентрирующиеся преимущественно в растворе. Щелочные металлы обладают высокой растворимостью в воде и относятся к главным катионам природных вод. Zn и Cd являются одними из наиболее подвижных среди микроэлементов в условиях северных ландшафтов, в том числе в снежном покрове. Вторая группа, представленная Co (28), Mn (36), Pb (30), Cu (36), V (6,5) и Fe (2,2), накапливается преимущественно в минеральной фазе. Особенно это выражено у Fe, представленного в пыли оксидами, сульфидами и самородной формой. Элементы третьей группы – K (44), Ni (44), Sr (52) и Ba (53) – имеют примерно равное соотношение фаз раствор / взвесь. Для щелочных металлов группы

причиной такого распределения является высокая растворимость в пресной воде. Никель, возможно, адсорбирован на тонкой взвеси и при таянии в слабнокислой среде переходит в раствор.

Исследователями неоднократно отмечалось, что в городских условиях по отношению к нарушенным и фоновым ландшафтам, находящимся за пределами урбанизированных территорий, доля растворенных форм снижается [Pozhitkov et al., 2020; Vlasov et al., 2020; Moskovchenko et al., 2021]. Та же закономерность наблюдается в пределах исследуемого района (рис. 4). Это объясняется более высоким уровнем загрязнения снежного покрова в городе твердыми частицами, а также нейтральной реакцией талой воды, которая ограничивает переход в раствор как катионогенных, так и анионогенных металлов. Существенная роль pH талой воды в агрегатном состоянии металлов показана в работах [Vlasov et al., 2020; Опекунов и др., 2021] на примере разнообразных ландшафтно-геохимических обстановок. Зависимость подвижности элементов от величины pH отмечена в результатах корреляционного анализа его значений и доли подвижных форм ($p = 0,05$; $r_{кр} = 0,31$). Снижение коэффициента корреляции (r) отображено в ряду: Pb (0,78) > Ca (0,75) > Zn (0,73) > Co (0,67) > Mn (0,64) > Cr (0,60) > Ni (0,59) > Fe (0,51) > Cd (0,50) > K (0,50) > V (0,49) > Na (0,40) > Cu (0,34) > Ba (0,33) > Sr (0,32). Все r имеют отрицательный знак, указывающий на относительный рост подвижности металлов по мере снижения величины pH снега, т. е. при подкислении среды.

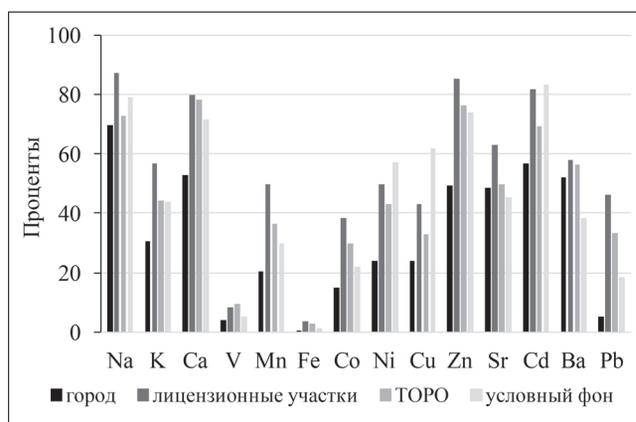


Рис. 4. Доля растворенных форм металлов в снежном покрове антропогенно нарушенных и условно-фоновых территорий

Fig. 4. Percentage of dissolved forms of metals in snow cover of anthropogenically disturbed and background territories

Величина ионной нагрузки на территории изменяется от 628 (условный фон) до 5817 мг/м²·сут (ТОПО) (см. табл. 2). Ее максимальное значение от-

мечено в городе, а за его пределами нагрузка снижается до минимальных значений на условно-фоновых участках. Изменение в величине ионной нагрузки обусловлено в основном содержанием Са, вклад которого составляет от 22% на условно-фоновой территории до 90% в городе. При этом ионная нагрузка везде (за исключением города) выше, чем металлическая, что еще раз подчеркивает ведущую роль растворенных форм металлов по отношению к их твердой фазе в снежном покрове вне городской среды.

Основные источники загрязнения атмосферного воздуха металлами. С использованием ФА МГК проведено изучение закономерностей распределения металлов в твердофазном веществе. Наибольший интерес представляют первые три компоненты, описывающие 72,6% общей дисперсии

выборки (табл. 3). Первый фактор включает 45% изменчивости исходных признаков. Он отражает накопление металлов (за исключением Са) на участках гетерогенного загрязнения, к которым, в первую очередь, относятся санитарно-защитные зоны (СЗЗ) объектов размещения отходов, а также отдельные площади городской застройки и лицензионных участков. Элементы, имеющие отрицательные нагрузки на первый фактор, не образуют единый парагенезис, что вызвано разнообразием источников их поступления в атмосферный воздух (рис. 5). Внутри этой группы по силе корреляционных связей можно выделить три основных ассоциации: Fe–Mn–V–Co, Ba–Sr–K–Na, Cd–Cu–Pb–Zn. Максимальные значения нагрузок на эту компоненту имеет первая ассоциация, минимальные – последняя.

Таблица 3

Матрица факторных нагрузок химического состава пыли ($p = 0,05$; $r_{кр} = 0,31$)

Переменная	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
Na	-0,82	-0,19	-0,27
K	-0,77	-0,31	-0,37
Ca	-0,10	0,72	0,26
V	-0,79	0,43	0,13
Mn	-0,84	0,37	0,10
Fe	-0,91	0,12	0,18
Co	-0,78	0,45	0,24
Ni	-0,33	0,11	0,47
Cu	-0,35	-0,55	0,51
Zn	-0,73	-0,27	0,10
Sr	-0,85	0,14	-0,45
Cd	-0,43	-0,56	0,44
Ba	-0,50	-0,08	-0,67
Pb	-0,59	-0,47	0,13
Вес, %	45,0	15,2	12,4

Второй фактор (вес 15,2%) представлен двумя ассоциациями: Ca–Co–V–Mn, характерной для городской пыли, и Cd–Cu–Pb, типоморфной для твердофазного вещества в СЗЗ полигонов захоронения отходов. Накопление Са в снегу на территории г. Новый Уренгой (первая ассоциация), как указывалось ранее, вызвано использованием при строительстве известковистых материалов. Источником поступления в снег входящих в эту ассоциацию Co, V и Mn в основном является автотранспорт при износе трущихся деталей (Co) и покрышек (Co, Mn), а также при эксплуатационном разрушении покрытия дорог (V) [Касимов и др., 2012; Леванчук, 2014]. Вторая ассоциация, представленная халькофилами,

широко распространена в снежном покрове объектов размещения отходов. Поступление металлов на поверхность происходит в составе образующейся при перемещении и захоронении отходов мелкодисперсной пыли, а также в выбросах дизельных (Cd) и бензиновых (Pb) двигателей.

Третья компонента (вес 12,4%) описывается двумя ассоциациями (см. табл. 3). Первая Ba–Sr–K–Na (отрицательные значения фактора) отражает накопление в снегу барита (Ba и Sr) и сопутствующих глинистых минералов (K и Na) в санитарно-защитных зонах ТОРО г. Новый Уренгой. В отличие от ассоциации халькофилов (II фактор) этот парагенезис характеризует воздействие производств, не свя-

занных напрямую с захоронением отходов. Альтернативная ассоциация Cu–Ni–Cd (положительные значения) оценивается как универсальная для всех изученных ландшафтов. Металлы при высокой нагрузке на фактор имеют слабую корреляционную связь между собой, что указывает на разные источники эмиссии в атмосферный воздух. Вероятно, их появление в городской среде вызвано автотранспортом: износ покрышек (Cu, Ni, Cd), тормозов, трущихся деталей (Cu, Ni) и дорожного покрытия [Леванчук, 2014]. Для выявления других источников этих металлов необходимо обратить внимание на особенность химического состава пыли: высокое содержание Ni, Cu, Zn, что характерно не только для антропогенно нарушенных территорий, но и для участков, не подверженных загрязнению. Их концентрация более чем на порядок выше фонового содержания металлов в почвах севера Западной Сибири и в несколько раз превосходит концентрации в почвообразующих породах этого региона [Орекунова et al., 2019]. Еще одна особенность – большое количество пирита в виде обломков кристаллов и рассеянной пыли в пробах 26 и 31, т. е. в восточной части изученной территории. Ближайшим источником сульфидов являются медно-никелевые руды Норильских месторождений, расстояние до которых от восточной границы района отбора проб менее 550 км. Выбросы комбината, пыление при добыче и транспортировке, дробление руды и дефляция отходов горного производства становятся причиной вовлечения металлов в атмосферный перенос. Среди основных металлов, поступающих с эмиссиями комбината, рассматриваются Ni, Cu и Co [Журкатов и др., 2015]. Пирит, вовлекаемый в воздушные потоки, вероятно, представлен в основном вторичными (бактериальными) формами, образующимися в отвалах, которые насыщены серой и железом.

В качестве обоснования высказанного предположения о техногенном источнике пирита, а также адсорбированных и минеральных формах Ni, Cu, Zn было проведено сравнение среднего содержания этих металлов в твердой фазе снежного покрова на восточном ($n = 10$) и западном ($n = 6$) участках района исследований. В снежном покрове восточного участка наблюдаются более высокие по сравнению с западным концентрации Ni (54,5 и 35,6 мг/кг) и Zn (449 и 275 мг/кг). Содержание Cu практически не меняется (167 и 170 мг/кг). Есть увеличение концентрации Co (7,39 и 5,26 мг/кг). Доказательством влияния Норильского промышленного района (НПР) на восточную часть ЯНАО служат данные из работ [Moskovchenko et al., 2021; Pozhitkov et al., 2020], выполненных одним коллективом. В первой статье дано содержание металлов в твердой фазе снежного покрова (в пересчете на талую воду) на фоновых

участках вблизи г. Тюмень, во второй – фоновые содержания в районе Заполярного газового месторождения, т. е. северо-восточнее района наших исследований. Фоновое медианное содержание Ni на лицензионном участке Заполярного месторождения превышает фон в районе г. Тюмени в 2,6 раза, Cu – в 14,6, Zn – в 5,0 раз. Когда речь идет о фоновых содержаниях, такое расхождение сложно объяснить гидрометеорологическими условиями (более высокие снеготолщины на севере могут приводить только к разбавлению концентрации металлов) или геологическим фактором (везде платформенный тип строения территории), но это хорошо укладывается в высказанную выше гипотезу о воздействии НПР. Нужно отметить, что влияние выбросов Норильского комбината на водосбор р. Оби отмечалось и раньше по результатам моделирования воздушных масс над территорией Сибири [Виноградова и др., 2009].

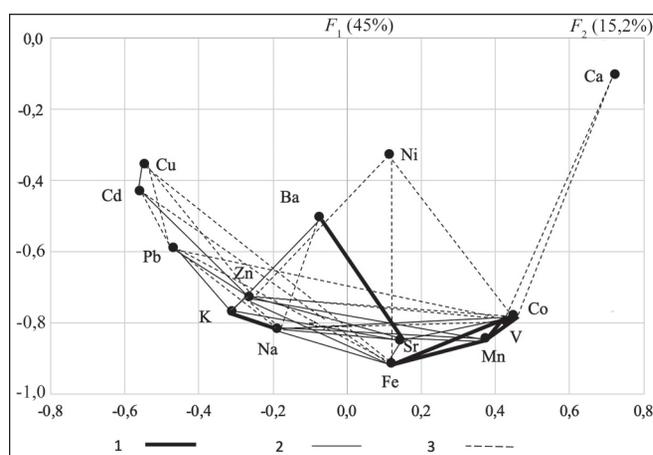


Рис. 5. Факторная структура химического состава пыли в координатах первых двух факторов.

Корреляционные связи: 1 – сильные (коэффициент корреляции $>0,75$); 2 – средние (0,5–0,75); 3 – слабые (0,31–0,5)

Fig. 5. Factor structure of the chemical composition of dust within the coordinates of the first two factors.

Correlation: 1 – strong ($CC > 0,75$); 2 – medium (0,5–0,75); 3 – weak (0,31–0,5)

Заканчивая рассмотрение особенностей распределения изученных элементов в снежном покрове, целесообразно вернуться к результатам ФА МГК (см. табл. 3). Положительные нагрузки на III фактор имеет не только приведенная выше ассоциация Cu–Ni–Cd, но также Co и Zn, хотя и с незначимыми величинами. Тем не менее есть основание считать, что эта группа элементов может отражать процесс поступления и концентрации тонкодисперсной пыли из НПР.

Оценка влияния азротехногенного загрязнения на почвы. Сравнение содержания металлов в твердофазном веществе с кларком в земной коре показыва-

ло существенное превышение кларка Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, а в СЗЗ ТОРО – Ba, что указывает на возможное влияние аэротехногенного переноса на почвенный покров и экологические риски возникновения биологических эффектов.

Потенциальная токсичность твердой фазы, учитывая высокое содержание в них металлов, оценена по индексу вероятности токсичности (MERMQ). В расчет включены Ni, Cu, Zn, Cd, Pb и Ba. Однако величина ERM бария в [Long et al., 1995] отсутствует, так как изученность металла в этом отношении является крайне низкой [Водяницкий, 2012]. Ориентировочно это значение можно принять равным 2800 мг/кг по работе [Derivation..., 2007], в которой анализируются европейские подходы к оценке экологических рисков при загрязнении почв.

Полученные результаты (рис. 6) свидетельствуют, что практически все пробы в пределах городской и условно-фоновой территорий соответствуют зоне среднего уровня риска. Здесь для некоторых проб наблюдается превышение уровня ERM по Cu и Zn. На лицензионных участках чуть меньше 40% проб лежат в зоне высокого риска, остальные характеризуются средним риском. Вероятная токсичность пыли определяется в основном Ni, Cu и Zn. Наиболее опасна твердая фаза в СЗЗ ТОРО. В зоне высокого риска находится 60% проб, 20% проб относится к среднему и столько же к очень высокому рискам проявления токсичности. Вероятность биологических эффектов (токсичности проб) в указанных градациях составляет 49, 21 и 76% соответственно [Gao, Chen 2012], что обусловлено превышением величины ERM Ni, Cu, Pb и особенно Ba и Zn.

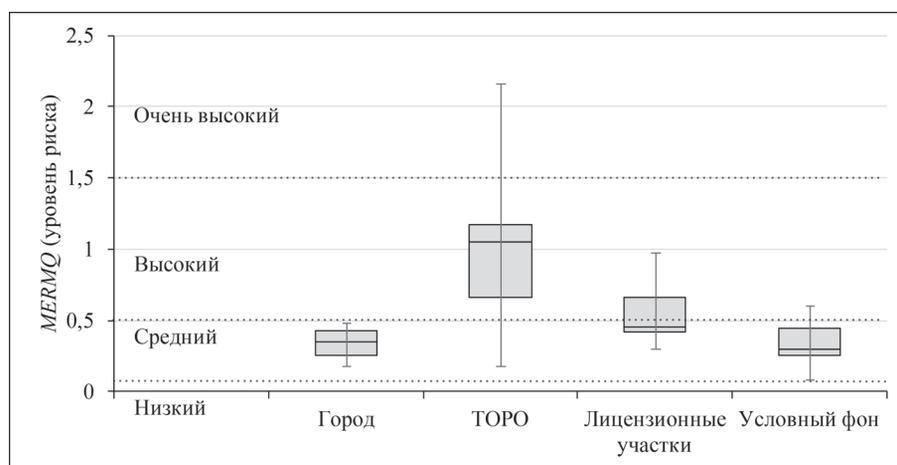


Рис. 6. Индекс вероятности токсичности (уровень риска) твердофазного вещества в снежном покрове антропогенно нарушенных и условно-фоновых территорий (пунктирные линии – границы зон риска)

Fig. 6. Index of probable toxicity (risk level) of solid matter in snow cover of anthropogenically disturbed and background territories (dashed lines – the boundaries of risk zones)

Однако сравнение содержания этих металлов в почвах в точках отбора проб снега показывает отсутствие выраженного эффекта воздействия аэротехногенного загрязнения. Так, медианы содержания Ni, Cu, Zn, Cd и Pb в органическом горизонте соответственно составляют 9,1, 9,29, 28,5, 0,18 и 12,6 мг/кг, в горизонте В – 11,1, 7,21, 24,2, 0,040 и 9,45 мг/кг, что отвечает фоновому содержанию металлов в почвах севера Западной Сибири [Орекунова et al., 2019]. Загрязнение снежного покрова ТОРО г. Новый Уренгой Ba приводит к повышению его концентрации в поверхностном горизонте почв в два раза (до 442 мг/кг) по отношению к близлежащим участкам.

При обсуждении вопроса загрязнения почв талыми водами следует подчеркнуть, что ни одна из измеренных концентраций металлов в талой воде

не превышает ПДК для хозяйственно-питьевых вод (СанПиН 3685-21). Кроме того, концентрация металлов в почвенных водах, которые были отобраны на тех же участках, оказалась значительно более высокой в жидкой фазе почв по отношению к талой воде. В целом ряд снижения коэффициента обогащения (отношение содержания металлов в почвенных водах к талой воде) представляет следующую последовательность: Fe (285) > V (36) > Co (26) > Mn (17) > K (13) > Cd (12) > Zn (5,6) > Sr (5,4) > Cr (5,2) > Ni (3,7) > Pb (3,1) > Na (3,0) > Ba (2,4) > Ca (1,8) > Cu (1,5). Эти данные показывают, что талые воды не могут влиять на рост концентрации металлов в почвенных растворах. При этом кислая реакция почв препятствует переходу металлов в твердую фазу и накоплению в почвенных горизонтах. Последнее подтверждается выполненным ра-

нее сравнением содержания металлов в почве и в твердом веществе снежного покрова.

В целом, если допустить, что вынос металлов из атмосферы на земную поверхность идет относительно равномерно в течение всего года, то можно провести ориентировочные расчеты поступления металлов в почву с учетом снеготопавов (см. табл. 2). В среднем по изученным территориям для Cu эта величина составляет 1,6–3,0 мг/м²-год, Pb – 0,5–0,8, Ni – 0,4–0,9 и Zn – 10–17 мг/м²-год. Такое количество в условиях промывного режима (песчаные почвы), активного поверхностного стока (торфяники) и большой мощности сезонно талого слоя вряд ли приведет к росту концентрации металлов, что и отмечалось при сравнительном анализе содержания металлов в изученных пробах почв. Однако отмеченное повышение концентрации Ва в почвах СЗЗ ТОРО в два раза произошло в условиях кратковременного воздействия производства по утилизации буровых отходов при выпадении металла около 800 мг/м²-год при среднем значении 48 мг/м²-год.

ВЫВОДЫ

При изучении снежного покрова в пределах Надым-Пуровского междуречья установлены особенности химического состава твердых и жидких осадков на разных функционально используемых территориях. Наиболее высокий уровень загрязнения снега отмечен в СЗЗ ТОРО. Это связано с пылением отходов в процессе их транспортировки и складирования, а также с интенсивным движением автотранспорта. Снежный покров г. Новый Уренгой характеризуется максимальной пылевой нагрузкой, но относительно невысоким содержанием металлов, что обусловлено отсутствием крупных промышленных производств и использованием газовой генерации тепла и электроэнергии. Исключением является Са, который индицирует строитель-

ную отрасль и использование содержащих известь строительных материалов. Отмеченное в пределах ТОРО г. Новый Уренгой загрязнение Ва носит локальный характер и связано с производством по переработке буровых отходов. Автотранспорт оказывает влияние на химический состав снега, но оно не приводит к заметному загрязнению почв. На территории лицензионных участков выраженного загрязнения атмосферного воздуха, вызванного добычей газа и газоконденсата, не установлено. Выводы о преобладании в снежном покрове городов твердой фазы металлов и увеличение растворимых форм за пределами урбанизированной территории здесь получили подтверждение.

Риски загрязнения окружающей среды в результате аэротехногенного переноса на изученной территории связаны с высоким содержанием в пыли Zn, Cu, Ni, Pb и Ва. Некоторые пробы с ТОРО обладают высокой вероятностью биологических эффектов. Однако по полученным данным снежный покров на изученной территории не приводит к загрязнению почв. Исключением является Ва на отдельных участках СЗЗ ТОРО.

Исследования подтвердили влияние аэротехногенного переноса от Норильского промышленного района на водосбор р. Оби в пределах территории Надым-Пуровского междуречья, особенно в его восточной части. На это указывает высокое содержание в твердой фазе снега Zn, Cu, Ni, Pb и большое количество пирита в снеге восточной части изученного района.

Полученные результаты еще раз показали эффективность изучения снежного покрова как индикатора состояния атмосферного воздуха. Влияние даже небольшого производства, которое занимается переработкой буровых отходов, четко фиксируется по химическому и минералогическому составу твердофазного вещества.

Благодарность. Работа выполнена при поддержке гранта СПбГУ № 95439487.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виноградова А.А., Максименков Л.О., Погарский Ф.А. Изменения атмосферной циркуляции и загрязнения окружающей среды в Сибири от промышленных районов Норильска и Урала в начале XXI в. // *Оптика атмосферы и океана*. 2009. Т. 22. № 6. С. 527–534.
- Водяницкий Ю.Н. Экотоксикологическая оценка опасности тяжелых металлов и металлоидов в почве // *Агрохимия*. 2012. № 2. С. 75–84.
- Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Власов Д.В., Терская Е.В. Геохимия снежного покрова в восточном округе Москвы // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр.* 2012. № 4. С. 14–24.
- Куркатов С.В., Тихонова И.В., Иванова О.Ю. Оценка риска воздействия атмосферных загрязнений на здоровье населения г. Норильска // *Гигиена и санитария*. 2015. Т. 94. № 2. С. 28–31.
- Леванчук А.В. Загрязнение окружающей среды продуктами эксплуатационного износа автомобильно-дорожного комплекса // *Гигиена и санитария*. 2014. № 6. С. 17–21.
- Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г., Кукушкин С.Ю. и др. Минералого-геохимическая характеристика снежного покрова в районах горнорудного производства // *Геохимия*. 2021. Т. 66. № 7. С. 659–672.

- Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С.Ю., Арестова И.Ю. Оценка трансформации природной среды в районах разработки углеводородного сырья на севере Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2018. № 1. С. 122–138.
- Шевченко В.П., Воробьев С.Н., Кирпотин С.Н. и др. Исследование нерастворимых частиц в снежном покрове Западной Сибири на профиле от Томска до эстуария Оби // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 6. С. 499–504.
- Экогеохимия городских ландшафтов / под ред. Н.С. Касимова. М.: Изд-во МГУ, 1995. 336 с.
- Derivation methods of soil screening values in Europe*, A review and evaluation of national procedures towards harmonization, C. Carlon (ed.), European Commission, Joint Research Centre, Ispra, EUR 22805-EN, 2007, 306 p.
- Gao X., Chen C.T.A. Heavy metal pollution status in surface sediments of the coastal Bohai Bay, *Water Research*, 2012, vol. 46, p. 1901–1911.
- Kurbakov D.N., Kuznetsov V.K., Sidorova H.V. et al. Heavy metals in the snow cover in the area of the location of the Russian electrometallurgical plant LLC “NLMK-Kaluga”, *Journal of Physics: Conference Series 1701*, 2020, 012017, DOI: 10.1088/1742-6596/1701/1/012017.
- Lim J.-H., Sabin L.D., Schiff K.C. et al. Concentration, size distribution, and dry deposition rate of particle associated metals in the Los Angeles region, *Atmos. Environ.*, 2006, vol. 40, p. 7810–7823.
- Long E.R., Macdonald D.D., Smith S.L. et al. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments, *Environmental Management*, 1995, vol. 19, no. 1, p. 81–97.
- Moskovchenko D., Pozhitkov R., Zakharchenko A., Tigeev A. Concentrations of Major and Trace Elements within the Snowpack of Tyumen, Russia, *Minerals*, 2021, vol. 11(7), 709, DOI: 10.3390/min11070709.
- Opekunov A., Opekunova M., Kukushkin S., Lisenkov S. Impact of drilling waste pollution on land cover in a high subarctic forest-tundra zone, *Pedosphere*, 2022, vol. 32, no. 3, p. 414–425, DOI: 10.1016/S1002-0160(21)60083-8.
- Opekunova M., Opekunov A., Elskova E. et al. Comparative analysis of methods for air pollution assessing in the Arctic mining area, *Atmospheric Pollution Research*, 2020, vol. 12(1), p. 76–88, DOI: 10.1016/j.apr.2020.08.017.
- Opekunova M.G., Opekunov A.Yu., Kukushkin S.Yu., Ganul A.G. Background contents of heavy metals in soils and bottom sediments in the north of Western Siberia, *Eurasian Soil Science*, 2019, vol. 52, no. 4, p. 380–395, DOI: 10.1134/S106422931902011X.
- Pejman A., Gholamrez Nabi B., Saeedi M., Baghvanda A. A new index for assessing heavy metals contamination in sediments: A case study, *Ecological Indicators*, 2015, vol. 58, p. 365–373, DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.06.012.
- Peng H., Chen Y.L., Weng L.P. et al. Comparisons of heavy metal input inventory in agricultural soils in North and South China: A review, *Sci. Total Environ.*, 2019, vol. 660, p. 776–786, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.066.
- Pozhitkov R., Moskovchenko D., Soromotin A. et al. Trace elements composition of surface snow in the polar zone of northwestern Siberia: the impact of urban and industrial emissions, *Environ. Monit. Assess.*, 2020, vol. 192(4), Article number: 215, DOI: 10.1007/s10661-020-8179-4.
- Siudek P., Frankowski M., Siepak J. Trace element distribution in the snow cover from an urban area in central Poland, *Environ. Monit. Assess.*, 2015, vol. 187(5), Article number: 4446, DOI: 10.1007/s10661-015-4446-1.
- Vlasov D., Vasil'chuk J., Kosheleva N., Kasimov N. Dissolved and suspended forms of metals and metalloids in snow cover of megacity: Partitioning and deposition rates in western Moscow, *Atmosphere*, 2020, vol. 11, no. 9, p. 907, DOI: 10.3390/ATMOS11090907.
- Wang X., Pu W., Zhang X. et al. Water-soluble ions and trace elements in surface snow and their potential source regions across northeastern China, *Atmospheric Environment*, 2015, vol. 114, p. 57–65, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.05.012.
- Xue H., Chen W., Li M. et al. Assessment of major ions and trace elements in snow: A case study across northeastern China, 2017–2018, *Chemosphere*, 2020, vol. 251, Article number: 126328, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.126328.
- Yakovlev E., Druzhinina A., Zykova E. et al. Assessment of Heavy Metal Pollution of the Snow Cover of the Severodvinsk Industrial District (NW Russia), *Pollution*, 2022, vol. 8, no. 4, p. 1274–1293, DOI: 10.22059/POLL.2022.341500.1438.
- Zhang F., Meng B., Gao S. et al. Levels, Inventory, and Risk Assessment of Heavy Metals in Wetland Ecosystem, Northeast China: Implications for Snow Cover Monitoring, *Water*, 2021, vol. 13(16), Article number: 2161, DOI: 10.3390/w13162161.

Поступила в редакцию 24.03.2023

После доработки 15.09.2023

Принята к публикации 14.02.2024

MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL PARAMETERS OF SNOW COVER WITHIN THE ANTHROPOGENICALLY DISTURBED SITES OF THE NADYM-PUR INTERFLUVE (NORTHERN PART OF WESTERN SIBERIA)

A.Yu. Opekunov¹, M.G. Opekunova², S.Yu. Kukushkin³, S.Yu. Janson⁴

¹⁻³ Saint-Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Geoecology

⁴ Saint-Petersburg State University, Resource Center of Microscopy and Microanalysis

¹ Professor, D.Sc. in Geology and Mineralogy; e-mail: a_opekunov@mail.ru

² Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: m.opekunova@mail.ru

³ Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: stepic@yandex.ru

⁴ Deputy Director, Ph.D. in Geology and Mineralogy; e-mail: jansn.sv@gmail.com

The article analyzes the content of metals in solid aerosols and snow water sampled in the anthropogenically disturbed and background sites of the Nadym-Pur interfluve. The results of microscopic studies of solid aerosols showed the presence of secondary minerals, technogenic formations, as well as a large amount of pyrite in samples from the eastern part of the study area. The maximum concentrations of metals in solid aerosols were found in snow of the sanitary protection zones of waste disposal facilities, with the exception of Ca, which prevails in snow cover of Novy Urengoy (up to 10% of dry matter). The urbanized area is characterized by the highest values of dust load (up to 111 mg/m² a day). The local contamination with Ba within the waste landfills in Novy Urengoy is associated with the sites of barite and drilling waste processing. We applied the factor analysis to identify the main metal associations characteristic of solid aerosols from different functional zones: Ca–Co–V–Mn (city), Ba–Sr–K–Na and Cd–Cu–Pb (waste disposal sites), Cu–Ni–Cd (the entire studied area). Based on the study of the content of dissolved forms in snow water, a high mobility of metals in the northern landscapes and its decrease in urban environment were revealed. The mineralogical and geochemical analysis of snow suggests the influence of the Norilsk industrial region on the eastern part of the Nadym-Pur interfluve, Zn, Cu, Ni, Pb and the mineral pyrite being the indicators. The risks of environmental pollution under the aerotechnogenic transport are associated with high content of Zn, Cu, Ni, Pb and Ba in solid aerosols. The calculation of the Toxicity Probability Index (MERMQ) showed that some aerosol samples from the landfill sites have a high probability of biological effects. Using data on the chemical composition of soils and soil water, no visible effect of snow pollution on the growth of metal concentrations in soil and soil water was revealed, with the exception of local contamination with Ba, which led to a twofold increase in the content of the metal in the upper soil horizon.

Keywords: snow, snow water, solid aerosols, secondary minerals, metals, soil pollution

Acknowledgments. The research was financially supported by the Saint-Petersburg State University (research grant 95439487).

REFERENCES

- Derivation methods of soil screening values in Europe*, A review and evaluation of national procedures towards harmonization, C. Carlon (ed.), European Commission, Joint Research Centre, Ispra, EUR 22805-EN, 2007, 306 p.
- Ekogeohimiya gorodskih landshaftov* [Ecogeochemistry of urban landscapes], N.S. Kasimov (ed.), Moscow, Izd-vo MGU, 1995, 336 p. (In Russian)
- Gao X., Chen C.T.A. Heavy metal pollution status in surface sediments of the coastal Bohai Bay, *Water Research*, 2012, vol. 46, p. 1901–1911.
- Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Vlasov D.V., Terskaya E.V. Geohimiya snezhnogo pokrova v vostochnom okruge Moskvy [Geochemistry of snow cover within the Eastern district of Moscow], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2012, no. 4, p. 14–24 (In Russian)
- Kurbakov D.N., Kuznetsov V.K., Sidorova H.V. et al. Heavy metals in the snow cover in the area of the location of the Russian electrometallurgical plant LLC “NLMK-Kaluga”, *Journal of Physics: Conference Series 1701*, 2020, 012017, DOI:10.1088/1742-6596/1701/1/012017.
- Kurkatov S.V., Tihonova I.V., Ivanova O.Yu. Ocenka riska vozdejstviya atmosferyh zagryaznenij na zdorov’e naseleniya g. Noril’ska [Assessment of the risk of environmental atmospheric pollutants for the health of the population of the city of Norilsk], *Gigiena i sanitariya*, 2015, vol. 94, no. 2, p. 28–31. (In Russian)
- Levanchuk A.V. Zagryaznenie okruzhayushchej sredy produktami ekspluatacionnogo iznosa avtomobil’no-dorozhnogo kompleksa [Environmental pollution by products of wear and tear automobile-road complex], *Gigiena i sanitariya*, 2014, no. 6, p. 17–21. (In Russian)
- Lim J.-H., Sabin L.D., Schiff K.C., Stolzenbach K.D. Concentration, size distribution, and dry deposition rate of particle-associated metals in the Los Angeles region, *Atmos. Environ*, 2006, vol. 40, p. 7810–7823.
- Long E.R., Macdonald D.D., Smith S.L., Calder F.D. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments, *Environmental Management*, 1995, vol. 19, no. 1, p. 81–97.

- Moskovchenko D., Pozhitkov R., Zakharchenko A., Tigeev A. Concentrations of Major and Trace Elements within the Snowpack of Tyumen, Russia, *Minerals*, 2021, vol. 11, 709, DOI: 10.3390/min11070709.
- Opekunov A., Opekunova M., Kukushkin S., Lisenkov S. Impact of drilling waste pollution on land cover in a high subarctic forest-tundra zone, *Pedosphere*, 2022, vol. 32, no. 3, p. 414–425.
- Opekunov A.Y., Opekunova M.G., Kukushkin S.Y. et al. Mineralogical-geochemical characteristics of the snow cover in areas with mining and ore-processing facilities, *Geochemistry International*, 2021, 59(7), p. 711–724.
- Opekunova M., Opekunov A., Elsukova E. et al. Comparative analysis of methods for air pollution assessing in the Arctic mining area, *Atmospheric Pollution Research*, 2020, p. 76–88.
- Opekunova M.G., Opekunov A.Yu., Kukushkin S.Yu., Arestova I.Yu. Evaluation of Environmental Transformation in Areas of Hydrocarbon Deposits in the North of Western Siberia, *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, vol. 11, no. 1, p. 99–110.
- Opekunova M.G., Opekunov A.Yu., Kukushkin S.Yu., Ganul A.G. Background Contents of Heavy Metals in Soils and Bottom Sediments in the North of Western Siberia, *Eurasian Soil Science*, 2019, vol. 52, no. 4, p. 380–395.
- Pejman A., Gholamrez Nabi B., Saeedi M., Baghvanda A. A new index for assessing heavy metals contamination in sediments: A case study, *Ecological Indicators*, 2015, vol. 58, p. 365–373.
- Peng H., Chen Y.L., Weng L.P. et al. Comparisons of heavy metal input inventory in agricultural soils in North and South China: A review, *Sci. Total Environ*, 2019, vol. 660, p. 776–786.
- Pozhitkov R., Moskovchenko D., Soromotin A. et al. Trace elements composition of surface snow in the polar zone of northwestern Siberia: the impact of urban and industrial emissions, *Environ Monit Assess*, 2020, vol. 192, Article number: 215, DOI: 10.1007/s10661-020-8179-4.
- Shevchenko V.P., Vorob'yov S.N., Kirpotin S.N. et al. Issledovanie nerastvorimyh chastic v snezhnom pokrove Zapadnoj Sibiri na profile ot Tomaska do estuariya Obi [Investigations of insoluble particles in the snow cover of the Western Siberia from Tomsk to the Ob estuary], *Optika atmosfery i okeana*, 2015, vol. 28, no. 6, p. 499–504. (In Russian)
- Siudek P., Frankowski M., Siepak J. Trace element distribution in the snow cover from an urban area in central Poland, *Environ Monit Assess*, 2015, vol. 187, Article number: 225, DOI: 10.1007/s10661-015-4446-1.
- Vinogradova A.A., Maksimenkov L.O., Pogarskij F.A. Izmeneniya atmosfernoj cirkulyacii i zagryazneniya okruzhayushchej sredy v Sibiri ot promyshlennyh rajonov Noril'ska i Urala v nachale XXI v. [Changes of atmospheric circulation and environmental pollution in Siberia from the industry of the Norilsk and Ural regions at the beginning of the 21st century], *Optika atmosfery i okeana*, 2009, vol. 22, no. 6, p. 527–534. (In Russian)
- Vlasov D., Vasil'chuk J., Kosheleva N., Kasimov N. Dissolved and suspended forms of metals and metalloids in snow cover of megacity: Partitioning and deposition rates in western Moscow, *Atmosphere*, 2020, vol. 11, no. 9, p. 907, DOI 10.3390/ATMOS11090907.
- Vodyanickij Yu.N. Ekotoksikologicheskaya ocenka opasnosti tyazhelyh metallov i metalloidov v pochve [Assessment of the ecotoxicological hazard of heavy metals and metalloids in the soil], *Agrohimiya*, 2012, no. 2, p. 75–84. (In Russian)
- Wang X., Pu W., Zhang X. et al. Water-soluble ions and trace elements in surface snow and their potential source regions across northeastern China, *Atmospheric Environment*, 2015, vol. 114, p. 57–65, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.05.012.
- Xue H., Chen W., Li M. et al. Assessment of major ions and trace elements in snow: A case study across northeastern China, 2017–2018, *Chemosphere*, 2020, vol. 251, Article number: 126328, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.126328.
- Yakovlev E., Druzhinina A., Zykova E., Zykova S., Ivanchenko N. Assessment of Heavy Metal Pollution of the Snow Cover of the Severodvinsk Industrial District (NW Russia), *Pollution*, 2022, vol. 8, no. 4, p. 1274–1293, DOI: 10.22059/POLL.2022.341500.1438.
- Zhang F., Meng B., Gao S. et al. Levels, Inventory, and Risk Assessment of Heavy Metals in Wetland Ecosystem, Northeast China: Implications for Snow Cover Monitoring, *Water*, 2021, vol. 13, Article number: 2161, DOI: 10.3390/w13162161.

Received 24.03.2023

Revised 15.09.2023

Accepted 14.02.2024

АДАПТАЦИЯ ЗЕМЛЕДЕЛЬЧЕСКОГО ПРОЕКТА К РЕГУЛИРОВАНИЮ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

Д.И. Ковбашин¹, Н.М. Светлов², Н.М. Дронин³

^{1,3} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
кафедра физической географии мира и геоэкологии*

² *Всероссийский институт аграрных проблем и информатики имени А.А. Никонова, филиал ФНЦ ВНИИЭСХ*

¹ *Аспирант; e-mail: kovbashin_daniil@mail.ru*

² *Проф., д-р экон. наук, чл.-корр. РАН; e-mail: svetlov@viapi.ru*

³ *Зав. лабораторией, канд. геогр. наук; e-mail: ndrionin@gmail.com*

С использованием авторского методического подхода проведен модельный анализ адаптации земельного проекта к регулированию выбросов парниковых газов с сельскохозяйственных угодий на примере хозяйств юга России. Учтены выбросы, обусловленные как технологическими, так и экосистемными процессами. Методы исследования операций и имитационного моделирования применены к изучению двух вариантов регулирования эмиссии парниковых газов – за счет рыночных механизмов с ориентацией на стоимость карбоновых единиц в ЕС и путем административного контроля, при котором устанавливаются предельные уровни эмиссии. Для каждого из вариантов определены оптимальные уровни интенсивности использования каждого из земельных участков, вовлеченных в проект. Разработанная методика дополняет научно-методическое обеспечение анализа сельскохозяйственных проектов, охватывающих большие территории, применительно к условиям государственного регулирования влияния хозяйственной деятельности на климат планеты. Она применима к проектам, отличающимся значительным пространственным разбросом участков. В результате проведенного исследования уточнены научные положения о влиянии климатической политики на технологический облик производства сельскохозяйственной продукции: выявлен значительный запас устойчивости земледелия в условиях юга России к рыночным методам регулирования выбросов парниковых газов; показано, что по мере ужесточения ограничительных мер климатической политики наилучшим решением чаще всего оказывается прекращение продуктивного использования участков с наибольшим потенциалом продуктивности при сохранении максимальной интенсивности производства на остальных. Совокупность полученных результатов рекомендуется к применению в практике разработки и анализа инвестиционных сельскохозяйственных проектов, в том числе анализа проектных рисков, а также при совершенствовании государственной природоохранной и климатической политики в составе инструментария анализа ее последствий.

Ключевые слова: климатическая политика, адаптация землепользования, модель DNDC, растениеводство, сельскохозяйственный проект, Ставропольский край, Республика Калмыкия

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.3

ВВЕДЕНИЕ

Сельское хозяйство не является главным источником выбросов парниковых газов (ПГ) в России. Согласно национальному докладу секретариату Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (РКИК ООН), суммарные выбросы ПГ от аграрного сектора Российской Федерации составили 116,64 млн т CO₂-экв, или 5,7% от общих выбросов ПГ в стране (2051,4 млн т), снизившись на 52,9% к уровню 1990 г. (247,5 млн т) [Национальный доклад..., 2022]. Большое снижение выбросов ПГ в аграрном секторе страны связано с сокращением поголовья сельскохозяйственных животных, посевных площадей и внесения минеральных удобрений. В целом поголовье скота сократилось почти в 2,4 раза, птицы – на 16,7% по

сравнению с уровнем 1990 г., и только в последние пять лет наметилась смена этого тренда. Площадь земель, используемых для нужд сельского хозяйства России, после 1990 г. уменьшилась на 40,3 млн га, или 30,4%, и этот тренд на сокращение посевных площадей продолжался вплоть до 2005–2006 гг., но и процесс восстановления посевных площадей нигде не имеет устойчивый характер [Нефедова, Мкртчян, 2017; Ковбашин, Дронин, 2023]. Внесение минеральных азотных удобрений снизилось на 54,9%, и этот тренд наблюдался также до 2005–2006 гг., когда наметился некоторый рост внесения минеральных азотных удобрений. Но общий объем выбросов ПГ от сельского хозяйства практически не изменился с 2000 г., когда он составлял 118,9 млн т CO₂-экв.

На международном уровне выдвигаются ряд инициатив, направленных на более активное управление выбросами ПГ с сельскохозяйственных угодий. Статьи 3.3 и 3.4 РККК ООН предусматривают, что при расчете баланса выбросов парниковых газов (ПГ) в стране будет учитываться дополнительное связывание углерода в почвах в результате реализации специальных мер в области управления землепользованием. На Парижской конференции по климату (COP 21) в 2015 г. была предложена программа добровольных действий «Инициатива 4 на 1000: почвы для продовольственной безопасности и климата», которая была призвана способствовать решению трехуровневой проблемы: продовольственной безопасности, адаптации аграрного сектора к изменению климата и смягчения последствий выбросов парниковых газов [Soussana et al., 2019]. Эта инициатива предусматривает увеличение фиксации углерода в почвах с помощью почвозащитных способов ведения сельского хозяйства. Глобальные модели показывают, что увеличение содержания органического углерода в обрабатываемых почвах на 4% в год позволит компенсировать все выбросы парниковых газов, связанные с сельским хозяйством, обеспечивая при этом поддержание плодородия почв [Minasny et al., 2019].

В связи с этой инициативой огромные площади российских сельскохозяйственных угодий, даже неиспользуемых, обещают стать важным конкурентным преимуществом страны. Потенциал консервации углерода в почвах сельхозугодий России имеет всемирное значение. В связи с этим актуально изучение вариантов климатической политики, направленных на сокращение эмиссии ПГ, а в контексте проактивного управления рисками агробизнеса – оценка возможностей адаптации землепользования к наиболее вероятным вариантам этой политики и ожидаемых последствий адаптационных мероприятий.

В данной работе проводится модельный анализ адаптации земельного проекта к регулированию выбросов ПГ с сельскохозяйственных угодий на примере хозяйств юга России. Изучается два варианта регулирования эмиссии ПГ – за счет рыночных механизмов с ориентацией на стоимость карбоновых единиц в ЕС и путем административного контроля, при котором устанавливаются уровни обязательного снижения эмиссии в течение года. В первом случае определяется, при какой стоимости на углеродные единицы у фермеров появляются экономические стимулы к переходу на менее интенсивные формы земледелия. Во втором – каков уровень снижения выбросов ПГ, при котором фермер еще сохраняет экономическую мотивацию к производству своей продукции в условиях снижения интенсивности использования земель.

Целью исследования является углубленный анализ инвестиционного земельного проекта, охватывающего земельные участки сельскохозяйственного назначения, расположенные в Ставропольском крае и Республике Калмыкия, общей площадью 30,6 тыс. га. Учитывая перспективы изменений в климатической политике как на федеральном, так и на региональном уровне, для принятия решения о судьбе проекта (осуществить; доработать; отклонить) необходимо понимание того, каким окажется облик бизнеса на вовлекаемых в проект земельных участках при тех или иных изменениях. Если изменения будут направлены на сокращение эмиссии парниковых газов по сравнению с уровнем, предусмотренным тем технологическим решением, которое заложено в проект его разработчиками, то на всех или некоторых участках придется вводить альтернативные технологические решения, а если это невозможно, то выводить из проекта некоторые или все участки.

Участки, вовлеченные в проект, распределены по трем массивам (рис.). Первый массив общей площадью 12 569 га находится в центральной части Буденновского района Ставропольского края. Поскольку главный фактор, лимитирующий урожайность в этом районе, – недостаток влаги, основной принцип проектирования агротехнологий в этой агроклиматической зоне – это сбережение влаги в почве. Озимая пшеница здесь выращивается после паров, и после ее уборки поле снова уходит под пар. Проектная урожайность в данном районе 5 т/га после пара. Второй массив находится северней в Арзгирском районе Ставропольского края. Он занимает 12 163 га. Здесь озимая пшеница, согласно проекту, выращивается без использования пара, а ее средняя урожайность составит 3,5 т/га. Третий массив общей площадью 5900 га находится в Ики-Бурульском районе Калмыкии. Здесь озимая пшеница выращивается после паров, проектная урожайность составляет 2 т/га. Характеристики погодных условий на этих массивах, необходимые для расчета баланса ПГ, включают среднесуточные температуры и осадки по двум метеостанциям – Буденновска и Элисты [Специализированные..., 2023] за период 2010–2022 гг. Особенности, определяющие различия в выбросах ПГ, продиктованы технологией возделывания и характеристиками почв, в первую очередь различным содержанием гумуса по подтипам каштановых почв и долей глинистой фракции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенная оценка последствий регулирования выбросов ПГ для земельного проекта на территории Ставропольского края и Республики Калмыкия основывается на новой числовой эко-

номико-математической модели оптимального использования сельскохозяйственных угодий, относящейся по назначению к классу задач исследования операций, по используемому математическому аппарату – к классу задач целочисленного программирования, и на существующей имитационной модели эмиссии ПГ (модель DNDC), откалиброванной применительно к исследуемому объекту. Особенность модели оптимального землепользования, отличающая ее от моделей либо субмоделей опти-

мальной производственной структуры или производственной программы растениеводства [Математическое..., 1990; Применение математических..., 2020; Svetlov, 2020], состоит в том, что искомым в ней является не вектор посевных площадей, а отображение множества земельных участков на множество технологий землепользования (в частном случае – на множество агротехнологий). В этом отношении такая модель родственна задачам о назначении [Акоф, Сасиени, 1971].



Рис. Расположение участков исследованного хозяйства

Fig. Location of plots of the studied farm

В экономико-математической задаче моделирования оптимального землепользования даны площади земельных участков; чистые приведенные стоимости операционного денежного потока (без учета платежей за эмиссию парниковых газов) и объемы эмиссии парниковых газов (в пересчете на

CO_2), порождаемой каждым участком при использовании каждой технологии из конечного дискретного множества доступных технологий; цена эмиссии парниковых газов (также в пересчете на CO_2); требования к минимальным и (или) максимальным площадям земельных участков, на которых ис-

пользуется та или иная технология; лимит эмиссии парниковых газов (в эквиваленте CO_2). Требуется отыскать распределение земельных участков между доступными технологиями, максимизирующее операционный денежный поток инвестиционного земельного проекта при следующих условиях:

- на каждом участке может использоваться только одна технология;
- суммарная площадь применения каждой технологии должна находиться в границах, установленных нормами государственного регулирования;
- суммарная эмиссия парниковых газов (в пересчете на CO_2) не должна превосходить объем, установленный государственным регулированием;
- суммарный дисконтированный операционный денежный поток проекта за период его жизненного цикла с учетом платежей за выброс парниковых газов по установленной цене должен достигать максимально возможного значения.

В зависимости от целей моделирования условия государственного регулирования и цена эмиссии парниковых газов, используемые при составлении числовой модели, могут быть фактическими, прогнозными или сценарными.

Вышеприведенной постановке соответствует задача целочисленного программирования, сформулированная ниже.

Множества: S – земельных участков, T – технологий.

Параметры: a_s – площадь земельного участка $s \in S$; f_{st} – чистая приведенная стоимость операционного денежного потока (без учета платежей за эмиссию парниковых газов), порождаемого участком $s \in S$ при использовании технологии $t \in T$; e_{st} – эмиссия парниковых газов (в эквиваленте CO_2) с участка $s \in S$ при использовании технологии $t \in T$; c – размер платы за единичный объем эмиссии парниковых газов (в эквиваленте CO_2); \underline{m}_t и \bar{m}_t – наименьшая и наибольшая площадь под технологией $t \in T$, разрешенная условиями государственного регулирования; b – максимальная эмиссия парниковых газов, допускаемая условиями государственного регулирования.

Переменные: $x_{st} \in \{0; 1\}$ – переменная, равная 1 в случае назначения технологии $t \in T$, на участок $s \in S$.

Уравнения и неравенства: $\sum_{t \in T} x_{st} = 1, s \in S$ – единственность технологии, применяемой на каждом участке; $\underline{m}_t \leq \sum_{s \in S} a_s x_{st} \leq \bar{m}_t, t \in T$ – соответствие площади, охваченной технологией t , условиям государственного регулирования (при отсутствии таковых выбираются значения $\underline{m}_t = 0, \bar{m}_t = \sum_{s \in S} a_s$); $\sum_{t \in T} e_{st} x_{st} \leq b$ – соответствие эмиссии парниковых газов требованиям государственного регулирования (при отсутствии таковых b принимается равным $\sum_{s \in S} (a_s \max_{t \in T} (e_{st}))$).

Целевая функция: $(\sum_{s \in S, t \in T} f_{st} x_{st}) - c \sum_{s \in S, t \in T} e_{st} x_{st} \rightarrow \max$.

Экономико-математическая модель, сформулированная выше, использована для анализа инвестиционного земельного проекта, о котором сказано во введении. Дисконтированная стоимость чистого операционного денежного потока проекта за время его жизненного цикла (15 лет) при норме дисконтирования 15% годовых составляет 4,698 млрд р. В части стоимостных показателей информационная база модели оптимального землепользования в приложении к этому объекту формируется с использованием модели денежных потоков (МДП) проекта, созданной его разработчиками. МДП рассчитывает стандартный набор показателей его эффекта и эффективности [Методические рекомендации..., 2004], включая приведенную стоимость чистого операционного денежного потока. Имеется возможность применить МДП для построения зависимости этого и других показателей от урожайности культур, производство которых предусмотрено проектом. В МДП отсутствует возможность выбора технологий для применения на каждом участке в отдельности и никак не учтена эмиссия парниковых газов. Исходные данные, необходимые для расчета ее годовых объемов за 2010–2020 гг. включительно, определены с помощью процессно-ориентированной имитационной модели DNDC (DeNitrification-DeComposition).

Данная модель рекомендуется Рамочной конвенцией ООН об изменении климата в качестве альтернативы методикам Межгосударственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (ФАО) также допускает использование этой модели для оценки эмиссии парниковых газов от сельского хозяйства. DNDC была апробирована для использования в России, а также настроена для корректного использования согласно исследованиям [Суховеева, 2018а, 2018б]. Расчеты производились в версии DNDC 9.5 [User's guide..., 2012].

Корректировки установленных параметров по умолчанию были проведены в соответствии с предложенными значениями в диссертации [Суховеева, 2018в]. Они касались параметров почвенного покрова, соотношений фракций биомассы сельскохозяйственных культур и требований сельскохозяйственных культур к внешним условиям.

Точные расчеты выбросов парниковых газов с участков возможны при наличии данных об урожайности на каждом из них. Такая статистика на участках, охваченных проектом, не собиралась, так как для этого нужна специализированная техника. В связи с этим принято допущение, согласно которому урожайность на участках, относящихся к одному и тому же массиву, одинакова, несмотря

на имеющиеся между ними различия в почвенном покрове. Еще одним ограничением является отсутствие информации о датах сева и уборки урожая по разным массивам. Поэтому данные параметры также приняты одинаковыми для всех участков.

Для целей моделирования землепользования мы вводим пять альтернативных технологий, отличающихся от проектной уровнями интенсивности использования участков (отношения среднегодовых валовых сборов каждой культуры к проектным валовым сборам приняты одинаковыми для всех культур, возделывание которых предусмотрено проектом). Для проектного сценария этот уровень равен 1, для альтернативных – 0,9; 0,75; 0,5; 0,249625; 0,01. Например, если уровень интенсивности равен 0,5, то в севообороте заданной площади площадь всех предусмотренных им культур сокращается вдвое, а высвобожденная площадь занимает либо сидеральными культурами, либо черным паром.

Поясним сделанный выбор. Главный фактор, лимитирующий урожайность полевых культур в этой зоне, – недостаток влаги, в связи с чем повышение интенсивности землепользования в сравнении с проектом чрезмерно капиталоемко (например, из-за затрат на содержание оросительных систем). Поэтому технологии, превосходящие по интенсивности существующую, в множество технологий, которые могут использоваться на участках, вовлеченных в проект, не включаются. Не включаются также технологии вывода земель из сельскохозяйственного оборота: например, предполагающие консервацию или заболачивание с целью захоронения углерода соответственно в почве или торфе, залесение с целью связывания атмосферного диоксида углерода в растительной биомассе лесного ценоза: их возможный положительный эффект проявится лишь за пределами длительности жизненного цикла проекта, а в его пределах их влияние на операционный денежный поток практически неотличимо от аналогичного влияния наименее интенсивной технологии. Значение интенсивности 0,249625, очень близкое к 0,25, представляет особый интерес в рамках проекта, поскольку оно обнулило бы приведенную стоимость операционного денежного потока, если бы соответствующая технология была распространена на все участки.

Основываясь на принятых решениях и доступных данных, мы определили параметры модели по следующим процедурам.

Рассчитали значения приведенной стоимости чистого операционного денежного потока для случаев, в которых какая-либо альтернативная технология занимает все участки проекта. Для этого использовали МДП, замещая в ней проектный выход продукции каждого вида с 1 га той же величиной,

умноженной на соответствующий уровень интенсивности.

Параметры f_{st} определили, распределив значения, рассчитанные на предыдущем шаге, по участкам пропорционально их проектной доле (известной) в выходе продукции полеводства.

Параметры e_{st} рассчитали условно, предположив, что наибольший фактически наблюдавшийся объем эмиссии парниковых газов за период, по которому имеются данные, соответствует проектному уровню интенсивности производства, а наименьший (в отдельных случаях он был отрицательным) – нулевой интенсивности (посевы сидератов). Для альтернативных технологий отсекали на этом интервале долю, равную соответствующему уровню интенсивности.

Параметры a_s известны из исходных данных. Значения остальных параметров определяются моделируемыми сценариями. Всего изучено 16 сценариев:

– девять сценариев ограничения объемов выбросов, в которых параметр b принимает значения от $0,9b_0$ до $0,1b_0$ с шагом $(-0,1b_0)$, где $b_0 = \sum_{s \in S} (a_s \max_{t \in T} (e_{st}))$. При этом $c = 0$, $\underline{m}_t = 0$, $\bar{m}_t = \sum_{s \in S} a_s$;

– семь сценариев платы за выбросы, в которых параметр принимает значения (в пересчете на рубль по курсу 84,91 р./евро) 800 и от 600 до 100 евро с шагом 100 евро, при этом $b = b_0$, $\underline{m}_t = 0$, $\bar{m}_t = \sum_{s \in S} a_s$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчеты эмиссии CO₂-экв. с исследуемых участков проводились для периода в 2010–2020 гг. в зависимости от типов почв, интенсивности производства (пар / не пар) и погодных условий (табл. 1). Наибольшие средние эмиссии CO₂ определены для посевов озимой пшеницы (без паров) на темно-каштановых мицелярно-карбонатных и каштановых мицелярно-карбонатных почвах на участках в Ставропольском крае – 4,95 и 4,52 т/га соответственно. Наименьшие – 0,79 т/га для посевов на бурых солонцеватых почвах и солонцах Калмыкии. Наибольшую эмиссию имеют участки с высокогумусированными почвами с тяжелым гранулометрическим составом. Секвестрация углерода в почве связана, главным образом, с илистой фракцией [Суховеева, 2018в]. Во время парования эмиссия ПГ значительно снижается, и в первые годы за счет паров происходит секвестрация углерода. Оставление под паром каждый год каштановых мицелярно-карбонатных почв на участках в Ставропольском крае снижает эмиссию ПГ посевов на 25%. При этом урожайность озимой пшеницы выше на 30%, чем на интенсивно (без пара) используемых участках. Снижение эмиссий CO₂ на 20% выявлено для посевов на светло-каштановых солонцеватых

и солончаковатых почвах в засушливых условиях Калмыкии, но при меньшей урожайности (на 17%) озимой пшеницы по сравнению с участком в Ставропольском крае.

Сценарные расчеты на модели оптимального землепользования выполнены с использованием инструментального средства GAMS версии 30.2, поддерживающего алгоритм CBC [Coin-or/Cbc..., 2023] версии 2.10, предназначенный для решения линейных задач целочисленного программирова-

ния методом ветвей и границ в сочетании с проекционным методом [Деменков, 2016] отыскания оптимальных решений задач линейного программирования. Числовая модель содержит 1170 целочисленных переменных, две вспомогательных неограниченных переменных, 203 уравнения и неравенства. Время решения числовой модели (без учета времени на формирование числовой модели и на вывод результатов решения) составляло порядка сотых долей секунды.

Таблица 1

Объемы эмиссии CO₂ (экв. кг/га) за период 2010–2020 гг.

Тип почв	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2010–2020
5 т/га пар каждый год – Буденновский район Ставропольского края												
Каштановые мицелярно-карбонатные (каштановые глубокие)	3581	–307	4249	327	4627	468	4794	495	4888	477	4951	28 550
Пойменные засоленные	2042	–1513	2522	–914	3007	–719	3247	–626	3385	–572	3478	13 337
3,5 т/га без пара – Арзгирский район Ставропольского края												
Темно-каштановые мицелярно-карбонатные (темно-каштановые глубокие)	5221	3561	4567	4920	5068	5142	5176	5198	5210	5216	5221	54 500
Каштановые мицелярно-карбонатные (каштановые глубокие)	3707	1864	2935	3365	3563	3673	3738	3787	3821	3848	3873	38 174
Светло-каштановые солонцеватые и солончаковатые и солонцы (автоморфные)	4071	2347	3462	3891	4094	4192	4249	4288	4310	4324	4335	43 563
2 т/га пар каждый год – Ики-Бурульский район Республики Калмыкия												
Светло-каштановые солонцеватые и солончаковатые	3538	1087	3345	1210	3156	1121	3056	1054	2987	1010	2931	24 495
Бурые солонцеватые и солонцы (автоморфные)	748	–319	631	–91	765	–12	838	34	888	58	914	4454
Солонцы луговые (гидроморфные)	2057	259	1814	454	1816	461	1803	453	1783	447	1761	13 108

В табл. 2 приводятся расчеты снижения интенсивности использования участков при разных лимитах углеродного налога, проведенные с использованием модели оптимального землепользования. В целом модель показывает большую чувствительность рассматриваемого инвестиционного проекта к административному регулированию эмиссий ПГ. Уже при лимите 0,9, чтобы обеспечить требуемое снижение выбросов на 10% по сравнению с базовым периодом, целесообразно будет перевести в пар или под сидераты весь участок площадью 3716 га светло-каштановых солонцеватых и солончаковатых почв в Калмыкии, но также и небольшой участок в 287 га наиболее плодородных темно-каштановых

почв в Ставропольском крае. При лимите выбросов 0,7 хозяйство будет вынуждено вывести из интенсивного оборота почти все участки (93%) с наиболее плодородными темно-каштановыми почвами в Ставропольской части хозяйства. Именно на этих участках окупаемость выбросов ПГ продукцией оказывается одной из наихудших – хуже только на светло-каштановых солонцеватых и солончаковых почвах Калмыкии. По крайней мере, так обстоит дело применительно к множеству технологий, заложенному в модель оптимального использования сельскохозяйственных угодий.

В модели рассмотрены пять альтернативных технологий, отличающихся от проектной уровня-

ми интенсивности использования участков – 0,9; 0,75; 0,5; 0,249625; 0,01 (интенсивность проектной технологии принята за единицу). Интенсивность технологии понимается как среднегодовой валовой выход товарной продукции (в пропорциях, предусмотренных проектом) с единицы площади севооборота за время его полной ротации. Изначально мы ожидали, что в случае введения лимитов на выброс ПГ на участках всех типов интенсивность их использования будет, как правило, снижаться пропорционально лимитам. Однако, как показывает модель, по мере усиления ограничений увеличивается доля участков с уровнем интенсивности 0,25 и 0, а другие промежуточные варианты интенсивности использования участков встречаются редко (табл. 3). Таким образом, часть участков будет использоваться максимально интенсивно (т. е. без паров или с сохранением их проектной доли к посевным площадям), а снижение объемов выбросов

будет достигаться за счет полного перевода значительной части земель в пар, в том числе самых плодородных участков. Данная закономерность наблюдается во всех районах (см. табл. 3). При введении больших лимитов в Ики-Бурульском районе Калмыкии участки с высокими объемами эмиссии полностью переводятся в пар. В Буденновском районе Ставропольского края, напротив, перевод в пар происходит только при самых жестких лимитах на эмиссию ПГ. В Арзгирском районе Ставропольского края при введении больших лимитов на эмиссию, увеличивается доля участков с низкой интенсивностью (0,25), а перевод части земель в пар начинается при лимитах 0,6 от базового варианта интенсивности. Таким образом, модель позволяет получить весьма разные условия реализации проектов при введении регулирования выбросов ПГ, но общим для них является малая вероятность промежуточных вариантов интенсивности ведения земледелия.

Таблица 2

Соотношение площади участков разных типов с максимально интенсивным использованием при различных лимитах на объем эмиссии парниковых газов

Лимиты выбросов ПГ, в долях к проектным	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Тип почв	Доля площади участков с максимально интенсивным использованием, %								
5 т/га пар каждый год – Буденновский район Ставропольского края									
Каштановые мицелярно-карбонатные	100	100	100	100	100	85	48	11	0
Пойменные засоленные	100	100	100	100	100	100	100	100	100
3,5 т/га без пара – Арзгирский район Ставропольского края									
Темно-каштановые мицелярно-карбонатные	97	62	7	0	0	0	0	0	0
Каштановые мицелярно-карбонатные	100	100	100	100	62	0	0	0	0
Светло-каштановые солонцеватые и солончаковатые	100	100	100	100	0	0	0	0	0
2 т/га пар каждый год – Ики-Бурульский район Республики Калмыкия									
Светло-каштановые солонцеватые и солончаковатые	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Бурые солонцеватые и солонцы (автоморфные)	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Солонцы луговые (гидроморфные)	100	100	100	100	100	0	0	0	0

В модели исследовался и вариант введения рыночных механизмов регулирования эмиссии ПГ, когда эмитенты парниковых газов будут обязаны покупать углеродные единицы по рыночной цене. В отличие от административного регулирования выбросов ПГ, модель показывает слабую чувствительность проекта к введению рынка квот. В разных ценовых сценариях необходимость снижения эмиссии наблюдается только при ценах выше 300 евро за 1 т/экв. CO₂. При самых высоких исторических ценах в 120 евро за 1 т/экв. CO₂ на Европейском

рынке выбросов (EU ETS) приведенная стоимость операционного денежного потока сокращается почти на треть, но возможностей ее повысить путем снижения интенсивности производства и соответствующего сокращения выбросов не возникает: стоимость недополученной продукции оказывается больше, чем снижение издержек в связи с выбросами. Таким образом, проекты, подобные рассмотренному, не получают достаточных стимулов к пересмотру технологии в направлении сокращения выбросов ПГ даже при исторически наивысших ценах.

Таблица 3

Площадь использования земель с различной интенсивностью при заданных объемах эмиссии парниковых газов

Район	Объем эмиссии в долях от базового уровня	Интенсивность					
		1	0,9	0,75	0,5	0,25	0
Ики-Бурульский	0,9	2184	0	0	0	0	3716
	0,8	2184	0	0	0	0	3716
	0,7	2184	0	0	0	0	3716
	0,6	2184	0	0	0	0	3716
	0,5	2184	0	0	0	0	3716
	0,4	673	0	0	0	0	5227
	0,3	673	0	0	0	0	5227
	0,2	673	0	0	0	0	5227
Буденновский	0,9	12 569	0	0	0	0	0
	0,8	12 569	0	0	0	0	0
	0,7	12 569	0	0	0	0	0
	0,6	12 569	0	0	0	0	0
	0,5	12 569	0	0	0	0	0
	0,4	11 118	0	0	0	1452	0
	0,3	7453	0	0	0	5117	0
	0,2	3830	0	0	0	8739	0
Арзгирский	0,9	11 833	0	200	0	130	0
	0,8	8563	0	0	0	3600	0
	0,7	3234	0	0	5597	3332	0
	0,6	2604	0	0	0	6596	2963
	0,5	1132	0	0	0	697	10 334
	0,4	0	0	0	0	0	12 163
	0,3	0	0	0	0	0	12 163
	0,2	0	0	0	0	0	12 163
0,1	0	0	0	0	0	12 163	

ВЫВОДЫ

В данной работе оценивается с позиций возможного сокращения эмиссии ПГ проект использования земель в зерновом хозяйстве, который одобрен банком и осуществляется на участках, расположенных на трех полигонах – в двух районах Ставропольского края и в одном районе Республики Калмыкия. Цель моделирования – анализ гипотетической ситуации, в которой после освоения запланированных капитальных вложений вводятся в действие меры федеральной политики регулирования выбросов ПГ в земледелии. В таких условиях вопрос о целесообразности продолжения проекта будет зависеть от превышения входящих операционных денежных потоков над исходящими

при оптимальном распределении участков между различными вариантами сельскохозяйственных технологий. Моделирование показало, что рассматриваемый проект мог быть успешен и не потребовать снижения интенсивности производства в сравнении с запланированной в условиях рыночного регулирования выбросов ПГ. При введении административного регулирования с помощью лимитов выбросов ситуация становится неоднозначной, так как прогнозируется снижение интенсивности севооборотов, причем за счет вывода из интенсивного использования наиболее плодородных участков. Эта закономерность прослеживается на всех трех исследуемых полигонах, причем, чем больше на данном полигоне доля участков с высоким пло-

дородием, тем, соответственно, на большей доле площадей происходит снижение интенсивности севооборотов под влиянием регулирования.

Проведенное исследование внесло вклад в научно-методическое обеспечение анализа земельных проектов, охватывающих большие территории, в условиях предстоящих изменений в подходах и принципах государственного регулирования влияния хозяйственной деятельности на климат планеты. Методика, в частности, применима к проектам, отличающимся значительным пространственным разбросом участков. Она позволяет формировать и исследовать сценарии землепользования, совместимые с разными вариантами такой политики, а также давать сценарные оценки стоимости сценарных операционных денежных потоков, которые необходимы для анализа рисков инвестиционных проектов [Риск-менеджмент..., 2017, п. 6.3].

Еще один результат относится к сфере экономики сельского хозяйства: это значительные уточнения существующих представлений о климатической политике как факторе, определяющем технологический облик производства сельскохозяйственной продук-

ции. Первое из них, отмеченное выше, – большой запас устойчивости земледелия (по крайней мере, в условиях изученных полигонов) к рыночным методам регулирования выбросов ПГ. Второе (оказавшееся неожиданным для самих авторов) то, что по мере возрастающей жесткости ограничительных мер климатической политики наилучшим решением чаще оказывается прекращение продуктивного использования участков с наибольшим потенциалом продуктивности при сохранении максимальной интенсивности производства на остальных – вопреки интуиции, ошибочно предсказывавшей преобладание равномерного снижения интенсивности производства на большинстве участков или вывода в первую очередь самых непродуктивных участков. Напротив, при введении регулирования выбросов ПГ производство сосредоточивается преимущественно на участках, которые отнесены к числу сравнительно неблагоприятных для земледелия, поскольку снижение интенсивности размещенных здесь севооборотов привело бы к сравнительно малому эффекту сокращения выбросов, т. е. цели регулирования не были бы достигнуты.

Благодарности. Часть исследования, представленного в статье, выполнена при поддержке РФФИ (проект 20-55-76005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акоф Р., Сасиени М. Основы исследования операций / пер. с англ. М.: Мир, 1971. 536 с.
- Деменков М. Проекционный алгоритм линейного программирования на основе поиска пересечения прямой и зонотопа / Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова. М., 2016. 195 с.
- Ковбашин Д.И., Дронин Н.М. Забрасывание пахотных угодий в европейской части России на фоне успехов сельского хозяйства в последние два десятилетия // Проблемы региональной экологии. 2023. № 2. С. 47–52. DOI: 10.24412/1728-323X-2023-2-47-52.
- Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов. 3-е изд. / Институт системного анализа РАН, ЦЭМИ РАН; под ред. Н.Г. Алешинской. М., 2004. 221 с.
- Математическое моделирование экономических процессов в сельском хозяйстве / А.М. Гатаулин и др. М.: Агропромиздат, 1990. 432 с.
- Нефедова Т.Г., Мкртчян Н.В. Миграция сельского населения и динамика сельскохозяйственной занятости населения в регионах России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2017. № 5. С. 58–67.
- Применение математических методов в управлении АПК Беларуси и России / Н.М. Светлов и др., М.: ЦЭМИ РАН, 2020. 177 с.
- Риск-менеджмент инвестиционного проекта. 2-е изд. / под ред. М.В. Грачевой. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2017. 663 с.
- Суховеева О.Э. Приложение модели DNDC к оценке параметров углеродного и азотного обмена в пахотных почвах Нечерноземья // Известия РАН. Серия географическая. 2018а. № 2. С. 74–85. DOI: 10.7868/S2587556618020073.
- Суховеева О.Э. Верификация модели DNDC для оценки параметров углеродного и азотного обмена в пахотных почвах Нечерноземья // Известия РАН. Серия географическая. 2018б. № 4. С. 89–95.
- Суховеева О.Э. Оценка пространственно-временной изменчивости потоков CO₂ в агроландшафтах европейской территории России на основе имитационного моделирования: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2018в. 27 с.
- Электронные ресурсы*
- Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, нерегулируемых Монреальским протоколом за 1990–2020 гг. URL: <http://www.igcc.ru/performance/publishing/reports/> (дата обращения 15.05.2023).
- Специализированные массивы для климатических исследований: Информация ВНИИГМИ-МЦД. URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (дата обращения 14.05.2023).
- Coin-or/Cbc: COIN-OR Branch-and-Cut solver, Forrest J. et al. (eds.), URL: <https://zenodo.org/record/6522795> (access date 14.05.2023).
- Minasny B., Malone B.P., McBratney A.B. et al. Soil carbon 4 per mille, *Geoderma*, 2017, no. 292, p. 59–86, URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706117300095> (access date 22.05.2023).

- Soussana J.-F., Lutfalla S., Ehrhardt F. et al.* Matching policy and science: Rationale for the “4 per 1000-soils for food security and climate” initiative, *Soil Tillage Research*, 2019, no. 188, URL: <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010075246> (access date 22.05.2023).
- Svetlov N.* Decision-making on the use of arable land considering the factors of field crops yield, *E3S Web of Conferences*, International Scientific and Practical Conference “From Inertia to Develop: Research and Innovation Support to Agriculture” (IDSISA 2020), 2020, vol. 176, URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/36/e3sconf_idsisa2020_04003/e3sconf_idsisa2020_04003.html (access date 14.05.2023).
- User's guide for the DNDC model*, Version 9.5, USA, University of New Hampshire, Institute for the study of Earth, Oceans, and Space, 2012, URL: <https://www.dnrc.sr.unh.edu/model/GuideDNDC95.pdf> (access date 14.05.2023).

Поступила в редакцию 27.06.2023

После доработки 16.01.2024

Принята к публикации 14.02.2024

ADAPTATION OF AN AGRICULTURAL PROJECT TO THE REGULATION OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS

D.I. Kovbashin¹, N.M. Svetlov², N.M. Dronin³

^{1,3} *M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography of the World and Geoecology*

² *A.A. Nikonova All-Russian Institute of Agrarian Problems and Informatics, branch of the Federal Scientific Center VNIIESKh*

¹ *Ph.D. student; e-mail: kovbashin_daniil@mail.ru*

² *Prof., D.Sc. in Economics, corresponding member of RAS; e-mail: svetlov@viapi.ru*

³ *Head laboratory, Ph.D. in Geography; e-mail: ndronin@gmail.com*

Using an original methodological approach, a model analysis of the adaptation of an agricultural project to the regulation of greenhouse gas emissions from agricultural land was carried out for the farms in the south of Russia. Emissions from both technological and ecosystem processes were taken into account. Methods of operations research and simulation modeling are applied to the study of two options for regulating greenhouse gas emissions, i.e. through market mechanisms focusing on the cost of carbon units in the EU and through the administrative control, which sets the emission limits. For each of the options, the optimal intensity of use was estimated for each land plot involved in the project.

The proposed methodology supplements the scientific and methodological support for the analysis of the large-scale agricultural projects under the state regulation of the impact of economic activities on the Earth's climate. It is applicable to projects with a significant spatial dispersion of plots. As a result of the study, the scientific visions of the climate policy impact on the technological configuration of agricultural production were specified. A significant margin of sustainability of agriculture in the south of Russia to carbon market methods has been revealed; It is shown that as the restrictive administrative approaches are tightened, farmers prefer to stop the intensive use of areas with the highest productivity potential while maintaining the maximum production intensity within the rest. The totality of the results obtained is recommended for practical application for developing and analyzing investment agricultural projects, including the analysis of project risks, as well as for improving the state environmental and climate policy as a tool for analyzing its consequences.

Keywords: climate policy, land use adaptation, DNDC model, agricultural project, crop production, Stavropol Krai, Republic of Kalmykia

Acknowledgments. The study was partly financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 20-55-76005).

REFERENCES

- Ackoff R.L., Sasieni M.W. *Fundamentals of Operations Research*, John Wiley, New York, 1968.
- Demenkov M.E. *Proektsionnyi algoritm lineinogo programirovaniya na osnove poiska peresecheniya pryamoi i zonotopa* [A Projection-type Algorithm for Linear Programming Using Line and Zonotope Intersection], Institute of Control Sciences RAS, Moscow, 2016, 195 p.
- Matematicheskoe modelirovanie ekonomicheskikh protsessov v sel'skom khozyaistve* [Mathematical modelling of economic processes in agriculture], A.M. Gataulin et al. (avt.), Moscow, Agropromizdat Publ., 1990. 432 p. (In Russian)
- Metodicheskie rekomendatsii po otsenke effektivnosti investitsionnykh projektov*, 3rd ed. [Recommended Practice for

- Assessing Return on Investment Projects 3rd edition], N.G. Aleshinskaya (ed.), Institute for Systems Analysis of Russian Academy of Sciences, Central Economic Mathematical Institute Publ., 2004, 221 p. (In Russian).
- Primenenie matematicheskikh metodov v upravlenii APK Belarusi i Rossii: monografiya* [The use of mathematical methods in the management of agro-industrial complex in Belarus and Russia], N.M. Svetlov, V.I. Buts (eds.), Moscow, CEMI Russian Academy of Sciences, 2020, 177 p. (In Russian)
- Risk-menedzhment investitsionnogo proekta*, 2nd ed. [Risk management of an investment project], M.V. Gracheva (ed.), Moscow, UNITI-DANA Publ., 2017, 663 p. (In Russian)
- Sukhoveeva O.E. *Otsenka prostranstvenno-vremennoi izmenchivosti potokov CO₂ v agrolandshaftakh Evropeiskoi territorii Rossii na osnove imitatsionnogo modelirovaniya* [Evaluation of spatiotemporal variability of fluxes in agrolandscapes of the European Russia using simulation modelling], Extended Abstract of Ph.D. Thesis in Geography, Moscow, 2018b, 27 p. (In Russian)
- Sukhoveeva O.E. Prilozhenie modeli DNDC k otsenke parametrov uglerodnogo i azotnogo obmena v pahotnykh pochvah Nechernozem'ya [Application of the DNDC model for estimation of carbon and nitrogen exchange parameters in arable soils in Non-Chernozem Zone], *Izvestiya RAN, Seriya geograficheskaya*, 2018a, no. 2, p. 74–85, URL: 10.7868/S2587556618020073 (access date 14.05.2023). (In Russian)
- Sukhoveeva O.E. Verifikatsiya modeli DNDC dlya otsenki parametrov uglerodnogo i azotnogo obmena v pahotnykh pochvah Nechernozem'ya [Verification of the DNDC model for estimation of carbon and nitrogen exchange parameters in arable soils in Central Non-Chernozem zone], *Izvestiya RAN, Seriya geograficheskaya*, 2018b, no. 4, p. 89–95. (In Russian)
- Web sources*
- Coin-or/Cbc: COIN-OR Branch-and-Cut solver*, J. Forrest et al. (ed.), URL: <https://zenodo.org/record/6522795> (access date 14.05.2023).
- Minasny B., Mcbratney A.B., Angers D. et al. Soil carbon 4 per mille, *Geoderma*, 2017, no. 292, p. 59–86, URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706117300095> (access date 22.05.2023).
- Natsional'nyi doklad o kadastro antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorptsii poglotitelyami parnikovyykh gazov, ne reguliruemyykh Monreal'skim protokolom za 1990–2020 gg.* [National inventory report of anthropogenic emissions and removals by sinks of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol for 1990–2020], URL: <http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/> (access date 15.05.2023).
- Soussana J.-F., Lutfalla S., Ehrhardt F. et al. Matching policy and science: Rationale for the “4 per 1000-soils for food security and climate” initiative, *Soil Tillage Research*, 2019, no. 188, URL: <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010075246> (access date 22.05.2023).
- Spetsializirovannyye massivy dlya klimaticheskikh issledovaniy: Informatsiya VNIIGMI-MTsD* [Specialised arrays for climate research: Information from RIHMI-WDC], URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (access date 14.05.2023).
- Svetlov N. Decision-making on the use of arable land considering the factors of field crops yield. E3S Web of Conferences, *International Scientific and Practical Conference “From Inertia to Develop: Research and Innovation Support to Agriculture”* (IDSISA 2020), 2020, no. 176, URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/36/e3sconf_idsisa2020_04003/e3sconf_idsisa2020_04003.html (access date 14.05.2023).
- User's guide for the DNDC model*, Version 9.5, USA, University of New Hampshire, Institute for the study of Earth, Oceans, and Space, 2012, URL: <https://www.dndc.sr.unh.edu/model/GuideDNDC95.pdf> (access date 14.05.2023).

Received 27.06.2023

Revised 16.01.2024

Accepted 14.02.2024

УДК 911.3, 631.481; 554.552.1 (571)

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕОСВОЕНИЯ ЗАБРОШЕННЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ В РЕЧНЫХ БАССЕЙНАХ ЮГО-ЗАПАДНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ

О.А. Екимовская¹, А.П. Гриценюк², А.А. Сороковой³, А.И. Шеховцов⁴, А.П. Сизых⁵

¹ Байкальский институт природопользования СО РАН, лаборатория геоэкологии

^{2,5} Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН, лаборатория биоиндикации экосистем

^{3,4} Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН

¹ Науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: oafe@mail.ru

² Науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: gap1958@mail.ru

³ Зам. директора по научной работе, лаборатория геохимии ландшафтов и географии почв, ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: geoter@irigs.irk.ru

⁴ Лаборатория физической географии и биогеографии, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: ashekhov@mail.ru

⁵ Вед. науч. сотр., д-р биол. наук; e-mail: alexander.sizykh@gmail.com

Проведены комплексные эколого-экономические исследования постаграрных ландшафтов среднего течения рек Селенга, Чикой и Темник в границах Селенгинского административного района Республики Бурятия (РБ). Разработана карта заброшенных сельскохозяйственных угодий. Дана краткая характеристика агроклиматических условий района исследования, проанализированы структура сельскохозяйственных угодий, урожайность зерновых и зернофуражных культур, динамика поголовья и нагрузка скота на пастбища и сенокосы. Сформулированы причины забрасывания пашен. Выявлено, что пастбища и сенокосы из сельскохозяйственного оборота не исключены. Это обусловлено ростом поголовья скота в хозяйствах населения, являющихся основными сельскохозяйственными производителями в РБ, а также дефицитом естественных кормовых угодий. Дана характеристика видового состава и состояния защитных лесополос, как неотъемлемой части экотопов постаграрных ландшафтов. Приведены основные таксономические показатели деревьев. Актуальность исследования защитных лесополос обусловлена необходимостью их инвентаризации, отсутствием ухода, принятием Федеральных Законов о защитных лесонасаждениях и мелиорации земель. Дана краткая агрохимическая характеристика состояния почв на ключевых участках. Для оценки эффективности возвращения пашен в сельскохозяйственный оборот рассчитан чистый операционный доход (ЧОД) или рентный доход для каждой зерновой и зернофуражной культуры, выращиваемой в регионе исследования. Выявлено, что наибольший доход приносят овес и яровая пшеница. Сформулированы рекомендации по возвращению постаграрных ландшафтов в сельскохозяйственный оборот, оптимизации защитного лесоразведения, реконструкции защитных лесополос.

Ключевые слова: постаграрные ландшафты, бассейн Селенги, сельскохозяйственное землепользование, реосвоение, эффективность, рентный доход, экологическое состояние, защитные лесополосы

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.4

ВВЕДЕНИЕ

Рациональное использование земельных ресурсов имеет большое значение для развития национальной экономики, обеспечения продовольственной безопасности страны. В 2023 г. в Российской Федерации принята государственная программа эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса [Государственная..., 2023]. Вовлечение в сельскохозяйственный оборот новых, целинных земель на современном этапе развития экономики и общества уже невозможно. Поэтому основными направлениями программы выбраны инвентаризация имеющихся земель сельскохоз-

ственного назначения, предотвращение их выбытия, проведение комплексной мелиорации, создание и реконструкция гидромелиоративных систем.

РБ относится к регионам, в которых в результате аграрных преобразований 1990-х гг. значительно сократилась сельскохозяйственная освоенность. После распада коллективных сельскохозяйственных предприятий и прекращения государственных дотаций на растениеводство в первую очередь сократились посевные площади зерновых и зернофуражных культур. Площадь сельскохозяйственных земель сократилась в целом по республике на 79,5%, доля неиспользуемой пашни достигает 66% [Алакоз, 2016; Шагайда, 2016]. Возвращение пост-

аграрных ландшафтов в сельскохозяйственный оборот актуально для РБ в связи с нехваткой кормов и ростом поголовья скота в хозяйствах населения, являющихся основными аграрными производителями [Екимовская, 2003; Yekimovskaya, Beshentsev, 2012]. В этой связи актуальным является исследование по использованию заброшенных пашен для производства зернофуражных культур, сена однолетних и многолетних трав.

Возвращение постаграрных ландшафтов в сельскохозяйственный оборот требует комплексного подхода [Авессаломова, 2016; Даньшин, 2018; Цешковская и др., 2019]. Полученный доход может быть меньше затрат на их рекультивацию. Помимо оценки экономической прибыли необходимо учитывать экологические функции постаграрных ландшафтов. Они являются средой обитания, резервными территориями для сохранения биоразнообразия и генетического потенциала флоры и фауны, депонируют углерод.

Проблема забрасывания пахотных угодий из-за развития дефляции является актуальной для региона исследования. Учитывая важную роль защитных лесополос в повышении урожайности и снижения эрозии почвы, считаем необходимым проведение комплексных исследований имеющихся защитных лесополос. Лесополосы создавались в конце 1960-х гг. В настоящее время большая часть лесополос находится в дигрессивном состоянии и требует полной реконструкции.

Цель исследования – оценить экономическую эффективность возвращения постаграрных ландшафтов в сельскохозяйственный оборот.

Для достижения поставленной цели:

- дана краткая характеристика современного состояния постаграрных ландшафтов и защитных лесополос, агроклиматических условий, особенностей сельскохозяйственного землепользования;
- проанализирована целесообразность возвращения заброшенных пашен в сельскохозяйственный оборот;
- рассчитан чистый операционный доход (ЧОД), который может быть получен в случае использования заброшенных пашен для выращивания зерновых и зернофуражных культур;
- разработаны рекомендации об использовании постаграрных ландшафтов в бассейнах среднего течения реки Селенги, ее притоков Темник и Чикой.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Комплексные социально-экономические и экологические исследования проводились в 2018–2020 гг. на постаграрных ландшафтах в бассейнах среднего течения реки Селенги и ее притоков Темник и Чикой в границах Селенгинского административного района. Было исследовано девять участков сельскохоз-

яственных угодий, заброшенных в середине 1990-х гг. после распада коллективных предприятий (рис. 1).

Ключевые участки исследования представлены пойменно-долинными комплексами, отражающими наибольшее разнообразие типов почв и форм рельефа. Это днища котловин, склоны, шлейфы склонов, речные террасы, находящиеся на различных стадиях зарастания древесно-кустарниковой растительностью. Изучение растительности проводилось в соответствии с руководством по геоботаническим съемкам [Викторов и др., 1959], анализ площади проективного покрытия и видовая насыщенность фитоценозов определялись на площадках площадью 1 м² в трехкратной повторности.

Отдельный раздел исследований посвящен характеристике состояния защитных лесополос и основных таксационных показателей. Актуальность их исследования обусловлена отсутствием в течение длительного времени систематических научных наблюдений защитных лесополос в РБ, необходимостью их инвентаризации в связи с принятием федеральных законов о защитных лесонасаждениях и мелиорации земель [Федеральный..., 2019; 2023]. Программа полевых исследований состояния защитных лесополос включала в себя сбор сведений о породном и возрастном составе деревьев, характеристику их основных таксономических показателей (визуальная оценка формы деревьев, общее состояние кроны, степень ее усыхания, плотность лесополос). Оценка состояния лесополос проводилась глазомерно-измерительным способом по шкале категорий лесоустроительной инструкции, утвержденных Постановлением Правительства РФ № 607 от 20.05.2017 г. [Постановление..., 2017].

Возраст деревьев рассчитывался неdestructивными методами с использованием возрастного бурава Пресслера. Всего обследовано 50 деревьев.

Анализ экономико-географических особенностей сельскохозяйственного землепользования проведен на основе статистических данных за 1992–2021 гг., материалов полевых исследований 2019–2020 гг. Оценка эффективности использования заброшенных пашен для выращивания зерновых и зернофуражных культур проведена методом рентной оценки, позволяющим рассчитать потенциальный доход за счет естественных факторов производства. В основе оценки рыночной стоимости земель сельскохозяйственного назначения лежит теория земельной ренты или избыточного дохода, который образуется при использовании земли и представляет собой чистый операционный доход (ЧОД) как разницу между стоимостью произведенной продукции и общими затратами на ее производство. ЧОД рассчитывался для культур, традиционно возделываемых в данном регионе, – яровая пшеница, овес и ячмень.

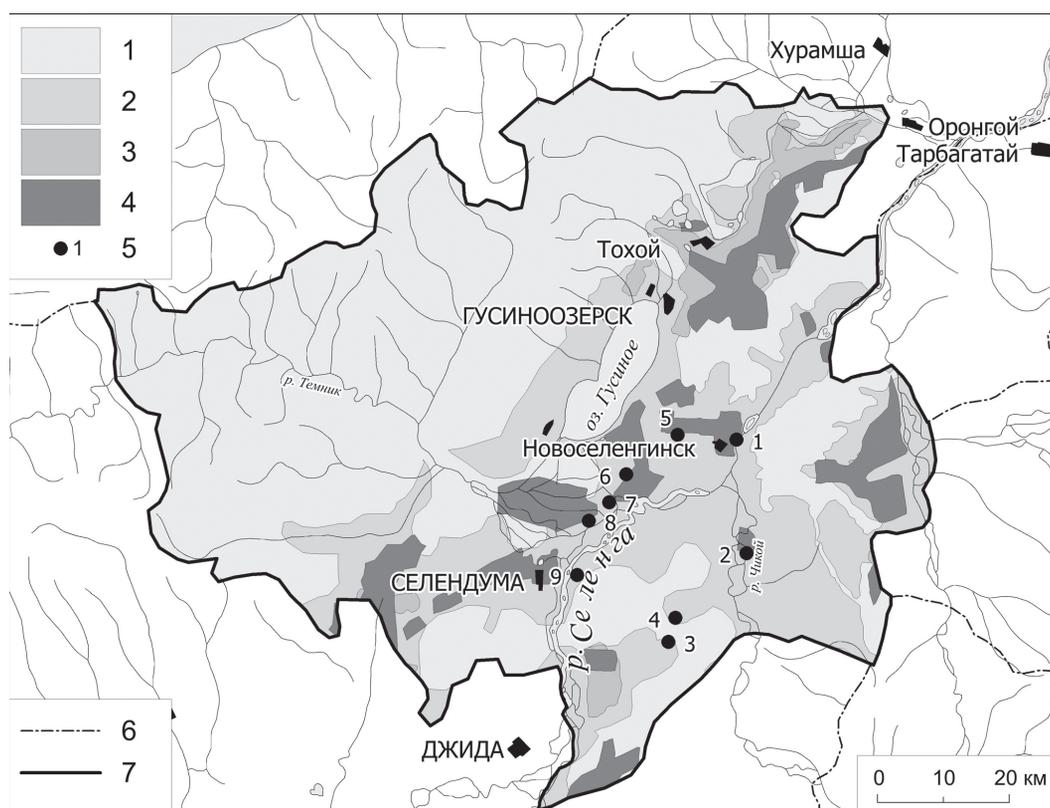


Рис. 1. Залежные сельскохозяйственные угодья среднего течения р. Селенги и ее притоков Темник и Чикой (Юго-Западное Забайкалье): 1 – земли лесного фонда; 2 – естественные кормовые угодья; 3 – используемые пашни; 4 – залежные земли; 5 – участки исследования; 6 – границы административных районов Республики Бурятия; 7 – граница Селенгинского административного района

Fig. 1. Fallow agricultural lands in the middle reaches of the Selenga River and its tributaries Temnik and Chikoy (Southwestern Transbaikalia): 1 – forest lands; 2 – natural forage lands; 3 – arable lands under cultivation; 4 – fallow lands; 5 – study areas; 6 – boundaries of the administrative regions of the Republic of Buryatia; 7 – boundary of the Selenginsky administrative region

Исходные статистические данные для расчетов ЧОД взяты из годовых отчетов сельскохозяйственных организаций Селенгинского района Министерства сельского хозяйства и продовольствия РБ (МСХиП РБ) за 2019–2021 гг.

Полученные выводы об эффективности использования бывших пашен дополнены эмпирическими наблюдениями из экспедиционных исследований 2019–2020 гг.

Выявление и датировка залежей проводилась на основе анализа картографических материалов разных лет создания, опроса местного населения, а также экспертов (МСХиП РБ). Также для установления времени пребывания пашни в залежном состоянии использованы методики, разработанные в Институте почвоведения и агрохимии СО РАН. Диагностика и систематизация почв проведена по Л.Л. Шишову [Шишов и др., 2004].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сельскохозяйственные угодья исследуемой территории расположены сплошным ареалом на высоте от

500 до 800 м над уровнем моря [Атлас, 1967]. Горные хребты Хамар-Дабана ограничивают поступление влажных ветров западного направления. В весенне-летний период отмечаются ветры большой скорости – 10–15 м/с. Климат резко континентальный, с большими амплитудами колебаний годовых и суточных температур. Преобладают арктические воздушные массы с их низкими температурами и малым количеством осадков. Количество осадков около 280 мм. Распределение их в течение года крайне неравномерно. Весной выпадает около 23 мм, летом около 229 мм, осенью – около 30 мм, зимой – около 7–10 мм. Период с положительной температурой длится около 170 дней. Период поднятия температуры от 0°C приурочен ко второй половине апреля. Период с температурой больше 10°C начинается с конца мая, меньше 0°C устанавливается в середине октября и длится около 190 дней. Тепловые ресурсы достаточны для произрастания основных сельскохозяйственных культур. Снег выпадает в конце сентября, устойчивый снежный покров образуется в середине ноября. Высота снежного покрова не превышает 8–10 см [Агроклиматический справочник, 1960].

Пахотные и естественные кормовые угодья относятся к основному сельскохозяйственному ареалу Республики Бурятия. История их освоения насчитывает более двух веков [Асалханов, 1975; Намжилова, Тулохонов, 2000]. Постаграрные ландшафты исследуемой территории представлены заброшенными пашнями, находящимися в залежном состоянии около 35 лет. Преобладание легких почв и сильных ранневесенних ветров, крайне неравномерное распределение годовой суммы осадков, выпадающих в виде интенсивных ливней, в сочетании с выпасом скота являются основной причиной широкого развития водной и ветровой эрозии. В условиях дефицита естественных кормовых угодий и роста поголовья скота заброшенные пашни интенсивно используются в качестве пастбищ. Сенокосы и пастбища из сельскохозяйственного оборота не исключены. Для хозяйств Селенгинского района всегда был характерен дефицит естественных кормовых угодий [Белозерцева и др., 2016; Екимовская, 2003]. Проблема нехватки кормов усилилась в последние десятилетия в связи с устойчивым ростом поголовья крупного и мелкого рогатого скота (КРС и МРС), а также лошадей в хозяйствах населения (рис. 2).

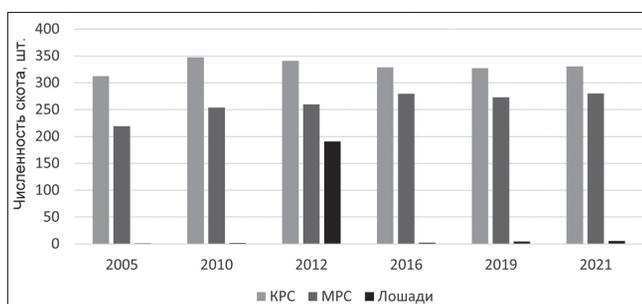


Рис. 2. Численность скота в Селенгинском районе, тыс. голов

Fig. 2. Livestock numbers in the Selenga region, thousand heads

Спрос на заброшенные сельскохозяйственные угодья у местного населения есть. Об этом свидетельствуют интервью с фермерами Селенгинского района. Фермеры вынуждены перегонять скот для пастбы на значительное расстояние, несмотря на то что рядом есть неиспользуемые более 10 лет естественные кормовые угодья. Один из фермеров утверждал, что эти участки выделены в собственность, но хозяин земель «и сам их не использует, и в аренду не сдает». В другом случае на заброшенных пашнях бывшего колхоза имени XX партсъезда фермеры периодически выпасали скот. Сельскохозяйственные угодья оставались в общей собственности бывших колхозников и в долевую собственность не выделялись. Собственники земельных долей могли бы официально ввести сельскохозяй-

ственные угодья в использование, выделяя участки в счет личных земельных долей, возделывая небольшие участки для нужд семьи или выращивания сельскохозяйственных культур на продажу. Однако государство не создало доступных по цене механизмов такого выделения и простых процедур ведения мелкого сельскохозяйственного бизнеса.

Сложный рельеф, развитие эрозионно-дефляционных процессов обусловили значительную неоднородность почвенного покрова исследуемой территории. Почвенные исследования заброшенных пашен выявили среднемощные агроземы, агрочерноземы, агрочерноземы текстурно-карбонатные, агросерые, аллювиальные агрогумусовые, аллювиальные агротемногумусовые почвы различных видов и сочетаний, характерные для лесостепной и степной зон. Содержание гумуса в них среднее и высокое. Реакция среды пахотного горизонта благоприятная для растений, в основном близкая к нейтральной, слабощелочная под степной растительностью заброшенных пашен, слабокислая в почвах под луговой растительностью пастбищ и сенокосов. Содержание основных элементов питания растений в почвах достаточное и выше среднего. На всех ключевых участках, несмотря на пастбищную нагрузку, наблюдается восстановление травостоя, появление многоярусности, повышение проективного покрытия, увеличение видового разнообразия растительности.

Проведенная в 1970-х гг. интенсивная распашка каменистых сенокосов и залежей оказалась неэффективной. Уменьшилась площадь естественных кормовых угодий, обострился их дефицит, выращивание зерновых на этих участках требовало регулярных мелиоративных мероприятий и очистки пашни от камней. Урожаи, хлебопекарные и технологические качества зерна были низкие [Екимовская 2009; Yekimovskaya, Beshentsev, 2012]. Интенсивное земледелие было возможно при регулярной поддержке государства. Отсутствие дотаций, сокращение сельского населения ускорили процесс забрасывания пашен в конце 1990-х гг. [Екимовская, 2003].

Урожайность сенокосов исследуемой территории достигает 14,2 ц/га [Решиков, 1958; Александрова, Жарников, 2021; Бойков и др., 1995]. Реосвоение залежных земель и использование их в качестве сенокосов могло бы увеличить валовые сборы сена на 50 225 ц. Этого количества сена хватит для содержания в течение года (при условии дополнительного рациона) от 1046 до 1500 молочных коров с ежегодными надоями до 5000 л [Головин и др., 2015; Головин и др., 2018]. Учитывая постоянный рост поголовья скота в хозяйствах населения и первостепенную роль органических удобрений в плодородии почв и повышении урожайности естественных кормовых угодий, представляется эффек-

тивным восстановление традиционной утужной системы земледелия. Утужная система (от бурятского слова «утуг» – удобрение) представляет собой комплекс мероприятий по улучшению пастбищ и сенокосов, повышению их урожайности. Комплекс мероприятий включает очищение, унавоживание, создание оросительных каналов, мероприятия по снегозадержанию, запруды ручьев и мелких рек. Сено с «утугов» считается более высоким по качеству и ценится дороже. В условиях дефицита естественных сенокосов оптимально частичное использование заброшенных пашен для производства сена однолетних и многолетних трав.

Отдельный блок комплексных исследований постаграрных ландшафтов был посвящен характеристике современного состояния защитных лесополос. Защитные лесополосы являются неотъемлемой частью экотопов, основой формирования структуры постаграрных ландшафтов Селенгинского района, определяя вектор развития растительности. Защитные лесополосы формируют ветровой и температурный режимы на прилегающих участках сельскохозяйственных угодий, повышают устойчивость растительных сообществ к условиям окружающей среды, депонируют углерод. Идеи о совместном изучении сельскохозяйственных земель и защитных лесополос восходят к В.В. Докучаеву, создавшему цикл научных работ по лесомелиорации, охране и защите почв от эрозии [Докучаев, 1951, 1952].

Создание защитных лесополос в Селенгинском районе началось в 1968 г. [Будаев, 1982]. Но завершенная система лесополос так и не была создана. Посадка деревьев была проведена на ограниченных площадях без соблюдения технологии использования древесных

пород и размеров лесополос. Созданные отдельные лесополосы не решили основной задачи – защиты почвы на всей эродируемой территории. В условиях Забайкалья на первом месте по качеству выполнения защиты почвы от эрозионных процессов стоит сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), далее идут лиственница сибирская (*Larix sibirica*), береза бородавчатая (*Betula pendula*), тополь бальзамический (*Populus balsamifera* L.) и вяз мелколистный (*Ulmus pumila* L.) [Будаев, 1985; Иванов и др., 1982]. На исследуемой территории лесомелиоративные полосы представлены тополем бальзамическим (*Populus balsamifera* L.) как наиболее засухоустойчивой и холодостойкой породой. Также присутствуют единичные кустарники рода карагана (*Caragana pygmaea* L.) DC. Доминирующее участие тополя в лесополосах вызвано нехваткой посадочного материала других древесных пород и слабой разработанностью методов их выращивания на пахотных землях [Будаев и др., 1984]. Ранее защитные лесополосы находились в ведении сельскохозяйственного предприятия «Колхоз имени XX партсъезда». В настоящее время собственник отсутствует, уход за лесополосами не ведется.

Избыточная солнечная инсоляция, суховеи, недостаток влаги в весенне-летний период, сильные морозы крайне неблагоприятно воздействовали на посадки. Без ухода за лесополосами изменялась морфоструктура деревьев, ухудшалось их санитарное состояние, изменялись таксационные показатели. В сочетании с возрастом деревьев (более 50 лет) это привело к их дигрессии. Выпадают как отдельные деревья, так и целые полосы, прекращая свои противозерозионные, влагозадерживающие и санитарно-гигиенические функции (рис. 3).



Рис. 3. Разрушенные участки защитных лесополос
Fig. 3. Destroyed areas of shelterbelt forests

Оставшиеся деревья, возрастные и перестойные, относятся к 3–5-й категориям (сильно ослабленные и свежий сухостой). Угнетенное состояние защитных лесополос (усыхание) не позволяет им эффективно накапливать углерод.

Визуальное обследование степени усыхания показало ее наличие как в верхней, так и средней части кроны дерева. Форма кроны раскидистая, характерная для данного вида тополя. Типичная форма кроны обусловлена также отсутствием затене-

ния в ажурных лесополосах. Форма ствола прямая, отдельные деревья имеют небольшой наклон и раздвоение ствола. Помимо абиотических факторов и полного отсутствия ухода причиной усыхания является тот факт, что при закладке лесополос в качестве посадочного материала использовались черенки.

Лесополосы, выращенные из семян, имеют ряд преимуществ: посев больше соответствует природе естественного возобновления растения, отсутствуют деформация корней при пересадках, взрослые

деревья долговечнее, процесс посадки семян менее трудоемок. Но в условиях резко-континентального климата Забайкалья и высокой инсоляции молодые всходы сильно посекаются иссушающими ветрами и не выдерживают больших температурных колебаний. Недостатком закладки защитных лесополос из семян является также слабая конкурентоспособность при борьбе с сорняками.

Основные таксационные показатели приведены в таблице 1.

Таблица 1

Таксономические показатели защитных лесополос

Участок	Порода	Возраст, лет	Средние метрические показатели	
			Высота, в м	Диаметр, см
1	Тополь бальзамический (<i>Populus balsamifera</i> L.)	50–55	6,30±0,44	14,10±0,68
2	Тополь бальзамический (<i>Populus balsamifera</i> L.)	50–55	5,9±0,38	14,6±0,58

Для оценки эффективности использования залежных земель в качестве пахотных угодий мы применили рентный подход. Применение рентной оценки наряду с другими эконометрическими методами позволяет рассчитать потенциальный доход при введении в сельскохозяйственный оборот заброшенных сельскохозяйственных угодий за счет естественных факторов производства. Общей основой теории земельных отношений является тот факт, что земля выступает как средство производства, а следовательно, оценивается ее потенциальная возможность производить продукцию.

Величина земельной ренты рассчитывается по формуле:

$$\text{ЧОД} = \text{ВД} - 3 \cdot \text{НП}, \quad (1)$$

где ЧОД – чистый операционный доход, ВД – валовой доход, 3 – затраты, НП – норма прибыли 5%.

Валовой доход рассчитывается по формуле:

$$\text{ВД} = \text{ЦП} \cdot \text{НУ} \cdot \text{S}, \quad (2)$$

где ЦП – цена продажи, НУ – нормативная урожайность, S – площадь сельхозугодий.

Валовой доход рассчитывался для культур, традиционно возделываемых в регионе исследования.

Это яровая пшеница, овес и ячмень (табл. 2). Овес является ведущей культурой в структуре посевов. Это обусловлено низкой плотностью автомобильных дорог, сохранением традиционного образа жизни, важной хозяйственной и транспортной ролью лошадей, увеличением их поголовья. Также овес является наименее затратной и наиболее урожайной культурой в силу своих биологических особенностей. Овес выдерживает поздние весенние и ранние осенние заморозки, малотребователен к почвенному плодородию. Пшеница, несмотря на высокую амплитуду колебаний урожайности, занимает значительные посевные площади, но уступает по этому показателю овсу. В условиях дефицита естественных кормовых угодий ячмень является важной зернофуражной культурой, используемой на корм скоту.

Наибольший рентный доход приносит выращивание овса – 7,184 тыс. р. (табл. 3). В материалах таблицы 4 приведены показатели затрат с учетом НП 5%. Как показывают расчеты, НП 5% приносит минимальный доход при выращивании всех зерновых культур.

Таблица 2

Валовой доход зерновых культур, средний показатель за 2018–2020 гг.

Зерновая культура	Урожайность, ц/га	Цена за 1 ц, тыс. р.	Площадь, га	Валовой сбор, ц	Валовой доход, тыс. р.
Пшеница	12,4	1,13	1543	19 133	21,621
Ячмень	10,5	1,14	804	8442	9,624
Овес	12,9	1,02	1695	21 866	22,303

Таблица 3

Чистый операционный (рентный) доход, тыс. р.

Зерновая культура	Валовой доход	Затраты	Затраты с НП	Чистый операционный (рентный) доход
Пшеница	21,621	19,388	20,357	1,264
Ячмень	9,624	6,332	6,659	2,965
Овес	22,303	14,869	15,119	7,184

Овощи и картофель в Селенгинском районе выращивают только хозяйства населения. Методические трудности оценки рентного дохода в случае возделывания этих культур заключаются в отсутствии учета затрат на выращивание продукции. Выращенная продукция продается нерегулярно, широко распространены натуральный обмен на другие виды продукции и в качестве оплаты за оказанные услуги.

ВЫВОДЫ

Значительное увеличение поголовья скота в хозяйствах населения Селенгинского района требует повышения продуктивности стойлово-пастбищного животноводства. Для этого необходимо усиление полевого и лугопастбищного кормопроизводства, включающее восстановление системы мелиорации, удобрения сенокосов, создание новых долголетних культурных пастбищ.

Часть заброшенных пашен необходимо возвращать в сельскохозяйственный оборот. Агрохимические исследования почв показали их достаточное плодородие, среднее и выше среднего значения содержание элементов питания растений. Реосвоенные пашни целесообразно использовать для выращивания пшеницы, ячменя и овса. Учитывая дефицит естественно-кормовых угодий целесообразно использовать пашни для производства сена однолетних и многолетних трав.

Величина экономической отдачи раскрывает особенности землепользования на исследуемой территории. В случае использования заброшенных пашен для выращивания фуражных зерновых ожидается хотя и небольшая, но все-таки прибыль. Овес и ячмень являются наименее затратными и экономически выгодными культурами. Их выращивание позволит обеспечить кормами увеличивающееся поголовье скота и ослабить зависимость от импорта фуражных зерновых из соседней Монголии.

Установление жестких режимов использования естественных кормовых угодий, соблюдение време-

ни плодоношения видов растений, контроль пастбищного режима и искусственный подсев семян будут способствовать восстановлению растительности в соответствии с природно-климатическими условиями региона. Для растительности надпойменных террас необходимо учитывать сроки плодоношения основной части (доминантов-злаков) видового состава растений в целях сохранения стабильной продуктивности пастбищ и сенокосов.

Искусственный подсев семян близких по экологии к природным условиям региона видов растений в настоящее время практически не применяется. Это обусловлено нехваткой трудовых ресурсов, семян и высокой ценой на горючее. Поэтому целесообразно постаграрные ландшафты без проективного растительного покрытия оставлять на залужение, выводя на длительный срок (до 10–15 лет) из пастбищеоборота.

Комплексные эколого-экономические мероприятия (дотации, гранты для производителей со стороны МСХиП РБ, соблюдение противоэрозионных мероприятий, использование сортовых семян) будут способствовать восстановлению растениеводства на постаграрных ландшафтах с благоприятными почвенно-климатическими условиями.

Необходима детальная инвентаризация и полная реконструкция защитных лесополос, включающая замену высохших и поврежденных деревьев, опашку и своевременную очистку. В настоящее время защитные лесополосы находятся в дигрессивном состоянии. Деревья сильно ослаблены, возрастные и перестойные. Сохранившиеся лесополосы низкоплотны и редкостойны, не выполняют свои защитные функции. Усыхание большинства деревьев не позволяет им эффективно накапливать углерод.

Для повышения эффекта от защитного лесоразведения необходимо сокращение расстояния между закладываемыми лесоплосами, посадка деревьев в шахматном порядке, правильный подбор древесных пород по их биологическим особенностям.

Благодарности. Статья подготовлена в рамках бюджетных научно-исследовательских работ № ААА-А21-121011990023-1, АААА-А21-121012190055-7, АААА-А17-117041910172-4, АААА-0347-2016-0002, АААА-А21-121012190059-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агроклиматический справочник по Бурятской АССР. Л., 1960. 189 с.
- Авессаломова И.А. Биогеохимическая неоднородность агроландшафтов (на примере среднетаежной подзоны юга Архангельской области) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2016. № 3. С. 58–66.
- Александрова Н.А., Жарников В.Б. Анализ использования сельскохозяйственных земель крестьянскими (фермерскими) хозяйствами в Селенгинском районе Республики Бурятия // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. Т. 7. № 1. С. 104–110.
- Асалханов И.В. Сельское хозяйство Сибири конца XIX – начала XX века. Новосибирск: Наука, 1975. 165 с.
- Атлас Забайкалья / под ред. акад. В.Б. Сочавы. М.; Иркутск: ГУГК, 1967. С. 10–11.
- Белозерцева И.А., Екимовская О.А., Энхтайван А. Использование сельскохозяйственных земель и их деградация на территории бассейна реки Селенги // Успехи современного естествознания. 2016. № 2. С. 142–147.
- Бойков Т.Г., Убугунов Л.Л., Харитонов Ю.Д. и др. Продуктивность, структура и качественный состав травостоя деградированных пойменных остепненных лугов бассейна р. Селенга в зависимости от агромелиоративного воздействия // Агрохимия. 1995. № 1. С. 30–42.
- Будаев Х.Р. Лесомелиоративный фонд, состояние и перспективы защитного лесоразведения в Бурятии. Лесная мелиорация эродированных почв // Лесная мелиорация эродированных почв. Улан-Удэ: Бурят. ин-т естественных наук Бурятского филиала СО АН СССР, 1982. С. 10–17.
- Будаев Х.Р. Леса зеленой зоны и озеленение городов и сел Бурятии. Улан-Удэ: Бурят. кн. изд-во, 1985. 152 с.
- Будаев Х.Р., Будаева С.Э., Дамбиев Э.Ц. Защитное лесоразведение в Бурятской АССР. Улан-Удэ: Бурят. кн. изд-во, 1984. 183 с.
- Викторов С.В., Востокова Е.А., Вышивкин Д.Д. Краткое руководство по геоботаническим съемкам. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1959. 166 с.
- Головин А.В., Аникин А.С., Девяткин В.А. Совершенствование норм кормления коров на основе физиологических потребностей // Зоотехния. 2015. № 10. С. 2–4.
- Головин А.В., Некрасов Р.В., Аникин А.С. Особенности организации полноценного кормления высокопродуктивных молочных коров // Ветеринария, зоотехния и биотехнология. 2018. № 7. С. 93–100.
- Даньшин А.И. Экспортный потенциал агропромышленного комплекса Сибири и Дальнего Востока России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2018. № 4. С. 101–108.
- Докучаев В.В. Сочинения. Т. 6. Преобразование природы степей: Работы по исследованию почв и оценке земель, учение о зональности и классификация почв: 1888–1900 / подгот. В.Н. Заварицкий; отв. ред. акад. Л.И. Прасолов, чл.-кор. АН СССР И.В. Тюрин. М.: Акад. наук СССР, 1951. 596 с.
- Докучаев В.В. Русский чернозем: отчет Вольному экон. Обществу. 2-е изд. М.: Сельхозгиз, 1952. 636 с.
- Екимовская О.А. Организация производительных сил сельскохозяйственных предприятий Республики Бурятия. 2003. № 1. С. 119–124.
- Екимовская О.А. Экономико-географические особенности развития многоукладного сельского хозяйства Республики Бурятия // География и природные ресурсы. 2009. № 4. С. 117–124.
- Иванов Г.М., Будаев Х.Р., Кокорин Ю.Н. Агроресурсоориентированное районирование Бурятской АССР // Лесная мелиорация эродированных почв. Улан-Удэ: Бурят. ин-т естественных наук БФ СО АН СССР, 1982. С. 91–94.
- Намжилова Л.Г., Тулохонов А.К. Эволюция аграрного природопользования в Забайкалье. Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения РАН, 2000. 200 с.
- Рециков М.А. Краткий очерк растительности Бурят-Монгольской АССР. Улан-Удэ: Бурят-Монгольское кн. изд-во, 1958. 94 с.
- Цешковская Е.А., Голубева Е.И., Цой Н.К., Оралова А.Т., Матонин В.В. Геоэкологические аспекты рекультивации нарушенных земель в Карагандинской области (Республика Казахстан) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2019. № 4. С. 73–80.
- Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Екимовская О.А., Beshentsev A.N. Economic geographical characteristics the development of economic entities owned by the population of the republic of Buryatia, *Geography and natural resources*, 2012, vol. 33, no. 2, p. 149–157.
- Электронные ресурсы*
- Алакоз В.В. Использование сельскохозяйственных земель в России. Тенденции в использовании пашни и кормовых угодий. Масштаб проблем // Аналитический вестник Совета Федерации Федерального Собрания РФ. 2016. № 24(623). С. 47–57. URL: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=34331704> (дата обращения 13.09.2023).
- Государственная программа эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации. 2023. URL: <http://www.base.garant.ru/400773886> (дата обращения 13.07.2023).
- О внесении изменений в Лесной кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации (Федеральный закон № 343-ФЗ от 24 июля 2023 г.). URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/49571> (дата обращения 10.09.2023).
- О внесении изменений в Федеральный закон «О мелиорации земель» (Федеральный закон № 477-ФЗ от 27 декабря 2019 г.). URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45017> (дата обращения 02.09.2023).
- О Правилах санитарной безопасности в лесах (постановление от 20.05.2017 г. № 607; с изменениями на 27 декабря 2018 г.). URL: <http://docs.cntd.ru/document/473800372> (дата обращения 03.07.2023).
- Шагайда Н.И. Вовлечение неиспользуемых земель в сельхозоборот: плохое качество институтов // Аналитический вестник Совета Федерации Федерального Собрания РФ. 2016. № 24(623). С. 66–76. URL: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=34331704> (дата обращения 13.09.2023).

Поступила в редакцию 26.09.2023

После доработки 23.11.2023

Принята к публикации 14.02.2024

CURRENT STATUS AND EFFICIENCY OF ABANDONED LANDS RE-DEVELOPMENT IN RIVER BASINS OF SOUTH-WESTERN TRANSBAIKALIA

O.A. Ekimovskaya¹, A.P. Gritsenyuk², A.A. Sorokovoj³, A.I. Shehovtsov⁴, A.P. Sizyh⁵

¹ Baikal Institute of Nature Management, SB RAS, Laboratory of Geoecology

^{2,5} Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, SB RAS, Laboratory of Ecosystems Bioindication

^{3,4} V.B. Sochava Institute of Geography, SB RAS

¹ Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: oafe@mail.ru

² Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: gap1958@mail.ru

³ Deputy Director of Scientific Research; Laboratory of Landscape Geochemistry and Soil Geography,
Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: geomer@irigs.irk.ru

⁴ Laboratory of Physical Geography and Biogeography, Leading Scientific Researcher,
Ph.D. in Geography; e-mail: ashekhov@mail.ru

⁵ Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Biology; e-mail: alexander.sizykh@gmail.com

Complex ecological and economic studies of post-agrarian landscapes in the middle reaches of the Selenga, Chikoy and Temnik rivers were carried out within the boundaries of the Selenga administrative region of the Republic of Buryatia (RB). A map of abandoned agricultural lands has been compiled. A brief description of agroclimatic conditions of the study area is given; the structure of agricultural land, the yield of grain and forage crops, the dynamics of livestock and the load of livestock on pastures and hayfields are analyzed. The reasons for the arable land abandonment are formulated. It was revealed that pastures and hayfields are not excluded from the agricultural use. This is due to an increase in the livestock numbers in households, which are the main agricultural producers in the RB, as well as a shortage of natural forage lands. The species composition and the state of shelterbelt forests are described as an integral part of the ecotopes of post-agrarian landscapes. The main taxonomic indicators of trees are given. The study of shelterbelt forests is topical due to the need for their inventory, lack of maintenance, and the adoption of Federal Laws on protective afforestation and land reclamation. A brief agrochemical description of the state of soils in key areas is given. To assess the effectiveness of arable land re-use, a net operating income (NOI) or rental income was calculated for each grain and grain-fodder crop grown in the region under study. It was revealed that oats and spring wheat are the most profitable. Recommendations were formulated for the re-development of post-agricultural landscapes, optimization of protective afforestation, and reconstruction of shelterbelt forests.

Keywords: post-agrarian landscapes, the Selenga River Basin, agricultural land use, re-development, efficiency, rental income, state of the environment, shelterbelt forests

Acknowledgments. The paper was prepared under state budget research under AAA-A21-121011990023-1, AAAA-A21-121012190055-7, AAAA-A17-117041910172-4, AAAA-0347-2016-0002, AAAA-A21-121012190059-5 themes.

REFERENCES

- Agroklimaticheskii spravochnik po Buryatskoi ASSR* [Agroclimatic handbook of the Buryat ASSR], Leningrad, 1960, 189 p. (In Russian)
- Aleksandrova N.A., Zharnikov V.B. Analiz ispol'zovaniya sel'skokhozyaistvennykh zemel' krest'yanskimi (fermerskimi) khozyaistvami v Selenginskom raione Respubliki Buryatiya [Analysis of the use of agricultural land by peasant (farmer) farms in Selenginsky raiona Respubliki Buryatiya], *Interesko Geo-Sibir'*, 2021, vol. 7, no. 1, p. 104–110. (In Russian)
- Asalkhanov I.V. *Sel'skoe khozyaistvo Sibiri kontsa XIX – nachala XX veka* [Agriculture of Siberia of the late XIX – early XX century], Novosibirsk, Nauka Publ., 1975, 165 p. (In Russian)
- Atlas Zabaikal'ya* [Atlas of Transbaikalia], akad. V.B. Sochava (ed.), Moscow, Irkutsk, GUGK, 1967, p. 10–11. (In Russian)
- Avessalomova I.A. Biogeohimicheskaja neodnorodnost' agrolandshaftov (na primere srednetaezhoj podzony juga Arhangel'skoj oblasti) [Biogeochemical heterogeneity of agrolandscapes (middle taiga subzone of the southern Arkhangelsk region as an example)], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2016, no. 3, p. 58–66. (In Russian)
- Belozertseva I.A., Ekimovskaya O.A., Enkhtaivan A. Ispol'zovanie sel'skokhozyaistvennykh zemel' i ikh degradatsiya na territorii basseina reki Selengi [Use of agricultural lands and their degradation in the territory of the Selenga River basin], *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2016, no. 2, p. 142–147. (In Russian)
- Boikov T.G., Ubugunov L.L., Kharitonov Yu.D. et al. Produktivnost', struktura i kachestvennyi sostav travostoya degradirovannykh poimennykh ostepennykh lugov basseina r. Selenga v zavisimosti ot agromeliorativnogo vozdeistviya [Productivity, structure and qualitative composition of the herbage of degraded floodplain meadows of the Selenga River basin depending on the agro-reclamation effect], *Agrokhiymiya*, 1995, no. 1, p. 30–42. (In Russian)

- Budaev Kh.R. [Forest reclamation fund, state and prospects of protective afforestation in Buryatia], *Lesnaya melioratsiya erodirovannykh pochv* [Forest amelioration of eroded soils], Ulan-Ude, Buryat. In-t estestvennykh nauk Buryatskogo filiala SO AN SSSR, 1982, p. 10–17. (In Russian)
- Budaev Kh.R. *Lesnaya zelenoj zony i ozelenenie gorodov i sel Burjatii* [Forests of the green zone and landscaping of cities and villages of Buryatia], Ulan-Ude, Burjat. kn. Publ., 1985, 152 p. (In Russian)
- Budaev H.R., Budaeva S.E., Dambiev E.Ts. *Zashhitnoe lesosozvedenie v Burjatskoj ASSR* [Protective afforestation in the Buryat ASSR], Ulan-Ude, Burjat. kn. Publ., 1984, 183 p. (In Russian)
- Ceshkovskaja E.A., Golubeva E.I., Coj N.K., Oralova A.T., Matonin V.V. Geoekologicheskie aspekty rekul'tivacii narushennykh zemel' v Karagandinskoj oblasti (Respublika Kazahstan) [Geoecological aspects of disturbed lands reclamation in the Karaganda region (the Republic of Kazakhstan)], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2019, no. 4, p. 73–80. (In Russian)
- Dan'shin A.I. Eksportnyj potencial agropromyshlennogo kompleksa Sibiri i Dal'nego Vostoka Rossii [Export potential of the agro-industrial complex of Siberia and the Far East of Russia], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2018, no. 4, p. 101–108. (In Russian)
- Dokuchaev V.V. *Sochinenija* [Essay], vol. 6, Preobrazovanie prirody stepej [Transformation of the nature of the steppes], Raboty po issledovaniju pochv i ocenke zemel', uchenie o zonal'nosti i klassifikacija pochv [Investigation of soils and land assessment, the concept of soil zonality and soil classification], 1888–1900, akad. L.I. Prisolov (ed.), Corr. member of the USSR Academy of Sciences I.V. Tyurin], Akademija nauk SSSR Publ., 1951, 596 p. (In Russian)
- Dokuchaev V.V. *Russkij chernozem* [Russian chernozem], Otchet Vol'nomu jekonomicheskomu obshhestvu [Report to the Free Economic Society], Introductory articles by Academician V.R. Williams and Dr. S.S. Sobolev, Second edition, Moscow, Agricultural State Publ., 1952, 636 p. (In Russian)
- Golovin A.V., Anikin A.S., Devyatkin V.A. Sovershenstvovanie norm kormleniya korov na osnove fiziologicheskikh potrebnosti [Improving cow feeding standards based on physiological needs], *Zootekhniya*, 2015, no. 10, p. 2–4. (In Russian)
- Golovin A.V., Nekrasov R.V., Anikin A.S. Osobennosti organizatsii polnotsennogo kormleniya vysokoproduktivnykh molochnykh korov [Improving cow feeding standards based on physiological needs], *Veterinariya, zootekhniya i biotekhnologiya*, 2018, no. 7, p. 93–100. (In Russian)
- Ekimovskaya O.A. Organizatsiya proizvoditel'nykh sil sel'skokhozyaistvennykh predpriyatij Respubliki Buryatiya [Organization of productive forces of agricultural enterprises of the Republic of Buryatia], 2003, *Geografiya i prirodnye resursy*, no. 1, p. 119–124. (In Russian)
- Ekimovskaya O.A. Ekonomiko-geograficheskie osobennosti razvitiya mnogoukladnogo sel'skogo khozyaistva Respubliki Buryatiya [Economic and geographical features of the development of multicultural agriculture of the Republic of Buryatia], *Geografiya i prirodnye resursy*, 2009, no. 4, p. 117–124. (In Russian)
- Ekimovskaya O.A., Beshentsev A.N. Economic geographical characteristics the development of economic entities owned by the population of the republic of Buryatia, 2012, *Geography and natural resources*, vol. 33, no. 2, p. 149–157.
- Ivanov G.M., Budaev Kh.R., Kokorin Yu.N. [Agroforestry zoning of the Buryat ASSR], *Lesnaya melioratsiya erodirovannykh pochv* [Forest amelioration of eroded soils], Ulan-Ude, Buryatskii institut estestvennykh nauk BF SO AN SSSR, 1982, p. 91–94. (In Russian)
- Namzhilova L.G., Tulokhonov A.K. *Evoljutsiya agrarnogo prirodopol'zovaniya v Zabaikal'e* [Evolution of agricultural nature management in Transbaikalia], Novosibirsk, Sibirskogo otdeleniya RAN Publ., 2000, 200 p. (In Russian)
- Reshchikov M.A. *Kratkii ocherk rastitel'nosti Buryat-Mongol'skoi ASSR* [A brief sketch of the vegetation of the Buryat-Mongolian ASSR], Ulan-Ude, Buryat-Mongol'skoe kn. Publ., 1958, 94 p. (In Russian)
- Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* [Classification and diagnostics of soils in Russia], Smolensk, Oikumena Publ., 2004, 342 p. (In Russian)
- Viktorov S.V., Vostokova E.A., Vyshivkin D.D. *Kratkoe rukovodstvo po geobotanicheskim semkam* [A quick guide to geobotanical surveys], Moscow, Mosk. un-ta Publ., 1959, 166 p. (In Russian)

Web sources

- Alakoz V.V. Ispol'zovanie sel'skokhozyaistvennykh zemel' v Rossii. Tendentsii v ispol'zovanii pashni i kormovykh ugodii. Masshtab problem [The use of agricultural land in Russia. Trends in the use of arable land and forage lands, The scale of the problems], *Analytical Bulletin of the Federation Council of the Federal Assembly of the Russian Federation*, 2016, no. 24(623), p. 47–57, URL: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=34331704> (data access 13.09.2023). (In Russian)
- Gosudarstvennaja programma jeffektivnogo вовлечения в оборот zemel' sel'skokhozyajstvennogo naznachenija i razvitiya meliorativnogo kompleksa Rossijskoj Federacii, 2023, URL: <http://www.base.garant.ru/400773886> (data access 13.07.2023).
- O Pravilah sanitarnoj bezopasnosti v lesah (postanovlenie ot 20.05.2017 no. 607; s izmenenijami na 27 dekabrja 2018 g.), URL: <http://docs.cntd.ru/document/473800372> (data access 03.07.2023).
- O vnesenii izmenenii v Lesnoi kodeks Rossijskoj Federatsii i otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federatsii (Federal'nyj zakon № 343-FZ ot 24 iyulya 2023 g.). URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/49571> (data access 10.09.2023).
- O vnesenii izmeneniy v Federal'nyj zakon "O melioratsii zemel'" (Federal'nyj Zakon no. 477-FZ, vnesenii izmenenij ot 27 dekabrja 2019 g.), URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45017> (data access 02.09.2023).
- Shagaida N.I. Vovlechenie neispol'zuemykh zemel' v sel'khozoborot: plokhoe kachestvo institutov [Involvement of unused land in agricultural turnover: poor quality of institutions], *Analiticheskii vestnik Soveta Federatsii Federal'nogo Sobraniya RF*, 2016, no. 24(623), p. 66–76, URL: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=34331704> (data access 13.09.2023). (In Russian)

Received 26.09.2023

Revised 23.11.2023

Accepted 14.02.2024

УСЛОВИЯ ПРОИЗРАСТАНИЯ И ВЫРАЩИВАНИЕ ДУБРАВ НА ПЛАКОРАХ И СКЛОНАХ ПРИВОЛЖСКОЙ И ЕРГЕНИНСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТЕЙ И РАВНИНАХ САЛО-МАНЫЧСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ

А.С. Манаенков

Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН

Зав. лабораторией защитного лесоразведения и фитомелиорации низкопродуктивных земель,
гл. науч. сотр., д-р с.-х. наук; e-mail: manaenkov1@yandex.ru

Искусственные дубравы на юге Европейской России имеют большое природоохранное и хозяйственное значение. Широкая практика их создания в сухой степи и полупустыне относится к 1950–1970-м гг. и позволяет формировать насаждения дуба (*Quercus robur* L.) долговечностью до 40–60 лет. Цель исследования – изучить особенности роста дубрав в разных почвенно-климатических, биоценологических условиях и разработать приемы повышения их долговечности.

Исследования проводились в 2011–2016 гг. на юге Приволжской, в северной части Ергенинской возвышенностях и низменных равнинах Сало-Маньчского междуречья на 28 временных пробных площадях с использованием общепринятых методов лесной таксации и регрессионного анализа данных.

Установлено, что ограничивают жизнеспособность дуба невыгодное положение насаждений в рельефе, повышенная сухость климата (КУ 0,4–0,6), высокое содержание почвенных карбонатов и близкое залегание горизонта их скопления, а также наличие кустарникового яруса, других конкурентов за влагу. В этих условиях преимущество должно получить облесение понижений на плакорах и теневых склонах чистыми культурами дуба и других пород без кустарника. Приемы их создания должны иметь свои модификации в зависимости от положения лесокультурной площади в рельефе местности и сухости климата.

Так, в понижениях основную обработку почвы можно проводить 1–2 года по системе черного пара с плантажной вспашкой. Целесообразны 3,5–4,0-метровые междурядья, частые агротехнические уходы, интенсивные прочистки в молодняках. Сформировавшиеся насаждения нуждаются в бережных санитарно-селективных рубках преимущественно низового типа с сохранением высокой сомкнутости лесного полога. Ухудшение влагообеспеченности и состояния насаждений здесь следует предупреждать устройством заград.

На плоских участках создают мелиоративные насаждения невысокой товарности по 2–3-летней и более глубокой основной обработке почвы. Обеспечивают рыхление карбонатного горизонта и формируют большой запас влаги. Целесообразны 2,5–3,0-метровые междурядья, ускоряющие смыкания культур. Площадь питания деревьев расширяют низко интенсивными равномерно-селективными рубками, формируя неплотно-сомкнутые насаждения.

Долговечность дуба в ранее созданных насаждениях повышают устранением его конкурентов: живого напочвенного покрова, кустарника, сопутствующих пород.

Ключевые слова: засушливый климат, типы каштановых почв, развитие культур дуба, приемы повышения долговечности

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.5

ВВЕДЕНИЕ

В защитном лесоразведении на зональных почвах засушливых областей Европейской России наиболее ценной породой издавна считается дуб черешчатый (*Quercus robur* L.) [Высоцкий, 1960а, 1960б; Степанов, 1949]. За продолжительный период лесокультурной практики и научных исследований изучены базовые лесоэкологические [Краевой, 1968; Качинский, 1971], агротехнические, лесокультурные [Высоцкий, 1960в; Кирюков, 1961; Титова, 1982; Трещевский, 1963; Краевой, 1968; Качинский, 1971], биоценологические и лесоводственные [Никитин, 1963; Боровинская, Григорьев, 1971;

Годнев и др., 1969; Годнев, 1978; Годнев, 1983] императивы создания и выращивания как полосных, так и массивных дубрав. Недостаточно широко использование этой породы в защитном лесоразведении в последнее время в основном объясняется трудоемкостью и относительной затратностью выращивания насаждений. Вместе с тем нерешенной остается проблема повышения долговечности как вновь создаваемых, так и утрачивающих жизнеспособность древостоев дуба разных периодов создания на типах каштановых почв сухой степи и полупустыни [Ерусалимский, Власенко, 2011; Ерусалимский, Власенко, 2012; Манаенков и др., 2012;

Манаенков и др., 2013; Манаенков, 2016], которая в большинстве случаев не превышает 40–60 лет. Очевидно, что она является результирующей сложного воздействия на устойчивость ростовых процессов и состояние деревьев различных совокупностей биоэкологических факторов [Каплина, Селочник, 2009; Каплина, Жиренко, 2012; Каплина, 2020; Манаенков, 2017] и нуждается в дополнительном изучении. Однако, несмотря на большую экологическую, ландшафтообразующую и рекреационно-хозяйственную ценность степных дубрав, в последней четверти XX в. в нашей стране произошло резкое сокращение работ по лесной мелиорации плакоров и склонов засушливой зоны. А вместе с этим – и научных исследований в искусственных дубравах.

Исследования за рубежом в основном посвящены изучению реакции роста дуба на изменение климата и оценке перспективы разведения дубрав в новых условиях [Gillner et al., 2013; Prolic, Goldblum, 2016; Perkins et al., 2018], а также решению частных агротехнических задач при их искусственном восстановлении [Castro et al., 2015; Woods et al., 2022].

Цель исследования – изучить особенности роста дубрав в разных почвенно-климатических и биоценологических условиях, разработать приемы повышения их долговечности.

ОБЪЕКТЫ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследований служили 30–60-летние чистые и смешанные насаждения дуба черешчатого «промышленных дубрав» и государственной лесной полосы Воронеж – Ростов-на-Дону на незасоленных и слабозасоленных, преимущественно тяжелосуглинистых почвах плакоров и склонов, расположенных на юге Приволжской возвышенности (Дубовский район Волгоградской области), западных отрогах Ергеней (Октябрьский, Котельниковский районы Волгоградской области и Сарпинский район республики Калмыкия) и низменных равнинах Сало-Манычского междуречья (Зимовниковский и Орловский районы Ростовской области). Климат территории континентальный засушливый. Норма осадков 300–400 мм/год, испаряемость 700–750 мм/год. Коэффициент увлажнения (КУ) 0,4–0,6. Почвы светло-каштановые, каштановые и темно-каштановые комплексные. Содержание физической глины в слое 0–150 см колеблется в пределах 41–61%, водорастворимых солей 0,05–0,15%, в том числе хлора 0,011–0,034%. Содержание карбонатов увеличивается вниз по профилю и составляет 5–50%. Глубина залегания горизонта их скопления изменяется от 45 до 115 см, а верхнего горизонта грунтовой воды 10–15 м и более. Продолжительность активного роста насаждений 35–60 лет.

Путем изучения материалов лесоустроительных отчетов 2004–2005 гг. и консультаций со специалистами лесничеств были получены предварительные сведения об истории создания, параметрах и местоположении островных и полосных дубрав на территории выбранного региона. Из них следует, что при создании насаждений дуба наибольшее распространение получили однолетнее парование почвы, квадратно-гнездовой и строчно-луночный способы посева желудей через 5–6 м между рядами, длительный период (12–15 лет) агротехнических уходов, а при введении кустарника между рядами дуба – периодическая (через 2–3 года) омолаживающая рубка кустов. Большим недостатком практики выращивания насаждений оказалась неполная обеспеченность несомкнувшихся культур уходами за почвой, а молодняков дуба – рубками ухода.

В процессе рекогносцировочного обследования подбирали различные по возрасту, состоянию и местоположению в рельефе насаждения с большим участием дуба (50–100%) в составе и шириной междурядий 2,5–6 м. Детальное описание насаждений, таксацию древостоя, отбор модельных деревьев проводили в 2011–2016 гг. с использованием общепринятых методов лесной таксации на 28 временных пробных площадях размером от 0,25 до 0,50 га, на которых имелось не менее 100 живых деревьев. Пробные площади закладывали в наиболее характерной части насаждений. На каждой пробной площадке методом перечислительной таксации определяли таксационные показатели древостоя и параметры среднего дерева. Отбирали и срубали по три модельных (средних) дерева с последующим инструментальным измерением линейного и радиального прироста древесины, осреднением данных. Строение почвенного профиля с отбором образцов на анализы изучали до глубины промачивания атмосферными осадками (1,5–2,0 м) методом бурового зондирования [Анучин, 2004; Родин, Мерзленко, 1984; Методика..., 1985].

Статистический анализ данных полевых наблюдений и материалов лабораторных исследований проводили на ЭВМ с использованием типовой программы STATGRAPHICS plus 5. Оценку уровня связи таксационных показателей и состояния древостоя с изучаемыми факторами – по Б.А. Доспехову [Доспехов, 1965]. Анализы образцов почвы на гранулометрический состав, наличие водорастворимых солей, содержание карбонатов выполнены почвенной лабораторией ФНЦ агроэкологии РАН (б. ВНИАЛМИ) по соответствующим методикам.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Таксационные характеристики, ход роста древостоев, физико-химические свойства почвы приве-

дены в ряде ранее опубликованных работ [Манаенков и др., 2012; Манаенков и др., 2013; Манаенков, 2016]. В результате анализ этих данных установлено, что на рост дуба в условиях дефицита атмосферного увлажнения большое влияние оказывают как экологические, так и лесокультурные, а в сформировавшихся насаждениях – биоценологические

факторы (табл.). Это влияние трансформируется с возрастом древостоя. Наиболее очевидные различия в развитии насаждений в схожих почвенно-климатических условиях накладывают их положение в рельефе местности и породный состав, особенно отсутствие или наличие значительной доли кустарника (30–50%), состояние напочвенного покрова.

Таблица

Регрессионный анализ хода роста дуба черешчатого в культурах на плакорах и склонах в сухостепной и полупустынной зонах ЕТР

Фактор	Средняя высота, м		Средний диаметр, см	
	<i>r</i>	<i>r</i> ²	<i>r</i>	<i>r</i> ²
<i>Насаждения без кустарника в понижениях: в 10 лет</i>				
Норма осадков, мм/год	0,04	0,2	-0,35	12,1
Густота древостоя, шт./га	-0,71	50,8	-0,46	21,1
Ширина междурядий, м	-0,58	33,7	0,46	21,2
Содержание физической глины, %	-0,24	5,9	0,46	21,5
Глубина залегания карбонатного горизонта, см	0,95	90,3	0,14	1,9
Содержание карбонатов, %	-0,57	32,0	-0,21	4,4
Содержание хлоридов, %	-0,11	1,2	-0,39	14,9
<i>В 20–30 лет</i>				
Норма осадков, мм/год	0,23...0,37	5,3...13,9	-0,71...-0,68	50,8...46,1
Густота древостоя, шт./га	-0,85...-0,77	72,5...58,5	-0,15...-0,19	2,2...3,4
Ширина междурядий, м	-0,49...-0,73	24,4...53,8	0,01...0,08	0,1...0,6
Содержание физической глины, %	-0,38...-0,59	14,2...34,3	0,63...0,57	39,2...32,2
Глубина залегания карбонатного горизонта, см	0,93...0,99	85,9...97,0	0,36...0,44	13,0...19,1
Содержание карбонатов, %	-0,37...0,35	13,5...12,1	-0,77...-0,80	59,1...63,9
Содержание хлоридов, %	0,08	0,7	-0,79	62,7
<i>В 40–50 лет</i>				
Норма осадков, мм/год	0,61...85	36,9...71,4	-0,69...-0,57	47,7...32,1
Густота древостоя, шт./га	-0,93...-0,93	85,6...86,1	-0,17...-0,27	3,1...7,2
Ширина междурядий, м	-0,53...-0,20	26,5...4,1	0,19...0,41	3,4...16,7
Содержание физической глины, %	-0,72...-0,81	51,2...66,4	0,67...0,64	44,8...40,7
Глубина залегания карбонатного горизонта, см	0,86...0,55	74,6...30,7	0,24...0,17	5,9...1,2
Содержание карбонатов, %	-0,02...0,42	0,1...17,7	-0,64...-0,40	41,0...16,1
Содержание хлоридов, %	0,48...0,77	23,0...59,4	-0,75...-0,60	56,5...36,5
<i>Насаждения с кустарником в понижениях: в 10 лет</i>				
Норма осадков, мм/год	0,80	64,1	0,42	17,6
Густота древостоя, шт./га	-0,09	0,9	-0,56	30,9
Ширина междурядий, м	0,22	5,0	-0,27	7,2
Содержание физической глины, %	0,50	25,4	0,86	73,1
Глубина залегания карбонатного горизонта, см	0,67	43,1	0,22	4,7
Содержание карбонатов, %	-0,25	6,3	-0,68	46,6
Содержание хлоридов, %	0,79	62,3	0,40	16,1

Фактор	Средняя высота, м		Средний диаметр, см	
	<i>r</i>	<i>r</i> ²	<i>r</i>	<i>r</i> ²
В 20–30 лет				
Норма осадков, мм/год	0,31...0,47	9,6...22,3	0,40...0,05	16,1...0,2
Густота древостоя, шт./га	–0,65...0,51	42,2...25,7	–0,57...–0,83	32,9...68,4
Ширина междурядий, м	–0,38...–0,21	14,5...4,5	–0,29...–0,061	8,4...37,2
Содержание физической глины, %	0,91...0,96	82,8...91,8	0,87...0,90	75,0...79,9
Глубина залегания карбонатного горизонта, см	0,10...–0,58	1,1...33,4	0,20...0,14	3,8...1,9
Содержание карбонатов, %	–0,76...–1,00	58,4...100,0	–0,70...–0,74	48,8...54,6
Содержание хлоридов, %	0,29...0,33	8,4...10,7	0,38...0,33	14,5...10,7
В 40–50 лет				
Норма осадков, мм/год	0,69...0,88	47,1...77,0	0,44...0,89	19,1...73,8
Густота древостоя, шт./га	–0,26...0,05	6,9...0,2	–0,54...0,01	29,1...0,1
Ширина междурядий, м	0,05...–0,70	0,3...48,9	–0,25...–0,06	6,2...0,4
Содержание физической глины, %	0,65...–0,96	41,8...91,1	0,85...–0,92	71,3...84,0
Глубина залегания карбонатного горизонта, см	0,52...0,94	26,6...87,5	0,24...0,61	5,6...37,2
Содержание карбонатов, %	–0,42...–0,72	17,3...51,4	–0,67...–1,00	44,7...99,2
Содержание хлоридов, %	0,67...1,0	45,1...99,2	0,42...0,97	17,...94,95
Насаждения без кустарника на пологих склонах и плоских участках: в 10 лет				
Норма осадков, мм/год	0,36	13,2	0,87	75,4
Густота древостоя, шт./га	–0,01	0,1	0,32	9,9
Ширина междурядий, м	–0,70	48,9	–0,06	0,4
Содержание физической глины, %	–0,96	91,1	–0,92	84,0
Глубина залегания карбонатного горизонта, см	0,94	87,5	0,61	37,2
Содержание карбонатов, %	–0,72	51,4	–1,00	99,2
Содержание хлоридов, %	1,00	99,2	0,97	94,9
В 20–30 лет				
Норма осадков, мм/год	0,40...0,60	15,7...35,7	0,92...0,85	84,0...72,2
Густота древостоя, шт./га	0,04...0,12	0,2...1,4	–0,03...0,21	0,1...4,2
Ширина междурядий, м	–0,67...–0,48	44,6...23,0	0,55...0,80	30,2...64,0
Содержание физической глины, %	–0,97...–1,00	93,4...99,9	–0,34...–0,11	11,7...1,8
Глубина залегания карбонатного горизонта, см	0,92...0,87	84,7...74,8	0,12...–0,22	1,5...4,7
Содержание карбонатов, %	–0,75...–0,88	55,8...76,9	–0,63...–0,51	39,1...25,5
Содержание хлоридов, %	1,00...0,99	98,5...98,5	0,36...–0,73	12,7...53,4
В 40–50 лет				
Норма осадков, мм/год	0,70...0,67	48,4...44,7	0,95...0,91	89,2...83,5
Густота древостоя, шт./га	–0,36...–0,37	12,7...13,7	0,13...–0,15	1,8...2,4
Ширина междурядий, м	–0,27...–0,31	7,2...9,5	0,62...0,32	38,3...10,1
Содержание физической глины, %	–0,73...–0,81	53,6...65,2	–0,09...–0,52	0,7...27,1
Глубина залегания карбонатного горизонта, см	0,82...0,85	67,2...71,7	0,18...0,37	3,3...13,7
Содержание карбонатов, %	–0,63...–0,71	39,4...50,1	–0,21...0,70	4,4...49,3
Содержание хлоридов, %	0,86...0,87	74,2...75,2	0,44...0,65	19,3...41,7

Окончание таблицы

Фактор	Средняя высота, м		Средний диаметр, см	
	<i>r</i>	<i>r</i> ²	<i>r</i>	<i>r</i> ²
Насаждения с кустарником на пологих склонах и плоских участках: в 10 лет				
Норма осадков, мм/год	-0,17	2,8	-0,88	76,8
Густота древостоя, шт./га	-0,65	41,8	0,17	2,8
Ширина междурядий, м	0,27	7,3	0,26	6,5
Содержание физической глины, %	-0,19	3,5	0,08	0,7
Глубина залегания карбонатного горизонта, см	0,12	1,3	-0,91	81,2
Содержание карбонатов, %	-0,47	21,3	-0,22	5,0
Содержание хлоридов, %	0,31	9,3	-0,38	14,3
В 20–30 лет				
Норма осадков, мм/год	0,66...0,97	43,5...93,7	-0,82...-0,70	65,1...49,2
Густота древостоя, шт./га	-0,37...0,16	13,4...2,5	-0,29...-0,27	8,4...7,4
Ширина междурядий, м	-0,19...-0,45	3,7...19,8	0,44...0,42	19,6...17,5
Содержание физической глины, %	-0,23...-0,13	5,4...1,7	-0,05...-0,06	0,2...0,3
Глубина залегания карбонатного горизонта, см	0,81...0,90	66,1...80,9	-0,65...-0,55	41,8...30,4
Содержание карбонатов, %	-0,04...0,43	0,1...18,1	-0,44...-0,37	19,0...13,9
Содержание хлоридов, %	0,50...0,58	25,2...33,3	0,27...0,40	7,4...15,9
В 40–50 лет				
Норма осадков, мм/год	0,98...0,90	95,6...80,4	-0,35...-0,02	12,3...0,1
Густота древостоя, шт./га	0,25...0,36	6,4...12,6	-0,09...0,21	0,8...4,2
Ширина междурядий, м	-0,63...-0,82	39,6...66,9	0,15...-0,19	2,4...3,7
Содержание физической глины, %	-0,27...-0,45	7,3...20,1	-0,21...-0,37	4,2...13,4
Глубина залегания карбонатного горизонта, см	0,93...0,88	86,0...77,6	-0,23...0,04	5,3...0,2
Содержание карбонатов, %	0,39...0,28	14,5...8,0	-0,19...0,03	3,4...0,1
Содержание хлоридов, %	0,52...0,42	27,4...17,9	0,70...0,90	49,6...81,6

Примечание: *r* – коэффициент корреляции, *r*² – коэффициент детерминации.

Так, в насаждениях без кустарникового подлеска, расположенных в понижениях местности, где обеспечивается дополнительное увлажнение почвы перераспределенной влагой осадков (снеговой, поверхностным стоком жидких осадков), норма атмосферных осадков, содержание физической глины и водорастворимых солей в суглинистой почве на рост дубков в высоту в первое десятилетие жизни практически не сказываются. Это обусловлено высокой влагообеспеченностью молодняка в этот период при проведении агротехнических уходов и наличия буферного запаса влаги в почве. Но повышенная густота гнезд и рядов, широкие междурядья и большое содержание карбонатов в почве заметно угнетают его (*r* = -0,71, -0,58 и -0,57). Очевидно, что широкие междурядья и большое содержание почвенных карбонатов приводят к повышению освещенности дубков и сокращению полезной влагоемкости их ризосферы. Прирост по диаметру в этом

возрасте, напротив, со средней силой ингибируют увеличение нормы осадков (*r* = -0,35) и высокая густота культур, наличие хлора в составе водорастворимых солей. Это вызвано тем, что с повышением увлажненности местообитания ускоряется и развитие дубков, раньше возникает эффект чрезмерной густоты культур. Угнетающее влияние хлоридов на рост дуба в толщину, по-видимому, проявляется во второй половине вегетации, при сильном иссушении верхнего слоя ризосферы густым молодняком и концентрации в ней солей.

С возрастом культур благотворное влияние повышенной суммы атмосферных осадков на их рост в высоту постепенно усиливается, достигая максимума в 40–50 лет (*r* = 0,61–0,85). Это свидетельствует о росте дефицита влагообеспеченности насаждений в связи с постепенным снижением сомкнутости лесного полога и задернением почвы степными травами. Относительно глубокое в понижениях залега-

ние карбонатного горизонта стимулирует развитие дуба в высоту на протяжении всей жизни ($r = 0,95-0,55$), а высокое содержание почвенных карбонатов по мере увеличения объема его ризосферы снижает свое негативное влияние. К 40 годам оно становится незаметным, а позднее положительным.

Повышенная густота древостоя дуба, напротив, сильно угнетает его рост в высоту до 50 лет ($r = -0,77...-0,93$), возможно, и дольше. А утяжеление состава почвы и увеличение ширины междурядий – после смыкания культур (в 20–30 лет $r = -0,73$), т. е. после значительного снижения проницаемости для осадков лесного полога и их увлажняющей эффективности, особенно в теплый период.

В понижениях на рост дуба в толщину со второго десятилетия жизни несколько усиливается негативное влияние повышенной нормы осадков ($r = -0,71...-0,57$), что можно объяснить высокой сохранностью и чрезмерной густотой молодняка в лучших условиях увлажнения, недостатком лесоводственных уходов. До 40 лет сдерживает этот рост и повышенное содержание в почве хлоридов ($r = -0,79...-0,75$), а также карбонатов ($r = -0,77...-0,64$), а ширина междурядий и глубина залегания карбонатного горизонта для роста дуба по диаметру в жердняках и средневозрастных насаждениях теряет свое значение ($r = 0,01-0,19$ и $0,36-0,24$). Напротив, с повышением содержания глины в верхнем 1,5-метровом слое средняя толщина его стволов в таких насаждениях увеличивается и свидетельствует о возрастающей роли перераспределенной влаги в их питании.

В насаждениях без кустарникового подлеска на пологих склонах и плоских участках местности, где выпадающая влага слабо перемещается по поверхности, повышение нормы атмосферных осадков, глубины залегания карбонатного горизонта и содержания хлоридов в почве (в нетоксичной концентрации) ускоряют рост культур дуба в высоту уже с первого десятилетия ($r = 0,36, 0,94$ и $1,00$). Роль последнего фактора мало понятна и нуждается в дополнительном изучении (возможно, что она связана с высокой потребностью молодых растений в элементах минерального питания и относительно высокой влажностью почвы в период проведения агротехнических уходов). Напротив, широкие междурядья, тяжелый состав почвы и повышенное содержание в ней карбонатов снижают среднюю высоту молодняка ($r = -0,70, -0,96$ и $-0,72$), а густота гнезд и рядов культур влияния на нее практически не оказывают.

Положительная связь нормы осадков и средней высоты насаждений с возрастом усиливается ($r = 0,40-0,70$), а с глубиной залегания карбонатного горизонта, которая на этих участках мало варьи-

рует, остается тесной на протяжении всего периода жизни ($r = 0,94-0,82$). Тяжелый состав почвы вследствие снижения эффективности теплых осадков, напротив, сильно сдерживает рост культур в высоту с первых лет до последних ($r = -0,96...-0,81$), а повышенное содержание в ней карбонатов – до 30 лет ($r = -0,72...-0,88$), и затем несколько снижает свое влияние (в 40 лет $r = -0,63$).

Средний диаметр стволов дуба в этих условиях в 10-летнем молодняке также имеет сильную положительную связь с нормой атмосферных осадков ($r = 0,87$), несколько меньшую – с глубиной залегания карбонатного горизонта ($r = 0,61$), а ширина междурядий на него не влияет. Заметно снижают толщину деревьев в молодняках тяжелый гранулометрический состав почвы и высокое содержание почвенных карбонатов ($r = -0,92$ и $-1,00$). Эти факторы в совокупности отрицательно влияют на увлажняющую эффективность осадков теплого периода, полезную влагоемкость ризосферы молодых культур и корнепроницаемость почвогрунта в слабо увлажненном состоянии. В этих условиях после 10 лет густота посевных гнезд и рядов на росте дуба в толщину сказывается слабо, что может быть следствием их сильного угнетения в засушливые годы и замедленного развития. Положительное влияние на него большей нормы осадков и ширины междурядий значительно усиливается (r до $0,95$ и $0,80$), а влияние гранулометрического состава суглинистой почвы и небольшой глубины залегания карбонатного горизонта становится почти незаметным. Однако большое содержание почвенных карбонатов продолжает угнетать рост дуба в толщину (r до $-0,70$).

В насаждениях с кустарником и в понижениях местности рост дубков в высоту уже в первом десятилетии сильно зависит от нормы осадков ($r = 0,80$). А в следующем – по-видимому, вследствие смыкания крон дуба и угнетения роста кустарника под его пологом – ее влияние становится слабее ($r = 0,31$). Однако в среднем и старшем возрасте оно снова становится значительным и достигает максимума в 40–50 лет ($r = 0,88$), когда сильно разреживается древостой дуба и лесной полог, снова усиливается развитие подлеска и напочвенного покрова – их конкуренция за влагу. До 30 лет хорошо проследивается и позитивное влияние на древостой утяжеления гранулометрического состава ризосферы (в 10 лет $r = 0,50$, в 30 лет $r = 0,96$), поскольку оно повышает влагоемкость и запас почвенной влаги за счет большей аккумуляции перераспределенных осадков. А угнетают в 10–20 лет рост дуба в высоту повышенная густота молодняка, широкие междурядья и большое содержание карбонатов в почве ($r = -0,65, -0,38$ и $-0,76$).

В древесно-кустарниковых насаждениях в понижениях местности радиальный прирост дуба до 20–30 лет также заметно стимулируют повышенная сумма осадков ($r = 0,40–0,42$) и тяжелый состав почвы ($r = 0,86–0,90$). А угнетают его – большая густота ($r = -0,56...-0,83$), высокое содержание почвенных карбонатов (r до $-0,70$) и широкие междурядья, в которых и развивается кустарниковый ярус (r до $-0,61$). В последующие десятилетия значение суммы атмосферных осадков увеличивается ($r = 0,44–0,86$), а состава почвы заметно уменьшается. Присутствие кустарника как сильного конкурента за почвенную влагу быстро снижает до незначительной величины влияние на радиальный прирост дуба и лесокультурных факторов (густоты древостоя, ширины междурядий).

В несомкнувшихся культурах с кустарником на пологих склонах и плоских участках местности рост дуба в высоту слабо детерминирован как экологическими, так и лесокультурными факторами, что является следствием нивелирующего влияния основной обработки почвы и агротехнических уходов. Тормозят его только повышенное содержание почвенных карбонатов ($r = -0,47$) и большая густота рядов ($r = -0,65$). Но уже после 10 лет резко увеличивается значение нормы осадков (с 10 до 20 лет $r = 0,66$, а в 30–40 лет $r = 0,98$) и глубины залегания карбонатного горизонта ($r = 0,81–0,93$), что свидетельствует о быстром увеличении дефицита влагообеспеченности дуба. После 30 лет заметно сдерживают рост в высоту тяжелый состав почвы ($r = -0,27...-0,45$) и, особенно, широкие междурядья ($-0,63...-0,82$), способствующие развитию кустарникового яруса.

Влияние тех же факторов на рост дуба в толщину носит здесь неочевидный характер. Заметное уменьшение среднего диаметра молодняка с повышением увлажненности территории и нивелирование этого различия с возрастом культур и ростом их сомкнутости может свидетельствовать об опережающем развитии кустарника (терна, жимолости татарской) в первые годы жизни насаждений как потребителя почвенной влаги. Об этом свидетельствует и ослабление после 30 лет стимулирующего влияния на толщину деревьев широких междурядий, ускоряющих снижение густоты древостоя и плотности лесного полога в среднем и старшем возрасте.

Небольшая глубина залегания карбонатного горизонта и высокое содержание почвенных карбонатов (небольшая влагоемкость почвы) в таких условиях в присутствии кустарника сильнее тормозят радиальный прирост дуба в первом десятилетии ($r = -0,91$), и только с 30 до 50 лет их значение постепенно нивелируется.

ВЫВОДЫ

Таким образом, анализ роста дуба, изучение насаждений на пробных площадях, а также опубликованные материалы ранее проведенных исследований позволяют сделать ряд выводов и предложений по совершенствованию приемов создания и повышения долговечности насаждений.

Так, очевидно, что в условиях сухой степи и полупустыни преимущество должны получить чистые бескустарниковые культуры дуба, способные формировать и длительное время сохранять умеренно ажурный лесной полог.

Наиболее технологичным и дешевым способом создания дубрав можно считать строчный и строчно-луночный посев желудей под зиму или ранней весной с последующими агротехническими уходами до возраста полного смыкания крон в междурядьях. Режимы агротехнических, лесокультурных и лесоводственных работ должны иметь свои модификации в зависимости от положения площади в рельефе и сухости климата.

В понижениях плакорного типа местности, где концентрируется перераспределенная влага атмосферных осадков, значение продолжительности и глубины основной обработки почвы снижается и может быть ограничено 1–2 годами (в зависимости от годовой нормы и обеспеченности осадками этих лет) содержания ее в черном пару после плантажной вспашки. При этом возрастает потребность в более частых агротехнических уходах. Интенсивный рост, дифференциация и ожидаемый габитус древостоя позволяют создавать здесь культуры с относительно широкими междурядьями (3,5–4,0 м) и проводить более ранние, частые и интенсивные прочистки в молодняках. Средневозрастные и старшего возраста (в 20–40...50 лет) древостои нуждаются в относительно частых и бережных санитарно-селективных рубках преимущественно низового типа, направленных на расширение площади питания деревьев при условии сохранения или быстрого восстановления высокой сомкнутости лесного полога, обеспечивающего эффективное отенение почвы и стволов дуба. Длительное сохранение сомкнутого полога является непременным условием его высокой долговечности. При возникновении опасности значительного естественного размыкания крон, жизнеспособность дубрав следует повышать своевременным формированием неплотного отеняющего подлеска из неконкурентной почвоулучшающей породы деревьев. В проточных понижениях значительное снижение влагообеспеченности культур с возрастом может быть демпфировано устройством простейших гидротехнических сооружений (запруд).

Облесение пологих склонов и плоских участков плакоров культурами дуба должно иметь главной

целью создание природоохранного и рекреационного каркаса территории, то есть насаждений невысокой товарной кондиции. При этом требуется 2–3-летняя и более глубокая безотвальная основная обработка почвы, направленная на разрыхление карбонатного горизонта и формирование большого страхового (буферного) запаса влаги (глубокое стартовое увлажнение зоны аэрации почвогрунта). В отличие от распространенного мнения, в этих условиях целесообразны менее широкие (2,5–3,0 м) междурядья, обеспечивающие ускорение смыкания культур, сокращение периода агротехнических уходов. Потребность насаждений в лесоводственных уходах возникает на несколько лет позже. Площадь питания деревьев расширяют путем периодического проведения менее интенсивных, чем в понижениях, равномерно-селективных рубок прочистки и прореживания. Актуальность этих мероприятий повышается с утяжелением состава почвы. Имеются основания полагать, что на слабо наклоненных и плоских участках более долговечными будут свое-

временно (до исчерпания буферного запаса влаги) изреженные неплотно сомкнутые насаждения. Они должны состоять из относительно невысоких деревьев с раскидистой кроной, обеспечивающей большую площадь питания и подавление развития конкурентного напочвенного покрова.

Перечисленные лесокультурные и лесоводственные приемы следует использовать и при создании насаждений других засухо- и солеустойчивых, потенциально долговечных и ценных в защитном лесоразведении пород, таких как ясень обыкновенный и ланцетный, груша лесная, клен полевой и др.

Для повышения долговечности ранее созданных и сохраняющих жизнеспособность насаждений дуба наиболее актуальными являются мероприятия, направленные на устранение его конкурентов за влагу: живого напочвенного покрова и подлеска в чистых насаждениях с широкими междурядьями, сопутствующих пород и подлеска в древесно-кустарниковых насаждениях, а также на формирование и сохранение сомкнутого лесного полога.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания ФНЦ агроэкологии РАН № 122020100309-0 «Теоретические основы, базовые принципы и технологии повышения эффективности защитного лесоразведения и комплексной фитомелиорации на деградированных, нарушенных и низкопродуктивных землях засушливой зоны России».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анучин Н.П.* Лесная таксация. М.: ВНИИЛМ, 2004. 552 с.
- Боровинская Л.Б., Григорьев В.Я.* Развитие древесных пород и корневых систем растений при совместном произрастании дуба обыкновенного с вязом перистоветвистым и дуба обыкновенного с ясенем пенсильванским // Полезащитное лесоразведение на каштановых почвах. М.: Изд-во МГУ, 1971. С. 158–179.
- Высоцкий Г.Н.* Степное лесоразведение // Избр. труды. М.: Сельхозгиз, 1960а. С. 295–340.
- Высоцкий Г.Н.* Об условиях лесопроизрастания и лесоразведения в степях Европейской России // Избр. труды. М.: Сельхозгиз, 1960б. С. 341–364.
- Высоцкий Г.Н.* Как сажать лес в наших степях и как за ним ухаживать // Избр. труды. М.: Сельхозгиз, 1960в. С. 410–429.
- Годнев Е.Д., Грачев А.Г., Никитин С.Н., Прокофьев В.Ф.* Из опыта создания дубрав в сухой степи Волгоградской области // Лесное хозяйство. 1969. № 4. С. 34–32.
- Годнев Е.Д.* Рубки ухода в дубовых насаждениях сухостепной зоны // Лесное хозяйство. 1978. № 8. С. 28–34.
- Годнев Е.Д.* О возможности создания дубравных массивов в сухих степях // Лесное хозяйство. 1983. № 8. С. 38–39.
- Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта. М.: Колос, 1965. 423 с.
- Ерусалимский В.И., Власенко А.А.* Опыт выращивания массивных дубрав в сухой степи // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию Всероссийского научно-исследовательского института агролесомелиорации. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2011. С. 309–311.
- Ерусалимский В.И., Власенко А.А.* Долговечность семенного (материнского) поколения степных дубрав // Лесное хозяйство. 2012. № 4. С. 32–33.
- Каплина Н.Ф., Селочник Н.Н.* Морфология крон и состояние дуба черешчатого в средневозрастных насаждениях лесостепи // Лесоведение. 2009. № 3. С. 32–42.
- Каплина Н.Ф., Жиренко Н.Г.* Динамика фитомассы листьев, состояния и развития крон деревьев нагорной дубравы юго-восточной лесостепи в неблагоприятных условиях последнего десятилетия // Вестник Поволжского гос. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2012. Вып. 2(16). С. 3–11.
- Каплина Н.Ф.* Составляющие динамики прироста ранней и поздней древесины ствола дуба черешчатого в нагорной дубраве южной лесостепи // Лесной журнал. 2020. № 5(337). С. 51–63.
- Кирюков Ю.Л.* Рост ложбинно-потыжинных насаждений, созданных П.А. Лукьяновым в Сальском лесничестве // Известия ВУЗов. Лесной журнал. 1961. № 3. С. 8–11.
- Краевой С.Я.* Защитное лесоразведение в полупустыне. М.: Лесная промышленность, 1968. 120 с.
- Качинский Н.А.* Основные выводы из работ комплексной экспедиции МГУ 1967–1968 гг. о причинах усыхания вяза мелколистного и некоторых других пород в каштановой зоне, приемы агротехники, обеспечивающие успешное выращивание полос в этой зоне // Полеза-

- щитное лесоразведение на каштановых почвах. М.: Изд-во МГУ, 1971. С. 218–225.
- Манаенков А.С., Костин М.В., Шкуринский В.А. Современное состояние и возможность выращивания дубрав промышленного значения на комплексных почвах сухой степи и полупустыне // Вестник Поволжского государственного университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2012. Вып. 2(16). С. 12–19.
- Манаенков А.С., Шкуринский В.А., Костин М.В. Особенности роста и долговечности насаждений «дубрав промышленного значения» на зональных почвах сухостепного Придонья // Вестник Поволжского гос. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2013. Вып. 2(18). С. 5–17.
- Манаенков А.С. Развитие основ степного и защитного лесоразведения: теоретические, прикладные аспекты и задачи в современных условиях // Вестник Поволжского гос. технологического ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2016. № 2(30). С. 5–23.
- Манаенков А.С. Закономерности водного режима, роста и долговечности искусственных древостоев в засушливых условиях // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2017. Вып. 221. С. 91–106.
- Методика системных исследований лесоаграрных ландшафтов / под ред. Е.С. Павловского и М.О. Долгилевича. М.: ВАСХНИЛ, 1985. 112 с.
- Никитин П.Д. Лесомелиоративные меры борьбы с засухами, суховеями и пыльными бурями // Вопросы полезащитного лесоразведения: материалы расширенного заседания ученого совета, посвященного тридцатилетию ВНИАЛМИ. Вып. 43. Волгоград: ВНИАЛМИ, 1963. С. 20–35.
- Родин А.Р., Мерзленко М.Д. Методические рекомендации по изучению лесных культур старших возрастов. М., 1984. 38 с.
- Степанов Н.Н. Степное лесоразведение. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1949. 159 с.
- Титова В.Г. Зависимость роста дуба черешчатого в лесных полосах от площади питания // Лесное хозяйство. 1982. № 9. С. 42–46.
- Трещевский И.В. Использование сельскохозяйственных культур при выращивании дуба гнездовым способом (по наблюдениям в Воронежской области) // Вопросы полезащитного лесоразведения: материалы расширенного заседания ученого совета, посвященного тридцатилетию ВНИАЛМИ. Вып. 43. Волгоград: ВНИАЛМИ, 1963. С. 102–110.
- Castro J., Leverkus A.B., Fuster F. A new device to foster oak forest restoration via seed sowing, *New Forests*, 2015, vol. 46, p. 919–929, DOI: 10.1007/s11056-015-9478-4.
- Gillner S., Vogt J., Roloff A. Climatic response and impacts of drought on oaks at urban and forest sites, *Urban Forestry & Urban Greening*, 2013, vol. 12, iss. 4, p. 597–605, DOI: 10.1016/j.ufug.2013.05.003.
- Prolic C., Goldblum D. Spatial and Temporal Patterns of Post Oak's Radial Growth-Climate Relationship, *Southeastern Geographer*, 2016, vol. 56, iss. 2, p. 171–186, DOI: 10.1353/sgo.2016.0027.
- Perkins D., Uhl E., Biber P. et al. Impact of Climate Trends and Drought Events on the Growth of Oaks (*Quercus robur* L. and *Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) within and beyond Their Natural Range, *Forest*, 2018, vol. 9, iss. 3, 108, DOI: 10.3390/f9030108.
- Woods M., Franken-berg S., Juodvalkis J. et al. Oak seedling performance and soil development across a forest restoration chronosequence following agriculture in the American Midwest – a greenhouse experiment, *Restoration Ecology*, 2022, vol. 30, iss. 5, DOI: 10.1111/rec.13587.

Поступила в редакцию 25.07.2023

После доработки 10.12.2023

Принята к публикации 14.02.2024

CONDITIONS OF THE OAK FORESTS GROWTH AND CULTIVATION ON THE TOP SURFACES AND SLOPES OF THE NEAR-VOLGA AND ERGENI UPLANDS AND THE PLAINS OF THE SAL-MANYCH INTERFLUVE

A.S. Manaenkov

Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of RAS

Head of the Laboratory of Protective Afforestation and Phytomelioration of Low Productive Lands, Chief Scientific Researcher; D.Sc. in Agriculture; e-mail: manaenkov1@yandex.ru

Planted oak forests in the south of European Russia are of great conservation and economic importance. The widespread practice of their creation in dry steppes and semi-deserts dates back to the 1950–1970s and allows to form oak (*Quercus robur* L.) plantations with longevity up to 40–60 years. The aim of the study is to investigate the growth features of oak trees under different soil-climatic and biocenotic conditions and to suggest methods to increase their longevity.

The research was carried out in 2011–2016 in the south of the Near-Volga Upland, the northern part of the Ergeni Upland and lowland plains of the Sal-Manych interfluve at 28 temporary sample plots using common methods of forest inventory and regression data analysis.

It has been established that the viability of oak is limited by unfavorable topographic position of plantations, increased climate dryness (HC 0,4–0,6), high content of soil carbonates and shallow-lying horizon of

their accumulation, as well as the presence of shrub layer and other competitors for moisture. Under these conditions, afforestation of depressions on the plains and shady slopes with pure plantations of oak and other species without shrubs should gain advantage. The methods of their creation should be modified depending on the topographic position of particular forest area and the climate dryness.

So, the main soil cultivation in depressions could last 1–2 years, applying the system of black fallow with plantation plowing. It is advisable to keep 3,5–4,0-meter row spacing, frequent tending, and intensive clearing of young tree stands. Maturer plantations need careful sanitary-selective cuttings, mainly the low-type ones, and preservation of high canopy density. Poor water availability and deterioration of plantations should be prevented by construction of dams.

Reclamation plantations of low marketability are created on flat areas after 2–3 years of deeper basic tillage. The carbonate horizon should be loosened and a large moisture reserve is needed. Row spacing of 2,5–3,0 meters is reasonable, accelerating the canopy closure. The area of tree nutrition is expanded by low-intensive uniformly selective cuttings, forming more open stands.

The longevity of oak in already existing plantations could be increased by eliminating its competitors, such as living ground cover, shrubs and associated species.

Keywords: arid climate, chestnut soil types, development of oak plantings, techniques for increasing the longevity

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the state task of the Federal Scientific Center of Agroecology of the Russian Academy of Sciences no. 122020100309-0 “Theoretical foundations, basic principles and technologies for increasing the efficiency of protective afforestation and integrated phytomelioration on degraded, disturbed and low-productive lands of the arid zone of Russia”.

REFERENCES

- Anuchin N.P. *Lesnaja taksacija* [Forest inventory], Moscow, VNIILM Publ., 2004, 552 p. (In Russian)
- Borovinskaja L.B., Grigor'ev V.Ja. [Development of tree species and root systems of plants in joint growth of common oak with pinnate elm and common oak with Pennsylvanian ash], *Polezashhitnoe lesorazvedenie na kashtanovyh pochvah* [Shelterbelt afforestation on chestnut soils], Moscow, Izd-vo MGU Publ., 1971, p. 158–179. (In Russian)
- Castro J., Leverkus A.B., Fuster F. A new device to foster oak forest restoration via seed sowing, *New Forests*, 2015, vol. 46, p. 919–929, DOI:10.1007/s11056-015-9478-4.
- Dospehov B.A. *Metodika polevogo opyta* [Methodology of field experience], Moscow, Kolos Publ., 1965, 423 p. (In Russian)
- Erusalimskij V.I., Vlasenko A.A. [Experience of growing massive oak trees in the dry steppe], *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, posvjashhennoj 80-letiju Vserossijskogo nachno-issledovatel'skogo instituta agrolesomelioracii* [Proc. of the international scientific and practical conference devoted to the 80 anniversaries of the All-Russian Research Institute of Agro-Forest-Amelioration], Volgograd, VNIALMI Publ., 2011, p. 309–311. (In Russian)
- Erusalimskij V.I., Vlasenko A.A. Dolgovechnost' semennogo (materinskogo) pokolenija stepnyh dubrav [Longevity of seed (maternal) generation of steppe oak forests], *Lesnoe hozjajstvo*, 2012, no. 4, p. 32–33. (In Russian)
- Gillner S., Vogt J., Roloff A. Climatic response and impacts of drought on oaks at urban and forest sites, *Urban Forestry & Urban Greening*, 2013, vol. 12, iss. 4, p. 597–605, DOI: 10.1016/j.ufug.2013.05.003.
- Godnev E.D. O vozmozhnosti sozdaniya dubravnyh massivov v suhih stepjah [On the possibility of creating oak woodlands in dry steppes], *Lesnoe hozjajstvo*, 1983, no. 8, p. 38–39. (In Russian)
- Godnev E.D. Rubki uhoda v dubovyh nasazhdenijah suhostepnoj zony [Thinning in oak forests of the dry-steppe zone], *Lesnoe hozjajstvo*, 1978, no. 8, p. 28–34. (In Russian)
- Godnev E.D., Grachev A.G., Nikitin S.N., Prokof'ev V.F. Iz opyta sozdaniya dubraav v suhoj stepi Volgogradskoj oblasti [From the experience of creating oak forests in the dry steppe of Volgograd region], *Lesnoe hozjajstvo*, 1969, no. 4, p. 34–32. (In Russian)
- Kachinskij N.A. [The main conclusions from the works of the 1967–1968 complex expedition of the Moscow State University on the causes of drying out of fine elm and some other species in the chestnut zone, methods of agrotechnics ensuring successful cultivation of strips in this zone], *Polezashhitnoe lesorazvedenie na kashtanovyh pochvah* [Shelterbelt afforestation on chestnut soils], Moscow, Izd-vo MGU Publ., 1971, p. 218–225. (In Russian)
- Kaplina N.F. Sostavljajushhie dinamiki prirosta rannej i pozdnej drevesiny stvola duba chereschatogo v nagornoj dubrave juzhnoj lesostepi [Components of the dynamics of early and late growth of the trunk of English oak in the upland oak forest of the southern forest-steppe], *Lesnoj zhurnal*, 2020, no. 5(337), p. 51–63. (In Russian)
- Kaplina N.F., Selochnik N.N. Morfologija kron i sostojanie duba chereschatogo v srednevozzrastnyh nasazhdenijah lesostepi [Crown morphology and the state of English oak in middle-aged forest-steppe plantations], *Lesovedenie*, 2009, no. 3, p. 32–42. (In Russian)
- Kaplina N.F., Zhirenko N.G. Dinamika fitomassy list'ev, sostojanija i razvitija kron derev'ev nagornoj dubravy jugovostochnoj lesostepi v neblagoprijatnyh uslovijah poslednego desjatiletija [Dynamics of phytomass of leaves, condition and development of crowns of trees of mountain oak forests of southeastern forest-steppe under unfavorable conditions of the last decade], *Vestn. Povolzhskogo gos. un-ta, Ser.: Les. Jekologija. Prirodopol'zovanie*, 2012, no. 2(16), p. 3–11. (In Russian)
- Kirjukov Ju.L. Rost lozhbinno-potjazhinnyh nasazhdenij, sozdannyh P.A. Luk'janovym v Sal'skom lesnichestve [The growth of ravine-gully plantings created by

- P.A. Lukyanov in the Sal forestry area], *Izvestija VUZov, Lesnoj zhurnal*, 1961, no. 3, p. 8–11. (In Russian)
- Краевой С.Я. *Zashhitnoe lesorazvedenie v polupustyne* [Protective afforestation in the semi-desert], Moscow, Lesnaja promyshlennost' Publ., 1968, 120 p. (In Russian)
- Manaenkov A.S. Razvitie osnov stepnogo i zashhitnogo lesorazvedenija: teoreticheskie, prikladnye aspekty i zadachi v sovremennyh uslovijah [Development of steppe and protective afforestation foundations: theoretical, applied aspects and tasks in modern conditions], *Vestn. Povolzhskogo gos. tehnologicheskogo un-ta, Ser.: Les. Jekologija. Prirodopol'zovanie*, 2016, no. 2(30), p. 5–23. (In Russian)
- Manaenkov A.S. Zakonomernosti vodnogo rezhima, rosta i dolgovечnosti iskusstvennyh drevostoev v zasushlivyh uslovijah [Regularities of water regime, growth and longevity of artificial stands under arid conditions], *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2017, no. 221, p. 91–106. (In Russian)
- Manaenkov A.S., Kostin M.V., Shkurinskij V.A. Sovremennoe sostojanie i vozmozhnost' vyrashhivaniya dubrav promyshlennogo znachenija na kompleksnyh pochvah suhoj stepi i polupustyne [Current status and possibility of growing oak trees of industrial importance on complex soils of dry steppe and semi-desert], *Vestn. Povolzhskogo gos. un-ta, Ser.: Les. Jekologija. Prirodopol'zovanie*, 2012, no. 2(16), p. 12–19. (In Russian)
- Manaenkov A.S., Shkurinskij V.A., Kostin M.V. Osobennosti rosta i dolgovечnosti nasazhdenij "dubrav promyshlennogo znachenija" na zonal'nyh pochvah suhostepnogo Pridon'ja [Features of growth and longevity of plantations of "industrial oak forests" on zonal soils of the dry-steppe Don Region], *Vestn. Povolzhskogo gos. un-ta, Ser.: Les. Jekologija. Prirodopol'zovanie*, 2013, no. 2(18), p. 5–17. (In Russian)
- Metodika sistemnyh issledovanij lesoagrarnykh landshaftov* [Methodology for systematic studies of forest-agrarian landscapes], E.S Pavlovskogo, M.O. Dolgilevicha (eds.), Moscow, VASHNIL Publ., 1985, 112 p. (In Russian)
- Nikitin P.D. [Forest reclamation measures against droughts, dry winds and dust storms], *Voprosy polezashhitnogo lesorazvedenija* [Problems of shelterbelt afforestation], materialy rasshirennogo zasedanija uchenogo soveta, posvjashhennogo tridcatiletiju VNIALMI, Volgograd, VNIALMI Publ., 1963, no. 43, p. 20–35. (In Russian)
- Perkins D., Uhl E., Biber P. et al. Impact of Climate Trends and Drought Events on the Growth of Oaks (*Quercus robur* L. and *Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) within and beyond Their Natural Range, *Forest*, 2018, vol. 9, iss. 3, DOI.org/10.3390/f9030108.
- Prolic C., Goldblum D. Spatial and Temporal Patterns of Post Oak's Radial Growth-Climate Relationship, *Southeastern Geographer*, 2016, vol. 56, iss. 2, p. 171–186, DOI: 10.1353/sgo.2016.0027.
- Rodin A.R., Merzlenko M.D. *Metodicheskie rekomendacii po izucheniju lesnyh kul'tur starshih vozrastov* [Methodological recommendations for the study of older forest crops], Moscow, 1984, 38 p. (In Russian)
- Stepanov N.N. Stepnoe lesorazvedenie. Izdanie chetvertoe [Steppe Forestry. Fourth Edition], Moscow, Leningrad, Goslesbumizdat Publ., 1949, 159 p. (In Russian)
- Titova V.G. Zavisimost' rosta duba chereshchatogo v lesnyh polosah ot ploshhadi pitanija [Dependence of growth of English oak in forest strips on the feeding area], *Lesnoe hozjajstvo*, 1982, no. 9, p. 42–46. (In Russian)
- Treshhevskij I.V. Ispol'zovanie sel'skohozjajstvennyh kul'tur pri vyrashhivanii duba gnezdovym sposobom (po nabljudenijam v Voronezhskoj oblasti) [Crop use in oak cultivation by the pocket method (based on observations in Voronezh Oblast)], *Voprosy polezashhitnogo lesorazvedenija* [Problems of shelterbelt afforestation], Materialy rasshirennogo zasedanija chеного soveta, posvjashhennogo tridcatiletiju VNIALMI, Volgograd, VNIALMI Publ., 1963, no. 43, p. 102–110. (In Russian)
- Vysockij G.N. [How to plant a forest within our steppes and how to take care of it (1930)], *Izbr. Trudy* [Selected works], Moscow, Sel'hozgiz Publ., 1960, p. 410–429. (In Russian)
- Vysockij G.N. [On the conditions of forest growth and afforestation in the steppes of European Russia], *Izbr. Trudy* [Selected works], Moscow, Sel'hozgiz Publ., 1960, p. 341–364. (In Russian)
- Vysockij G.N. [Steppe Afforestation], *Izbr. Trudy* [Selected works], Moscow, Sel'hozgiz Publ., 1960, p. 295–340. (In Russian)
- Woods M., Franken-berg S., Juodvalkis J. et al. Oak seedling performance and soil development across a forest restoration chronosequence following agriculture in the American Midwest – a greenhouse experiment, *Restoration Ecology*, 2022, vol. 30, iss. 5, DOI.org/10.1111/rec.13587.

Received 25.07.2023

Revised 10.12.2023

Accepted 14.02.2024

УДК 556.555.4:556.072

ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОДНОМЕРНОЙ МОДЕЛИ ОЗЕРА К ВХОДНЫМ ДАННЫМ

М.А. Терешина¹, О.Н. Ерина², Д.И. Соколов³

¹⁻³ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши*

¹ *Инженер; e-mail: martereshina@yandex.ru*

² *Зав. лабораторией, канд. геогр. наук; e-mail: oxana.erina@geogr.msu.ru*

³ *Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: dmitriy.sokolov@yandex.ru*

В работе рассматривается, насколько на адекватную работу модели термо- и гидродинамики озера влияет выбор источника метеорологических данных, используемых в качестве граничных условий, и изменение модельных калибровочных параметров. Приведены количественные оценки качества воспроизведения температурного режима малого озера одномерной моделью GLM при использовании данных автоматической метеостанции на берегу озера, государственной метеостанции и двух глобальных реанализов. Показано, что наилучшего результата моделирования (среднеквадратическая ошибка расчета температуры воды 0,8–2,0°C, критерий Нэша-Сатклифа >0,7) удастся достичь при использовании массивов данных, включающих прямое задание приходящих потоков коротковолновой и длинноволновой радиации. При этом для хорошего качества воспроизведения режима придонной температуры воды требуется правильное задание ветрового режима, возможное только при использовании данных инструментальных наземных наблюдений на стационарной метеостанции. Совмещение данных наземных наблюдений за скоростью ветра, температурой и влажностью воздуха с потоками радиации по данным глобальных реанализов позволяет достичь ошибки расчета $\leq 1^\circ\text{C}$ на всех глубинах.

Анализ чувствительности модели к калибровочным параметрам при использовании данных реанализа показал, что наибольшее влияние на итоговую ошибку расчета оказывают параметры, связанные с ветровым перемешиванием – поправочный коэффициент к скорости ветра и константы, связанные с внутримодельным описанием энергии ветрового воздействия. Изменение в ходе калибровки модельных констант интенсивности других типов перемешивания не приводит к направленному изменению количественных оценок качества моделирования. Целесообразным может быть также введение поправочных множителей к температуре воздуха и потокам солнечной радиации, которые могут скорректировать влияние нерепрезентативности используемых метеорологических данных для конкретного водоема, а также небольшая корректировка значения коэффициента экстинкции солнечной радиации относительно значения, полученного по прозрачности по диску Секки. Полученные результаты могут быть использованы для обоснования выбора источника метеорологических данных и оптимизации методик калибровки моделей термической стратификации водоемов.

Ключевые слова: лимнологическое моделирование, модель GLM, термический режим, источники метеорологических данных

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.6

ВВЕДЕНИЕ

Водный и термический режимы водоемов являются основой функционирования их экосистем, в связи с чем их изучению посвящено большое количество исследований на основе как обобщений натуральных данных, так и использования математических моделей [Ефремова и др., 2016; Здоровеннова и др., 2016; Основные..., 2021; Golub et al., 2019; Woolway et al., 2021]. Лимнологическое моделиро-

вание сегодня является незаменимым инструментом, позволяющим расширить представление о текущем состоянии и режиме водоемов и получить их прогнозные оценки при различных климатических и антропогенных воздействиях. Надежно откалиброванные и верифицированные модели тепло- и массопереноса являются необходимым базисом и при разработке любых экологических моделей озер [Меншуткин и др., 2013].

Любая модель водоема, даже ограничивающаяся воспроизведением его термогидродинамики, неизбежно включает в себя ряд неточностей и допущений, связанных с различными факторами. К основным источникам неопределенности в моделях озерных систем относятся неточность измеренных гидрометеорологических показателей, используемых в качестве граничных условий и материала для калибровки и верификации модели, и неполнота описания реальных процессов тепло- и массообмена в конкретной модели [Эдельштейн, Даценко, 1998; Li et al., 2015]. Ошибки, вносимые за счет выбора входных данных и структуры модели, в свою очередь приводят к снижению устойчивости любых модельных расчетов и получаемых прогнозных оценок [Wynne et al., 2023]. Поэтому важной задачей при работе с лимнологическими моделями является минимизация этих ошибок путем выбора наилучших из доступных источников данных.

Одномерные модели, требующие сравнительно небольшого объема натурных измерений и малых вычислительных мощностей, получили широкое распространение при изучении водоемов различных размеров [Stepanenko et al., 2010; Kirillin et al., 2011; Mesman et al., 2020]. При этом одномерная схематизация подразумевает сильное упрощение реальных физических процессов, по-разному реализуемое за счет использования различных расчетных схем, включающих в том числе и эмпирические коэффициенты [Petgoud et al., 2009], еще более снижающие определенность расчетов.

Отнести те или иные ошибки в работе модели к конкретному источнику неопределенности – сложная задача, реализуемая только при наличии достоверных данных наблюдений [Гладских и др., 2017; Rueda et al., 2009]. Поэтому во многих работах выводы о причинах неудовлетворительной сходимости результатов моделирования с натурными данными делаются умозрительно, без возможности выделения определенного источника ошибок на основе фактических данных.

Целью данной работы стала оценка чувствительности одномерной озерной термогидродинамической модели GLM (General Lake Model) к изменению как входных метеорологических данных, так и внутримодельных калибровочных параметров. Модель GLM разработана в Университете Западной Австралии в 2012 г. [Bruce et al., 2014] и в настоящее время является одной из наиболее широко используемых одномерных озерных моделей в мире. Использование различных доступных источников климатических данных – от прибрежной автоматической метеостанции до глобального реанализа погоды – и длительного ряда непрерывных наблюдений за температурой воды в малом озере должно

позволить получить представление о том, насколько возможно избежать существенных ошибок моделирования путем оптимизации самой модели и выбора определенного типа исходных гидрометеорологических данных.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Модель GLM. Все расчеты проводились в одномерной модели водного баланса и стратификации озер GLM. Данная модель воспроизводит изменение вертикального температурного профиля путем расчета потенциальной и кинетической энергии для однородных по плотности слоев, не привязанных к регулярной вертикальной сетке, т. е. применяет подход Лагранжа к моделированию движения среды. В модели учитываются поверхностный теплообмен, конвективное и ветровое перемешивание, воздействие притоков и оттока воды, теплообмен с дном и ледовые явления. В настоящей работе использовался шаг расчета один сутки. Уравнение энергетического баланса для поверхностного однородного слоя модели описывается уравнением

$$\frac{c_p}{A_s z_{sml}} \frac{dT_s}{dt} = \phi_{SW} - \phi_E + \phi_H + \phi_{LW_{in}} - \phi_{LW_{out}}, \quad (1)$$

где c_p – удельная теплоемкость воздуха (1005 Дж/(кг·К)), A_s и z_{sml} – площадь водной поверхности и толщина верхнего перемешанного слоя, dT_s/dt – изменение температуры поверхности воды, ϕ_{SW} , $\phi_{LW_{in}}$ и $\phi_{LW_{out}}$ – потоки приходящей коротковолновой радиации, длинноволнового излучения атмосферы и собственного теплового излучения озера, ϕ_E и ϕ_H – потоки скрытого и явного тепла, рассчитываемые по аэродинамическим балк-формулам. Скорость заглубления перемешанного слоя dz_{sml}/dt определяется путем сопоставления доступной кинетической (ТКЕ) и потенциальной (РЕ) энергии слоя, рассчитываемым по уравнениям (2) и (3):

$$\begin{aligned} \text{ТКЕ} = & \left\{ 0,5 C_K w_*^3 \Delta t \right\}_{[1]} + \left\{ 0,5 C_K C_W u_*^3 \Delta t \right\}_{[2]} + \\ & + \left\{ 0,5 C_S \left(u_b^2 + \frac{u_b^2}{6} \frac{d\xi}{dz_{sml}} + \frac{u_b \xi}{3} \frac{du_b}{dz_{sml}} \right) \right\}_{[3]} \Delta z_{k-1}, \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{РЕ} = & \left[\left\{ 0,5 C_T (w_*^3 + C_W u_*^3)^{2/3} \right\}_{[4]} + \left\{ \frac{\Delta p}{\rho_0} g z_{sml} \right\}_{[5]} \right] + \\ & + \left\{ \frac{g \xi^2}{24 \rho_0} \frac{d(\Delta p)}{dz_{sml}} + \frac{g \xi \Delta p}{12 \rho_0} \frac{d\xi}{dz_{sml}} \right\}_{[6]} \Delta z_{k-1}, \quad (3) \end{aligned}$$

где компоненты в расчете кинетической энергии соответствуют вкладу конвективного (1) и ветрового (2) перемешивания и образования трения между слоями и неустойчивости Кельвина–Гельм-

гольца (3), а компоненты в расчете потенциальной энергии – вкладу динамического ускорения (4), гидростатического подъема (5) и устранения неустойчивости Кельвина–Гельмгольца (6). C_K , C_W , C_S , C_T являются константами интенсивности разных типов перемешивания; u_* и w_* – эффективная скорость верхнего перемешанного слоя в горизонтальном и вертикальном направлениях; u_b – сдвиг скорости на границе перемешанного слоя, ξ – масштаб длины волн Кельвина–Гельмгольца; z_{k-1} – отметка нижней границы верхнего перемешанного слоя; ρ и ρ_0 – плотности воды и воздуха. Более подробно уравнения модели описаны в руководстве по использованию модели [Hipsey et al., 2014].

Морфометрические особенности водоема в модели учитываются путем задания кривой площадей. Для учета внешнего водного баланса необходимо задание ежесуточных расходов воды притоков и оттока воды из водоема. К метеорологическим данным, необходимым в качестве граничных условий, относятся температура и относительная влажность воздуха, скорость ветра, сумма атмосферных осадков и данные о приходящей коротковолновой солнечной радиации и длинноволновом излучении атмосферы. При отсутствии актинометрических наблюдений возможен внутримодельный расчет хода

коротковолновой радиации по модели безоблачного неба и данным об общей облачности, а также расчет длинноволновой радиации по ходу температуры и влажности воздуха и облачности.

В структуру модели входит ряд изменяемых параметров, которые могут использоваться для ручной или автоматической калибровки. К ним относятся коэффициент экстинкции фотосинтетически активной радиации (ФАР) K_w , константы интенсивности различных типов перемешивания (конвективного, ветрового и др.) и поправочные множители к метеорологическим параметрам, позволяющие в некоторой мере компенсировать нерепрезентативность используемых климатических данных. Рассмотренные в настоящей работе параметры модели приведены в таблице 1. Все они являются эмпирическими, границы изменения их значений в ходе калибровки и анализа чувствительности были приняты таким образом, чтобы охватить весь диапазон их изменчивости, обобщенный создателями модели по результатам обзора литературы [Hipsey et al., 2014]. Для коэффициента K_w было принято начальное значение 0,5 и пределы изменчивости от 0,01 до 2, исходя из данных об измеренной прозрачности воды за период наблюдений.

Таблица 1

Основные калибровочные параметры модели GLM на объектах исследования

Название параметра в файлах модели	Физический смысл параметра	Значение параметра по умолчанию	Принятый в работе диапазон изменения
K_w	Коэффициент экстинкции фотосинтетически активной радиации	–	0,01–2
Коэффициенты перемешивания и теплопереноса			
<i>coef_mix_conv</i>	Константы интенсивности: – конвективного перемешивания	0,2	0,01–1
<i>coef_wind_stir</i>	– ветрового перемешивания	0,23	0,01–1
<i>coef_mix_shear</i>	– трения между слоями	0,3	0,01–1
<i>coef_mix_turb</i>	– нестационарной турбулентности	0,51	0,01–1
<i>coef_mix_kh</i>	– образования волн Кельвина–Гельмгольца	0,3	0,01–1
<i>coef_mix_hyp</i>	– перемешивания в гипolimнионе	0,5	0,01–1
<i>ce</i>	Коэффициент влагообмена	0,0013	0,0001–0,003
<i>ch</i>	Коэффициент теплообмена	0,0013	0,0001–0,003
<i>cd</i>	Коэффициент ветрового сопротивления	0,0013	0,0001–0,003
Поправочные множители к метеорологическим параметрам			
<i>wind_factor</i>	– к скорости ветра	1	0,1–2
<i>sw_factor</i>	– к коротковолновой радиации	1	0,1–2
<i>lw_factor</i>	– к длинноволновой радиации	1	0,1–2
<i>at_factor</i>	– к температуре воздуха	1	0,1–2
<i>rh_factor</i>	– к относительной влажности	1	0,1–2
<i>rain_factor</i>	– к суммам осадков	1	0,1–2

Объект исследования. В качестве модельного водоема было выбрано озеро Глубокое ($55,7530^\circ$ с. ш. $36,5043^\circ$ в. д.) – небольшой естественный водоем, расположенный на западе Московской области (рис. 1). Озеро имеет площадь поверхности $0,6 \text{ км}^2$ и максимальную глубину около 30 м, не имеет русловых притоков, внутригодовые колебания уровня воды не превышают 0,5 м. По трофическому статусу озеро Глубокое относится к мезотрофному типу, характеризуется пониженным содержанием растворенных веществ, что исключает существенное влияние минерализации и биоты на плотность воды и режим перемешивания. В течение около пяти месяцев в году в озере устанавливается устойчивая прямая температурная стратификация. В период с мая 2018 г. по ноябрь 2022 г. в наиболее глубоководной части озера действовала буйковая станция с автоматическими датчиками Onset HOBO Pendant, ежедневно фиксирующими температуру воды на глубинах 0,5, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 20 и 26 м. Цепь с логгерами обычно устанавливали только в безледный период, за исключением зимы 2020–2021 гг. (табл. 2). Таким образом, были получены ежесуточные вертикальные профили температуры воды для пяти летних сезонов, охватывающих, как правило, весь период от начала формирования до разрушения прямой температурной стратификации, и одной зимы.

Таблица 2

Используемые источники данных для калибровки и верификации модели

Источник данных	Продолжительность наблюдений, дата
Логгеры температуры воды	14.05.2018–01.11.2018 26.04.2019–15.11.2019 11.07.2020–23.05.2021 15.06.2021–14.11.2021 04.05.2022–04.11.2022
АМС на оз. Глубоком	22.10.2017–16.06.2019
М/ст. Можайск	22.10.2017–31.12.2022
Реанализ NCEP/DOE	22.10.2017–31.12.2022
Реанализ 20CRv3-ERA5	22.10.2017–31.12.2021

Источники метеорологических данных. Для оценки влияния метеорологических данных, используемых в качестве модельного форсинга, на качество воспроизведения термического режима озера были выбраны несколько источников информации. Первый из них – автоматическая метеостанция, установленная на берегу озера менее чем в 100 м от уреза воды и оснащенная датчиками температуры и влажности воздуха, скорости ветра, количества жидких осадков и приходящей коротковолновой радиации. Второй источник данных – государственная метео-

станция в г. Можайск (примерно в 40 км к юго-западу от озера), наблюдения на которой включают в себя инструментальные измерения температуры и влажности воздуха, скорости ветра, количества атмосферных осадков и балла облачности. Третий и четвертый источники данных – глобальные атмосферные реанализы, предоставляющие все необходимые данные, включая потоки приходящей на поверхность земли коротковолновой и длинноволновой радиации, рассчитанные по регулярной сетке географических координат: NCEP/DOE Reanalysis II (пространственное разрешение $1,905 \times 1,875^\circ$) и 20CRv3-ERA5 (пространственное разрешение $0,6 \times 0,6^\circ$). Выбранные реанализы находятся в открытом доступе, реанализы NCEP [Kanamitsu et al., 2002] и ERA5 [Hersbach et al., 2020] являются наиболее используемыми в мире, а комбинация 20CRv3-ERA5 [Compo et al., 2011; Slivinski et al., 2019] используется в качестве форсинга за исторический период в работах проекта ISIMIP. Данные реанализов были пересчитаны к географическим координатам озера путем линейной интерполяции между ближайшими узлами сетки.

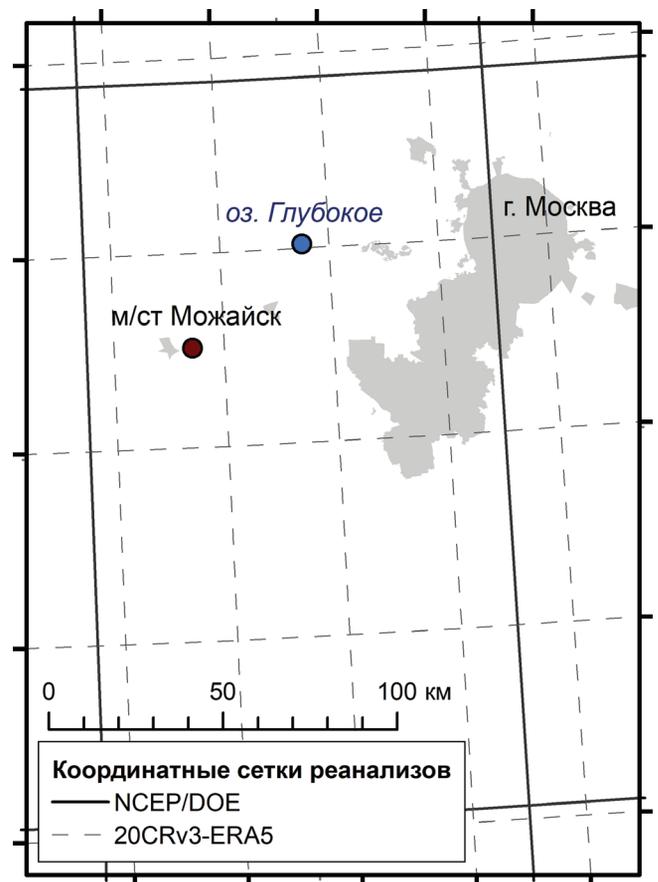


Рис. 1. Расположение оз. Глубокого и пространственная привязка основных используемых источников метеоданных

Fig. 1. Location of the Lake Glubokoe and spatial reference of the main meteorological data sources in use

Оценка чувствительности модели к входным данным и калибровочным параметрам. На первом этапе работы была оценена эффективность адаптации модели к условиям озера в зависимости от используемого набора входных метеорологических данных. Для этого было подготовлено несколько массивов граничных условий: четыре исходных ряда, относящихся к каждому из исходных источников метеоданных, а также пять дополнительных рядов на основе данных наземных метеостанций, дополненных информацией о приходящей солнечной радиации из реанализов либо данными об облачности.

Для каждого из полученных рядов метеоданных была произведена автоматическая калибровка модели методом случайного поиска, реализованная в пакетах *glmtools* и *FME* на языке программирования R. Калибровка проводилась по периоду, охваченному данными всех четырех источников: с 22 октября 2017 г. (осенняя гомотермия) до 16 июня 2019 г. (окончание работы автоматической метеостанции). Для вариантов калибровки, не основанных на данных автоматической метеостанции, также проводилась верификация на оставшемся периоде наблюдений. Использовались несколько вариантов калибровки: в самом простом случае изменялась только величина $K_{пр}$ в последующих вариантах к ней последовательно добавлялись также поправки к метеоданным и внутримодельные коэффициенты перемешивания (см. табл. 1).

По результатам калибровки и верификации оценивались количественные характеристики качества моделирования: среднеквадратическая ошибка расчета температуры воды (RMSE) и критерий Нэша-Сатклиффа (NSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (T_{\text{факт}} - T_{\text{мод}})^2}{n}}, \quad (4)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum (T_{\text{факт}} - T_{\text{мод}})^2}{\sum (T_{\text{факт}} - \bar{T}_{\text{факт}})^2}, \quad (5)$$

где $T_{\text{факт}}$ – измеренная температура воды, $T_{\text{мод}}$ – рассчитанная в модели температура воды, n – длина ряда. Наилучшему качеству моделирования соответствуют низкие значения RMSE и наивысшие значения NSE. В качестве критерия хорошего качества моделирования было принято значение $NSE \geq 0,70$ [Mogias et al., 2007].

После выбора наилучшего из источников метеоданных была проведена количественная оценка чувствительности модели к калибровочным параметрам. Для этого была выбрана модель, адаптированная к озеру на основе оптимального массива

метеоданных, после чего значения всех калибровочных параметров по очереди изменялись в назначенных пределах (см. табл. 1) и фиксировалось изменение ошибок расчета.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Различия между массивами метеорологических данных. Все массивы данных в целом адекватно описывают ход метеорологических параметров в течение выбранного периода, однако между ними могут возникать существенные различия (табл. 3). Наибольшая сходимость между рядами отмечается для температуры воздуха, ход которой повторяется во всех массивах данных почти идентично: расхождение между разными источниками в 47% случаев находится в пределах $\pm 1^\circ\text{C}$, среднее расхождение между рядами составляет $0,2-0,6^\circ\text{C}$, хотя максимальное достигает $7-12^\circ\text{C}$.

Сезонные и синоптические циклы коротковолновой радиации также имеют высокую сходимость между тремя доступными источниками, хотя средние значения ее потока заметно отличаются: по данным автоматической метеостанции на земную поверхность за рассматриваемый период поступало в среднем 94 Вт/м^2 , по данным реанализа 20CRv3-ERA5 – 114 Вт/м^2 , по данным NCEP/DOE – 145 Вт/м^2 . Это может быть связано в случае метеостанции – с ее затенением растительностью, а в случае реанализов – с осреднением по достаточно грубой сетке координат. Меньшие различия отмечаются между оценками потоков длинноволнового излучения атмосферы по данным двух реанализов – средние их величины за период расчета составили 297 и 274 Вт/м^2 для реанализов 20CRv3-ERA5 и NCEP/DOE соответственно. Измерения относительной влажности по датчику автоматической метеостанции характеризуются заметно меньшим разбросом значений, чем показания метеостанции г. Можайска и реанализов, а реанализ NCEP/DOE завышает значения влажности по сравнению с другими источниками в зимне-весенний период. Все эти показатели определяют большую часть внешнего теплообмена водоема [Остроумова и др., 2009], вследствие чего описанные различия влияют на результат модельного расчета, в первую очередь – на температурный режим поверхностного слоя и среднюю температуру воды в водоеме.

Скорости ветра, играющие решающую роль при расчете интенсивности динамического перемешивания [Гречушникова, 2004], во многих случаях имеют различный синоптический ход по разным использованным источникам данных, а также обнаруживают систематические расхождения. Так, средняя скорость ветра по данным автоматической метеостанции за период наблюдений составляла $0,6 \text{ м/с}$, по

данным метеостанции в г. Можайск за тот же период – 2,1 м/с, по данным реанализа 20CRv3-ERA5 – 3,5 м/с, реанализа NCEP/DOE – 5,4 м/с. Расхождения в величинах и динамике скорости ветра влияют на качество воспроизведения глубины термоклина и

температурного режима поверхностного и среднего слоев водной толщи в летний период, а также определяют продолжительность периодов весеннего и осеннего перемешивания и температуру придонного слоя в начале установления стратификации.

Таблица 3

Коэффициенты парной корреляции между рядами характеристик из различных источников метеорологических данных

	Температура воздуха			Скорость ветра			Относительная влажность			Коротковолновая радиация		Длинноволновая радиация
	Глубокое	Можайск	20CRv3-ERA5	Глубокое	Можайск	20CRv3-ERA5	Глубокое	Можайск	20CRv3-ERA5	Глубокое	20CRv3-ERA5	20CRv3-ERA5
Можайск	0,99			0,59			0,86			–		
20CRv3-ERA5	0,98	1,00		0,49	0,84		0,84	0,96		0,91		
NCEP/DOE	0,98	0,99	0,99	0,47	0,82	0,93	0,60	0,66	0,63	0,89	0,95	0,91

Влияние используемых метеоданных на качество моделирования. Калибровка модели с использованием разных массивов метеорологических данных в качестве форсинга показала широкий разброс качества моделирования (табл. 4, рис. 2). Среди четырех исходных рядов метеоданных наихудший результат получен при расчетах с использованием данных автоматической метеостанции на оз. Глубокое: при вариантах калибровки, не корректирующих никакие метеопараметры, кроме скорости ветра, среднеквадратическая ошибка расчета температуры воды по этому источнику метеоданных составляет до 3,8–7,7°C, значение критерий Нэша-Сатклиффа не превышает 0,6. Хорошего результата калибровки (RMSE 1,7–2,0°C, NSE > 0,9) удалось достичь только при введении поправок ко всем метеорологическим параметрам (в первую очередь – повышающих коэффициентов для скорости ветра и коротковолновой радиации и понижающего – для длинноволновой радиации). При этом воспроизведение поверхностной и придонной температуры воды оказывается неудовлетворительным (чаще всего с отрицательными величинами NSE), за счет чего данные автоматической метеостанции проигрывают остальным источникам даже при наиболее тщательной калибровке.

Данные метеостанции в г. Можайск позволяют более адекватно адаптировать модель к выбранному водоему, хотя в некоторых случаях ошибка расчета остается достаточно высокой: величина RMSE

по результатам валидации при всех вариантах калибровки составляет 1,9–4,7°C, величина NSE при оценке по всем горизонтам составляет 0,3 при калибровке только по $K_{\text{пр}}$ и превышает 0,7 во всех остальных случаях. Откалиброванная на данных метеостанции модель способна удовлетворительно воспроизвести ход поверхностной температуры, но существенно ошибается в определении глубины и градиента температуры в термокline, за счет чего сильно снижается качество моделирования в целом. Здесь также отмечаются отрицательные значения NSE при оценке качества воспроизведения придонной температуры воды.

Использование обоих реанализов позволяет достичь хорошего качества моделирования даже при минимальной калибровке, не затрагивающей метеорологические параметры: величина RMSE по всем горизонтам для этих массивов данных не превышает 2,7°C, оценка NSE для всех горизонтов, кроме придонного, всегда превышает 0,8, для поверхностного слоя – близка к 1. Несколько лучшего результата позволяет достичь расчет по данным реанализа 20CRv3-ERA5, что может быть связано с его более высоким пространственным разрешением, однако различия между этими источниками данных малы по сравнению с разницей с наземными наблюдениями. В то же время для придонного горизонта значений $\text{NSE} \geq 0,7$ удается достичь только в некоторых случаях, хотя ошибка расчета придонной температуры часто не превышает 1°C).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что важное значение для расчета термического режима водоема имеет задание радиационного баланса его поверхности [Гречушников, Эдельштейн, 2012]. Использование массивов данных с прямым заданием потоков приходящей солнечной радиации позволяет достичь наиболее высокой сходимости модельных расчетов с данными наблюдений. При этом актинометрические данные автоматической метеостанции требуют корректировки. В данном случае ключевой причиной нерепрезентативности величины приходящей радиации, фиксируемой метеостанцией, могут являться технические ошибки при ее установке

и эксплуатации: затенение датчиков окружающей растительностью, неправильное их расположение и отсутствие поддержания работоспособности в течение периода измерений. При этом погрешности актинометрических датчиков станции могут иметь переменный характер, в связи с чем их коррекция линейными методами может быть затруднительна. Поэтому при отсутствии возможности тщательного поддержания актинометрических датчиков в приемлемом состоянии предпочтительным представляется использование сеточных данных реанализов или климатических моделей даже при их грубом пространственном разрешении.

Таблица 4

Результаты верификации модели, откалиброванной по различным метеоданным

Источник метеоданных	Вариант калибровки					
	1 Только K_w	2 K_w + скорость ветра	3 K_w + параметры перемешивания	4 K_w + скорость ветра + параметры перемешивания	5 K_w + все поправки к метеоданным	6 K_w + все поправки к метеоданным + параметры перемешивания
Глубокое*	<u>7,7</u> 9,8/0,8	<u>4,9</u> 4,9/4,3	<u>6,2</u> 13,0/0,7	<u>3,8</u> 8,0/0,7	<u>1,7</u> 2,8/0,6	<u>2,0</u> 3,5/0,6
Можайск	<u>4,7</u> 7,8/1,1	<u>3,0</u> 4,3/1,8	<u>2,4</u> 3,4/1,2	<u>2,1</u> 2,4/1,4	<u>2,3</u> 2,8/1,5	<u>1,9</u> 2,4/0,8
20CRv3-ERA5	<u>1,4</u> 1,3/1,2	<u>0,9</u> 1,0/0,6	<u>1,0</u> 1,0/0,8	<u>1,2</u> 1,2/0,7	<u>2,7</u> 1,5/1,3	<u>1,3</u> 1,4/0,8
NCEP/DOE	<u>2,0</u> 1,3/1,9	<u>1,6</u> 1,7/1,7	<u>1,4</u> 1,4/0,6	<u>1,4</u> 1,4/1,3	<u>1,3</u> 1,4/1,2	<u>1,6</u> 1,9/1,1
Глубокое + облачность*	<u>9,3</u> 26,0/1,0	<u>7,0</u> 17,0/0,6	<u>6,8</u> 18,0/0,8	<u>4,7</u> 12,0/0,4	<u>1,1</u> 1,8/0,1	<u>1,3</u> 2,3/0,6
Глубокое + д/в ERA*	<u>2,4</u> 4,3/0,6	<u>1,6</u> 2,4/0,7	<u>1,6</u> 2,6/0,6	<u>1,9</u> 2,1/0,7	<u>1,4</u> 2,4/0,6	<u>1,5</u> 2,4/0,2
Глубокое + д/в NCEP*	<u>3,1</u> 5,9/0,6	<u>2,5</u> 4,3/0,7	<u>2,6</u> 5,0/0,6	<u>2,8</u> 5,7/0,6	<u>1,8</u> 2,9/0,6	<u>1,9</u> 3,3/0,6
Можайск + к/в и д/в ERA	<u>1,4</u> 1,6/0,6	<u>0,9</u> 0,8/0,4	<u>1,1</u> 1,1/0,7	<u>0,8</u> 0,8/0,7	<u>2,0</u> 0,9/2,0	<u>1,2</u> 1,4/0,4
Можайск + к/в и д/в NCEP	<u>1,7</u> 2,6/0,5	<u>1,2</u> 1,5/0,8	<u>1,0</u> 1,0/0,8	<u>1,1</u> 1,1/1,2	<u>1,2</u> 1,1/1,0	<u>1,0</u> 0,9/0,6

Примечание. В числителе – величины RMSE (°C) по всем глубинам; в знаменателе – величины RMSE для поверхностного/придонного слоя; * – оценки приведены для периода калибровки (без верификации); д/в – длинноволновая; к/в – коротковолновая радиация.

Дополнение данных наземных измерений скорости ветра, температуры и влажности воздуха сведениями о радиационном режиме из реанализов в некоторых случаях позволяет немного снизить ошибку модели по сравнению с расчетами на основе исходных массивов данных. Так, совмещение измерений метеостанции в г. Можайске с радиационными данными реанализов позволяет снизить среднеквадра-

тическую ошибку расчета температуры воды на 3,0–3,3°C даже при минимальном наборе калибровочных параметров, а при калибровке по всем рассматриваемым параметрам ошибка снижается на 0,7°C относительно расчета только по данным метеостанции и на 0,1–0,6°C относительно реанализов. Существенное снижение RMSE (на 0,3–5,3°C) наблюдается и при дополнении измерений автоматической метеостан-

ции рядами длинноволнового излучения атмосферы. Такого же улучшения можно достичь, используя ряды облачности по данным метеостанции Можайск, но только при использовании всех доступных калибровочных параметров. Данные метеостанции Мо-

жайск, дополненные радиационными потоками из реанализов, позволяют также достичь наилучшего воспроизведения хода придонной температуры воды среди всех рассмотренных источников с величиной NSE, достигающей в некоторых случаях 0,9.

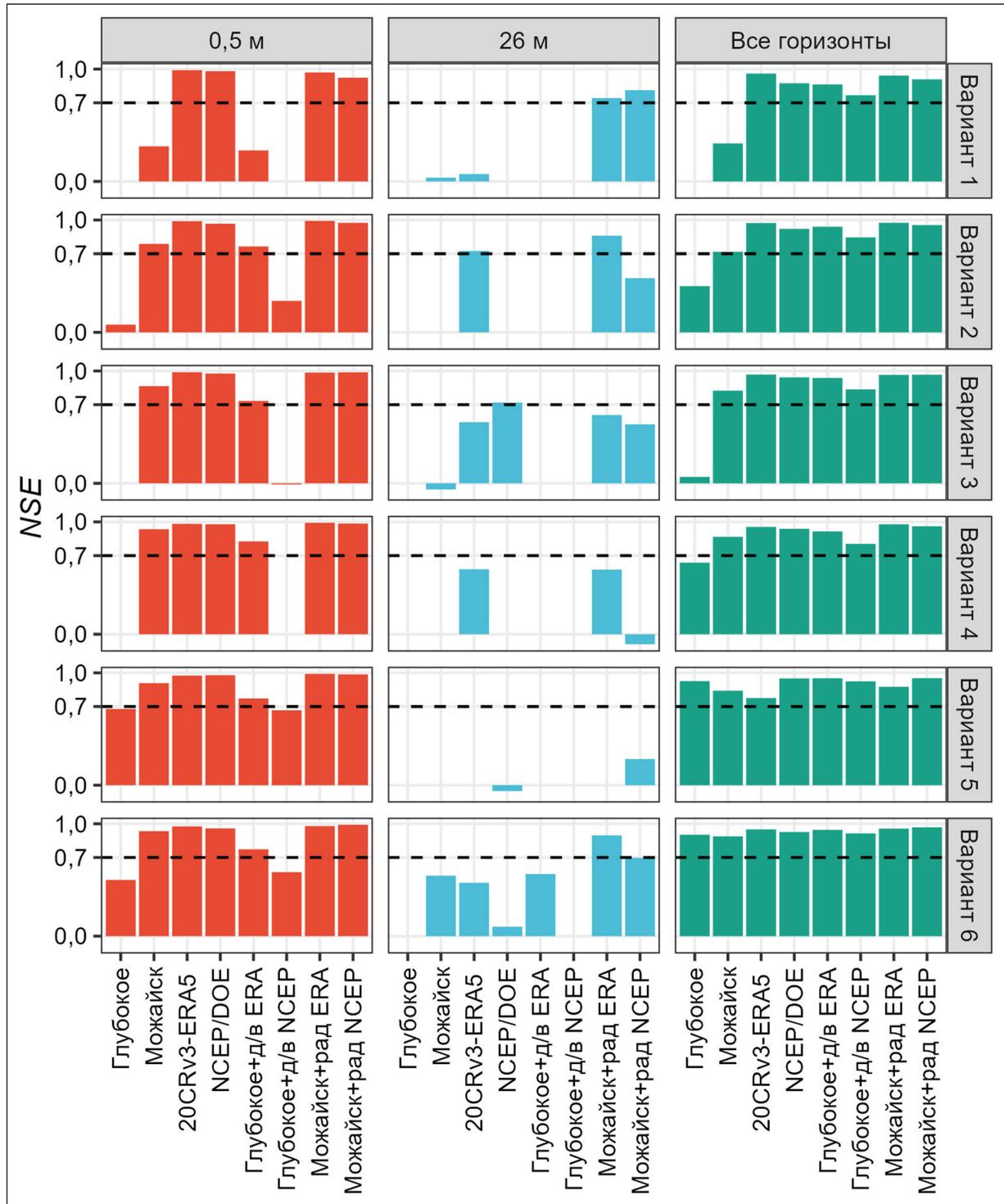


Рис. 2. Величина NSE по результатам верификации модели, адаптированной по разным вариантам калибровки (см. табл. 4) с использованием различных источников метеоданных

Fig. 2. NSE values (after verification of a model adapted using different calibration options (see tabl. 4) and different meteorological data sources)

По результатам анализа можно сделать вывод, что данные стационарных метеостанций, включающие актинометрические измерения либо дополненные информацией о солнечной радиации из других источников, в равнинных условиях оказываются наилучшим вариантом форсинга даже при существенной их удаленности от объекта моделирования (рис. 3).

В то же время использование реанализов в качестве метеофорсинга позволяет достичь незначительно худших, а иногда и лучших результатов даже при умеренной калибровке, отсутствии корректировки входных данных и существенных их расхождениях с измеренными на метеостанциях величинами скорости ветра, влажности воздуха и количества осадков.

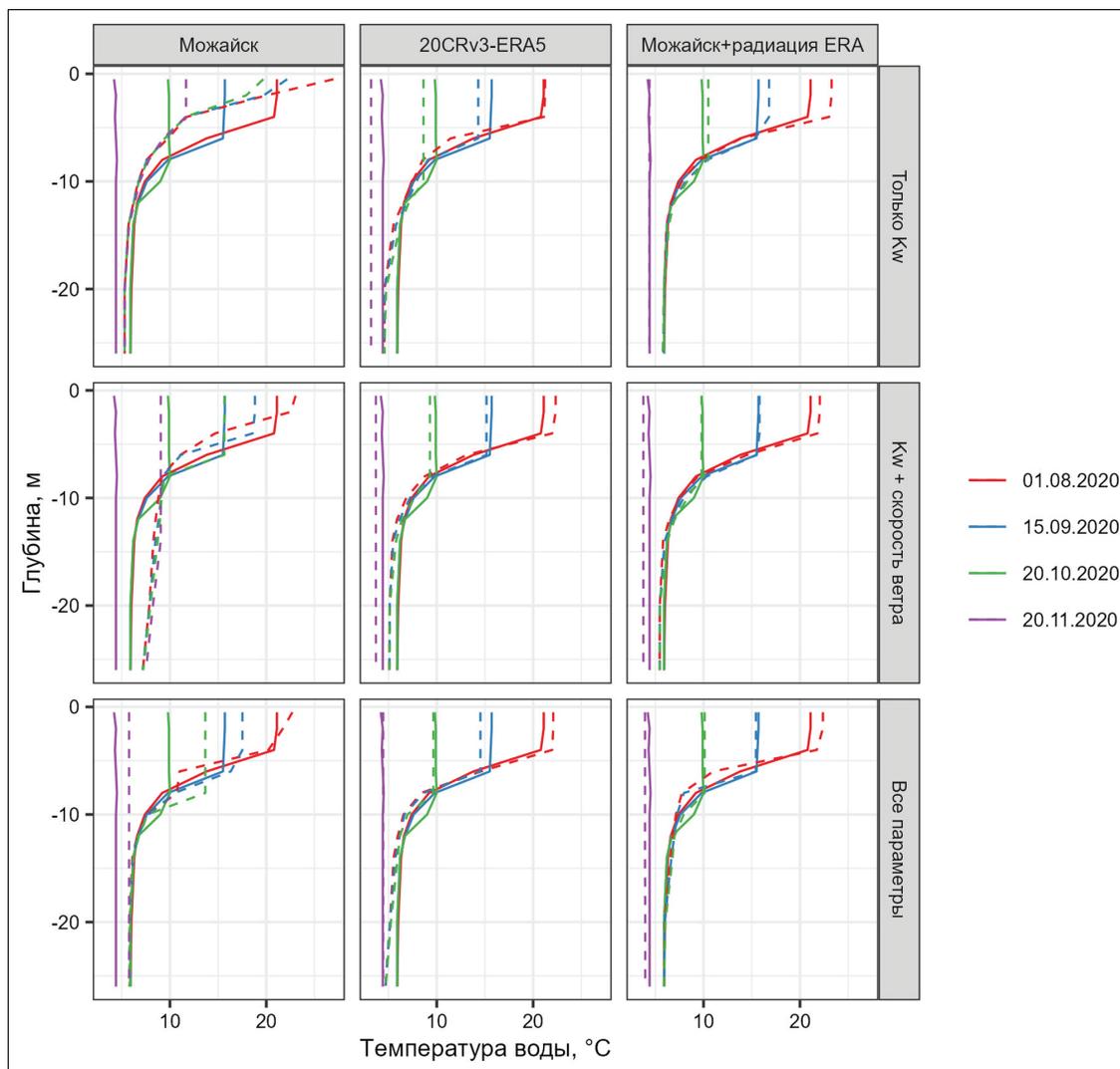


Рис. 3. Фактическое (сплошная линия) и модельное (пунктирная линия) распределение температуры воды в оз. Глубоком в различные фазы термического цикла по разным вариантам калибровки с использованием оптимальных массивов метеоданных

Fig. 3. Observed (solid line) and modeled (dashed line) distribution of water temperature Lake Glubokoe during different phases of the thermal cycle according to different calibration options using optimal meteorological data sources

Чувствительность модели к калибровочным параметрам. По результатам первого этапа работы для последующего анализа чувствительности модели к изменению калибровочных параметров был сделан выбор в пользу реанализа 20CRv3-ERA5 как оптимального источника метеорологических данных, не имеющего существенных расхождений с погодными условиями на акватории озера. Для анализа вклада

калибровочных параметров в изменение итоговой ошибки расчета за основу был выбран вариант конфигурации модели, откалиброванный только по значению K_w , имеющий среднеквадратическую ошибку расчета по полному периоду наблюдений $1,4^\circ\text{C}$.

При поочередном изменении каждого из 16 калибровочных параметров в границах, обозначенных ранее, выделяются группы параметров, в разной

степени определяющих качество расчета (рис. 4). Для многих из эмпирических параметров (константы эффективности всех видов перемешивания, кроме внутреннего трения, и коэффициент явного теплообмена ch), а также для поправочного множителя к количеству осадков не отмечается устой-

чивого снижения или увеличения ошибки расчета при отклонении от значений по умолчанию, и на всем диапазоне варьирования показателей ошибка отклоняется случайным образом в пределах $\pm 25\%$ от исходного значения. Калибровка модели по этим показателям наименее целесообразна.

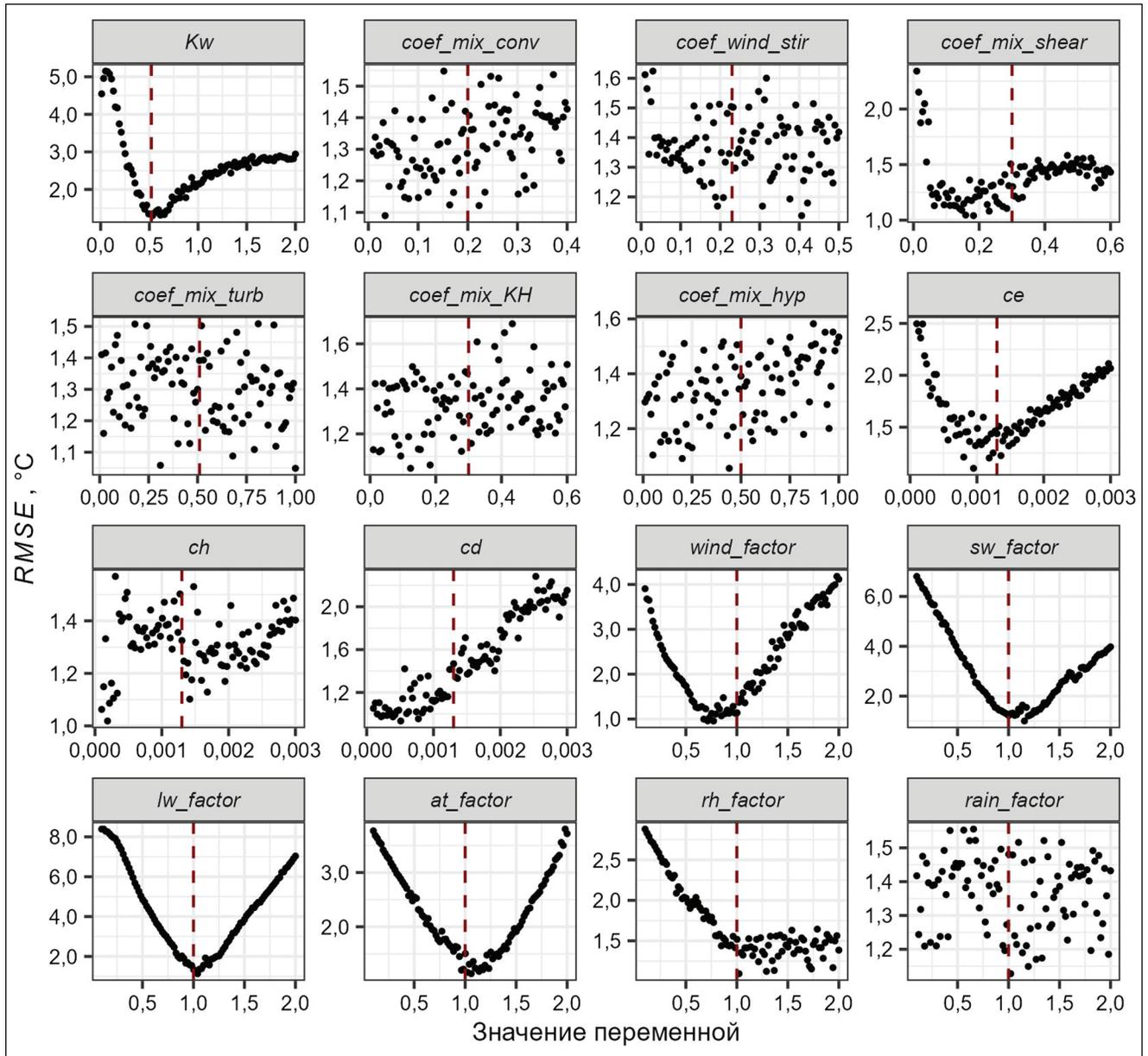


Рис. 4. Динамика ошибки модельного расчета при изменении калибровочных параметров в пределах выбранных диапазонов. Пунктирной линией показаны значения параметров по умолчанию

Fig. 4. Modeling error variation under the changes of calibration parameters within selected ranges. The dashed line shows the default values

Для параметра cd – коэффициента трения при касательном напряжении ветра – наблюдается тенденция к монотонному увеличению ошибки по мере роста значения показателя. В результате этого «оптимальное» значение достигается близко к

нижней границе диапазона его изменения в рамках анализа чувствительности. Минимальная достигнутая ошибка составила $0,93^{\circ}\text{C}$, т. е. примерно на 33% ниже исходной. Коэффициент ветрового трения cd участвует в расчете касательного напряжения, соз-

даваемого при ветровом воздействии, определяя перенос импульса между поверхностью раздела воздух–вода и далее вглубь водной толщи. Он принимается обычно близким к отношению плотностей воздуха и воды, однако его величина может изменяться в зависимости от скорости ветра. Снижение величины этого коэффициента позволяет более адекватно воспроизвести режим перемешивания в весенний и осенний периоды, увеличивая общую продолжительность летнего периода устойчивой стратификации. За счет этого уменьшается амплитуда колебаний температуры воды в гипolimнионе, которая при исходном значении параметра оказывалась завышенной. Ход поверхностной температуры воды при этом изменяется слабо.

К аналогичному результату – снижению ошибки до 0,96–1,04°C за счет более правильного воспроизведения периодов весеннего и осеннего перемешивания – приводит снижение коэффициента интенсивности перемешивания за счет образования трения сдвига (*coef_mix_shear*) или введение понижающего поправочного коэффициента к скорости ветра. Для обоих этих параметров в процессе калибровки выделены отчетливые оптимумы значений. При этом если изменение величины коэффициента *coef_mix_shear*, как и в случае *cd*, почти не влияет на динамику поверхностной температуры воды, то введение понижающей поправки к скорости ветра при схожем воздействии на температуру воды в гипolimнионе приводит к существенному снижению теплопотерь в поверхностном слое и увеличению температуры воды в эпилимнионе. Множители к скорости ветра, помогающие учесть эффект экранирования растительностью на небольших озерах или высокую длину ветрового разгона на больших озерах, используются в лимнологических моделях достаточно часто [Markfort et al., 2010]. Существуют также различные способы учета изменчивости величины коэффициента ветрового трения, хотя по натурным данным и модельным расчетам его значения изменяются в менее узких пределах, чем достигнутый в данной работе оптимум [Репина, 2007]. Таким образом, коэффициенты *cd*, *coef_mix_shear* и множитель к скорости ветра могут выполнять различные функции при калибровке, в связи с чем их совместное включение в алгоритмы оптимизации может быть эффективным.

Для нескольких параметров наблюдается наличие выраженного оптимума, слабо отклоняющегося от значений по умолчанию, при удалении в обе стороны от которого происходило резкое увеличение ошибки расчета. К ним относятся коэффициент экстинкции ФАР (K_w), коэффициент переноса скрытого тепла (*ce*) и поправочные множители к температуре воздуха, коротковолновой и длинноволновой

радиации. Величина K_w исходно была достаточно достоверно оценена по среднему значению прозрачности воды, дополнительная калибровка позволила лишь незначительно (менее чем на 0,1 °C) снизить ошибку расчета. Выделенное оптимальное значение коэффициента *ce* (0,00095, RMSE = 1,1°C) оказывается несколько ниже типичных, отмечаемых в литературе диапазонов [Репина, 2007], хотя его значения также могут изменяться в зависимости от скорости ветра и других факторов. Изменение величин температуры и влажности воздуха и интенсивности потоков коротко- и длинноволновой радиации в пределах ±20% от исходных значений позволило снизить ошибку расчета на 0,15–0,30°C. Соответствующие множители могут быть полезны в качестве калибровочных параметров при подозрении на нерепрезентативность метеорологических данных. Так, потоки коротковолновой радиации в использованных в данной работе массивах данных автоматической метеостанции и реанализа 20CRv3-ERA5 различались в среднем на 20%, что может быть скорректировано при помощи именно таких поправочных множителей.

ВЫВОДЫ

Данные автоматической метеостанции, ближайшей государственной метеостанции и реанализов для одного озера в пределах равнинной части ЕТР расходятся в средних величинах потоков коротковолновой солнечной радиации до полутора раз, в скоростях ветра – до 9 раз, что приводит к существенным различиям в оценках теплового баланса и доступной для динамического перемешивания кинетической энергии.

Прямое задание потоков коротковолновой и длинноволновой радиации по данным реанализов заметно улучшает воспроизведение термического режима озера. Измерения наземной метеостанции, совмещенные с реанализами солнечной радиации, позволяют достичь наилучшего результата моделирования и хорошего воспроизведения хода не только поверхностной, но и придонной температуры воды. Использование только данных реанализов также позволяет достичь высокого качества моделирования даже при минимальной калибровке, грубом пространственном разрешении и высоких расхождениях с наземными измерениями других метеорологических параметров.

Среди калибровочных параметров модели наибольшее влияние на итоговую ошибку расчета оказывают параметры, связанные с ветровым перемешиванием – поправочный коэффициент к скорости ветра и константы, связанные с внутримодельным описанием энергии ветрового воздействия, оптимальные значения которых могут заметно от-

клоняться от значений по умолчанию. Остальные эмпирические константы, входящие в формулы расчета различных видов перемешивания, почти не влияют на качество моделирования термического режима озера.

Включение в процесс калибровки коэффициента экстинкции ФАР позволяет скорректировать

неточности, связанные с оценкой его величины по прозрачности воды или измерениям подводной освещенности. Изменение величин поправочных множителей к метеорологическим параметрам (кроме скорости ветра) в небольших пределах может скорректировать нерепрезентативность выбранного источника метеорологических данных.

Благодарности. Подготовка статьи осуществлена в рамках НИР кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (госзадание № ЦИТИС 121051400038-1 «Анализ, моделирование и прогнозирование изменений гидрологических систем, водных ресурсов и качества вод суши»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гладских Д.С., Сергеев Д.А., Байдаков Г.А., Соустова И.А., Троицкая Ю.И. Численное моделирование температурной стратификации внутренних водоемов с использованием данных натурных измерений // Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы. 2017. С. 132–136.
- Гречушников М.Г. Роль конвективного и ветрового перемешивания в термической стратификации неглубокого водоема // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2004. № 2. С. 9–15.
- Гречушников М.Г., Эдельштейн К.К. Возможные изменения гидрологического режима Рыбинского водохранилища при потеплении климата // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2012. № 6. С. 61–67.
- Ефремова Т.В., Пальшин Н.И., Белаишв Б.З. Температура воды разнотипных озер Карелии в условиях изменения климата (по данным инструментальных измерений 1953–2011 гг.) // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 2. С. 228–238. DOI: 10.7868/S0321059616020024.
- Здоровеннова Г.Э., Шадрина А.А., Федорова И.В. Моделирование термического режима малых арктических озер // Успехи современного естествознания. 2016. № 1. С. 111–115.
- Меншуткин В.В., Руховец Л.А., Филатов Н.Н. Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор) 1. Гидродинамика озер // Водные ресурсы. 2013. Т. 40. № 6. С. 566–582. DOI: 10.7868/S0321059613060096.
- Основные гидрологические характеристики озер Российской Федерации и их многолетние изменения: научно-прикладной справочник. СПб.: РИАН, 2021. 364 с.
- Остроумова Л.П., Полонский В.Ф., Солодовникова Т.Ю. и др. Исследование составляющих теплового баланса Северного Каспия и Невской губы // Труды Государственного океанографического института. 2009. № 212. С. 123–145.
- Репина И.А. Методы определения турбулентных потоков над морской поверхностью. М.: ИКИ РАН, 2007. 36 с.
- Эдельштейн К.К., Даценко Ю.С. Лимнологическое моделирование. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 80 с.
- Bruce L.C., Frassl M.A., Arhonditsis G.B. et al. A multi-lake comparative analysis of the General Lake Model (GLM), Stress-testing across a global observatory network, *Environmental Modelling & Software*, 2018, vol. 102, p. 274–291.
- Compo G.P., Whitaker J.S., Sardeshmukh P.D. et al. The Twentieth Century Reanalysis Project, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, vol. 137, p. 1–28, DOI: 10.1002/qj.776.
- Golub M., Thiery W., Marcé R. et al. A framework for ensemble modelling of climate change impacts on lakes worldwide: the ISIMIP Lake Sector, *Geoscientific Model Development*, 2022, vol. 15, p. 4597–4623, DOI: 10.5194/gmd-15-4597-2022.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, vol. 146, p. 1999–2049, DOI: 10.1002/qj.3803.
- Hipsey M.R., Bruce L.C., Hamilton D.P. GLM-General Lake Model: Model overview and user information, Perth (Australia), University of Western Australia, 2014, 42 p.
- Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J. et al. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2), *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, vol. 83, p. 1631–1643, DOI: 10.1175/BAMS-83-11-1631.
- Kirillin G., Hochschild J., Mironov D. et al. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage, *Environmental Modelling & Software*, 2011, vol. 26(5), p. 683–684, DOI: 10.1016/j.envsoft.2010.12.004.
- Li Y., Tang C., Zhu J. et al. Parametric uncertainty and sensitivity analysis of hydrodynamic processes for a large shallow freshwater lake, *Hydrological Sciences Journal*, 2015, vol. 60(6), p. 1078–1095, DOI: 10.1080/02626667.2014.948444.
- Markfort C.D., Perez A.L.S., Thill J.W. et al. Wind sheltering of a lake by a tree canopy or bluff topography, *Water Resources Research*, 2010, vol. 46, W03530, DOI: 10.1029/2009WR007759.
- Mesman J.P., Ayala A.I., Adrian R. et al. Performance of one-dimensional hydrodynamic lake models during short-term extreme weather events, *Environmental Modelling & Software*, 2020, vol. 133, p. 104852, DOI: 10.1016/j.envsoft.2020.104852.
- Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, *Transactions of the ASABE*, 2007, vol. 50(3), p. 885–900, DOI: 10.13031/2013.23153.
- Perroud M., Goyette S., Martynov A. et al. Simulation of multiannual thermal profiles in deep Lake Geneva: A comparison of one-dimensional lake models, *Limno-*

- logy and Oceanography*, 2009, vol. 54(5), p. 1574–1594, DOI: 10.4319/lo.2009.54.5.1574.
- Rueda F., Vidal J., Schladow G. Modeling the effect of size reduction on the stratification of a large wind-driven lake using an uncertainty-based approach, *Water Resources Research*, 2009, vol. 45, W03411, DOI: 10.1029/2008WR006988.
- Slivinski L.C., Compo G.P., Whitaker J.S. et al. Towards a more reliable historical reanalysis: Improvements for version 3 of the Twentieth Century Reanalysis system, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2019, vol. 145, p. 2876–2908, DOI: 10.1002/qj.3598.
- Stepanenko V.M., Goyette S., Martynov A. et al. First steps of a lake model intercomparison project: LakeMIP, *Boreal Environment Research*, 2010, vol. 15, p. 191–202.
- Woolway R.I., Debolskiy A., Golub M. et al. Phenological shifts in lake stratification under climate change, *Nature Communications*, 2021, vol. 12, 2318, DOI: 10.1038/s41467-021-22657-4.
- Wynne J.H., Woelmer W., Moore T.N. et al. Uncertainty in projections of future lake thermal dynamics is differentially driven by lake and global climate models, *PeerJ*, 2023, vol. 11, e15445, DOI: 10.7717/peerj.15445.

Поступила в редакцию 30.07.2023

После доработки 10.11.2023

Принята к публикации 14.02.2024

SENSITIVITY OF A 1D LAKE MODEL TO THE INPUT METEOROLOGICAL DATA

M.A. Tereshina¹, O.N. Erina², D.I. Sokolov³

¹⁻³ *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology*

¹ *Engineer; e-mail: martereshina@yandex.ru*

² *Head of Laboratory, Ph.D. in Geography; e-mail oxana.erina@geogr.msu.ru*

³ *Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail dmitriy.sokolov@yandex.ru*

The paper evaluates how the choice of a source of meteorological data used as boundary conditions and the changes in model calibration parameters affect the adequate performance of a model of lake thermo- and hydrodynamics. The quality of simulation of water temperature dynamics in a small lake by a one-dimensional GLM model using data from an automatic meteorological station on the lake shore, a state weather station and two global reanalyses was quantitatively assessed. It is shown that the best modeling result (RMSE of water temperature calculation 0,8–2,0°C, Nash-Sutcliffe efficiency >0,7) can be achieved using data sets that explicitly provide incoming shortwave and longwave radiation fluxes. At the same time, good representation of the bottom water temperature requires correct setting of wind regime, which is only possible if data from instrumental ground-based observations at a stationary weather station are applied. Combining ground-based observations of wind speed, air temperature and humidity with radiation fluxes from global reanalyses makes it possible to achieve a calculation error $\leq 1^\circ\text{C}$ at all depths.

The analysis of model sensitivity to calibration parameters in case when the reanalysis data are applied showed that parameters related to wind mixing, i.e. the scaling factor for wind speed and constants related to the in-model description of wind impact energy, have the greatest influence on the final calculation error. If we change the intensity coefficients of other types of mixing during calibration it does not lead to an obvious trend in the quantitative estimates of modeling quality. It could also be reasonable to introduce correction multipliers to the values of air temperature and solar radiation fluxes, thus neutralizing the effect of unrepresentativeness of the meteorological data applied for a particular lake, as well as to correct the value of solar radiation extinction coefficient relative to the value obtained from the Secchi depth. The results of the study could be used to justify the choice of meteorological data source and to optimize the methods of calibration of lake thermal stratification models.

Keywords: limnological modeling, GLM lake model, thermal regime, sources of meteorological data

Acknowledgments. The paper was prepared within the framework of research work of the Department of Land Hydrology, MSU Faculty of Geography (State task CITIS 121051400038-1 Analysis, modeling and forecast of changes in hydrological systems, water resources and terrestrial water quality).

REFERENCES

- Bruce L.C., Frassl M.A., Arhonditsis G.B. et al. A multi-lake comparative analysis of the General Lake Model (GLM): Stress-testing across a global observatory network, *Environmental Modelling & Software*, 2018, vol. 102, p. 274–291.
- Compo G.P., Whitaker J.S., Sardeshmukh P.D. et al. The Twentieth Century Reanalysis Project // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, vol. 137, p. 1–28, DOI: 10.1002/qj.776.

- Edel'shtein K.K., Datsenko Yu.S. *Limnologicheskoe modelirovanie* [Limnological modelling], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1998, 80 p. (In Russian)
- Efremova T.V., Pal'shin N.I., Belashev B.Z. Water temperature in different types of lakes in Karelia under changing climate based on data of instrumental measurements in 1953–2011, *Water Resources*, 2016, vol. 43, no. 2, p. 228, DOI 10.7868/S0321059616020024. (In Russian)
- Gladskikh D.S., Sergeev D.A., Baidakov G.A., Soustova I.A., Troitskaya Yu.I. [Numerical modeling of temperature stratification of inland water bodies using data of field measurements], *Gidrometeorologiya i ekologiya: nauchnye i obrazovatel'nye dostizheniya i perspektivy* [Hydrometeorology and ecology: scientific and educational achievements and prospects], 2017, p. 132–136. (In Russian)
- Golub M., Thiery W., Marcé R. et al. A framework for ensemble modelling of climate change impacts on lakes worldwide: the ISIMIP Lake Sector, *Geoscientific Model Development*, 2022, vol. 15, p. 4597–4623, DOI: 10.5194/gmd-15-4597-2022.
- Grechushnikova M.G. Rol' konvektivnogo i vetrovogo peremeshivaniya v termicheskoi stratifikatsii neglubokogo vodoema [The role of convective and wind mixing in the thermal stratification of a shallow reservoir], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2004, no. 2, p. 9–15. (In Russian)
- Grechushnikova M.G., Edelshtein K.K. Vozmozhnye izmeneniya gidrologicheskogo rezhima Rybinskogo vodokhranilishcha pri poteplenii klimata [Possible changes of the Rybinsk Reservoir hydrological regime under climate warming], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2012, no. 6, p. 61–67. (In Russian)
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, vol. 146, p. 1999–2049, DOI: 10.1002/qj.3803.
- Hipsey M.R., Bruce L.C., Hamilton D.P. *GLM-General Lake Model, Model overview and user information*, Perth (Australia), University of Western Australia, 2014, 42 p.
- Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J. et al. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2), *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, vol. 83, p. 1631–1643, DOI: 10.1175/BAMS-83-11-1631.
- Kirillin G., Hochschild J., Mironov D. et al. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage, *Environmental Modelling & Software*, 2011, vol. 26(5), p. 683–684, DOI: 10.1016/j.envsoft.2010.12.004.
- Li Y., Tang C., Zhu J. et al. Parametric uncertainty and sensitivity analysis of hydrodynamic processes for a large shallow freshwater lake, *Hydrological Sciences Journal*, 2015, vol. 60(6), p. 1078–1095, DOI: 10.1080/02626667.2014.948444.
- Markfort C.D., Perez A.L.S., Thill J.W. et al. Wind sheltering of a lake by a tree canopy or bluff topography, *Water Resources Research*, 2010, vol. 46, W03530, DOI: 10.1029/2009WR007759.
- Menshutkin V.V., Rukhovets L.A., Filatov N.N. Ecosystem modeling of freshwater lakes (review) I. Hydrodynamics of lakes, *Water Resources*, 2013, vol. 40, no. 6, p. 566–582, DOI:10.7868/S0321059613060096 (In Russian)
- Mesman J.P., Ayala A.I., Adrian R. et al. Performance of one-dimensional hydrodynamic lake models during short-term extreme weather events, *Environmental Modelling & Software*, 2020, vol. 133, p. 104852 DOI: 10.1016/j.envsoft.2020.104852.
- Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, *Transactions of the ASABE*, 2007, vol. 50(3), p. 885–900, DOI:10.13031/2013.23153.
- Osnovnye gidrologicheskie kharakteristiki ozer Rossiiskoi Federatsii i ikh mnogoletnie izmeneniya: nauchno-prikladnoi spravochnik* [Main hydrological characteristics of lakes in the Russian Federation and their long-term changes: a scientific and applied reference book], St. Petersburg, RIAL Publ., 2021, 364 p.
- Ostroumova L.P., Polonsky V.F., Solodovnikova T.Yu. et al. Issledovanie sostavlyayushchikh teplovogo balansa Severnogo Kaspiya i Nevskoi guby [Investigation of thermal balance components of Northern Caspian Sea and the Neva lip], *Trudy Gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta*, 2009, no. 212, p. 123–145. (In Russian)
- Perroud M., Goyette S., Martynov A. et al. Simulation of multiannual thermal profiles in deep Lake Geneva: A comparison of one-dimensional lake models, *Limnology and Oceanography*, 2009, vol. 54(5), p. 1574–1594, DOI: 10.4319/lo.2009.54.5.1574.
- Repina I.A. *Metody opredeleniya turbulentykh potokov nad morskoi poverkhnost'yu* [Methods for determining turbulent flows over the sea surface], Mosco, SRI RAS Publ., 2007, 36 p. (In Russian)
- Rueda F., Vidal J., Schladow G. Modeling the effect of size reduction on the stratification of a large wind-driven lake using an uncertainty-based approach, *Water Resources Research*, 2009, vol. 45, W03411, DOI:10.1029/2008WR006988.
- Slivinski L.C., Compo G.P., Whitaker J.S. et al. Towards a more reliable historical reanalysis: Improvements for version 3 of the Twentieth Century Reanalysis system, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2019, vol. 145, p. 2876–2908, DOI: 10.1002/qj.3598.
- Stepanenko V.M., Goyette S., Martynov A. et al. First steps of a lake model intercomparison project: LakeMIP, *Boreal Environment Research*, 2010, vol. 15, p. 191–202.
- Woolway R.I., Debolskiy A., Golub M. et al. Phenological shifts in lake stratification under climate change, *Nature Communications*, 2021, vol. 12, 2318, DOI: 10.1038/s41467-021-22657-4.
- Wynne J.H., Woelmer W., Moore T.N. et al. Uncertainty in projections of future lake thermal dynamics is differentially driven by lake and global climate models, *PeerJ*, 2023, vol. 11, e15445, DOI: 10.7717/peerj.15445.
- Zdorovenнова G.E., Shadrina A.A., Fedorova I.V. Modelirovanie termicheskogo rezhima malykh arkticheskikh ozer [Modeling of thermal regime of small Arctic lakes], *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2016, vol. 1, p. 111–115. (In Russian)

Received 30.07.2023

Revised 10.11.2023

Accepted 14.02.2024

ИЗОСКЕЙПЫ И ПАЛЕОИЗОТЕРМЫ СРЕДНЕЯНВАРСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ГОЛОЦЕНЕ НА СЕВЕРЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ (ПО ДАННЫМ ИЗОТОПНО-КИСЛОРОДНОГО СОСТАВА ПОВТОРНО-ЖИЛЬНЫХ ЛЬДОВ)

Н.А. Буданцева¹, Ю.К. Васильчук², А.К. Васильчук³

¹⁻³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет

¹Кафедра геохимии ландшафтов и географии почв,
ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: nadin.budanceva@mail.ru

²Кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, проф., д-р геол.-минерал. наук; e-mail: vasilch_geo@mail.ru

³Лаборатория геоэкологии Севера, вед. науч. сотр., д-р геогр. наук; e-mail: alla-vasilch@yandex.ru

Проведено исследование голоценовых массивов с повторно-жильными льдами в пределах 16 участков на севере Западной Сибири, проанализирован возраст повторно-жильных льдов, обобщены данные по содержанию стабильных изотопов ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$) во льду жил. Соотношение $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ и значения d_{exc} во льду исследованных жил указывает на хорошую сохранность изотопного сигнала зимних осадков во льду, что позволяет применять значения $\delta^{18}\text{O}$ для палеотемпературных реконструкций. Установлено в целом субмеридиональное положение изоскейп (линий равных значений $\delta^{18}\text{O}$), построенных по голоценовым и современным жилам, показано снижение значений $\delta^{18}\text{O}$ в жилах с запада на восток исследуемой территории. С учетом новой схемы деления голоцена показано, что в течение гринландского и первой половины северогриппианского периодов голоцена (11,4–6 тыс. кал. лет назад) среднеянварская температура воздуха ($T_{\text{ср. янв}}$) на севере Западной Сибири варьировала в интервале от -21 до -30°C , с конца северогриппианского – в течение мегхалайского периодов голоцена (5,2–0,9 тыс. кал. лет назад) $T_{\text{ср. янв}}$ варьировала от -24 до -27°C . Установлено близкое к современному субмеридиональное положение голоценовых среднеянварских палеоизотерм и снижение значений $T_{\text{ср. янв}}$ с запада на восток. Показано, что в целом на севере Западной Сибири в голоцене преобладали стабильные зимние климатические условия, при этом среднеянварская температура воздуха была в среднем на $1-2^\circ\text{C}$ ниже современной.

Ключевые слова: повторно-жильный лед, изотопы кислорода, изотопы водорода, радиоуглеродный возраст

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.7

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на относительно небольшую продолжительность голоцена – 11,7 тыс. лет – это время отмечено значительными изменениями природной среды. В 2018 г. международной комиссией по стратиграфии принято решение о делении голоцена на 3 периода – гринландский, северогриппианский и мегхалайский. Нижняя граница гринландского периода (11,7 тыс. кал. лет назад) датирует начало голоценового потепления климата, начало северогриппианского периода (8,2 тыс. кал. лет назад) соответствует переходу к кратковременному похолоданию, нижняя граница мегхалайского периода (4,2 тыс. кал. лет назад) маркирует переход к засушливым и прохладным условиям [Walker et al., 2019].

В пределах континентальной части арктической криолитозоны сингенетические повторно-жильные льды на сегодняшний день являются единственным надежным источником зимней палеотемпературной информации. Повторно-жильные льды формируются преимущественно из снега, заполняющего морозобойные трещины в виде талой снеговой воды.

В атмосферных осадках, особенно в высокоширотных регионах, соотношения стабильных изотопов кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) являются надежными индикаторами температуры воздуха в период выпадения осадков [Vasil'chuk, 1991; Butzin et al., 2014; Meyer et al., 2015; Opel et al., 2018].

Соотношение $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ и значения дейтериевого эксцесса (d_{exc}) в жильном льду рассматриваются как показатели степени изменения первичного изотопного сигнала снега (как основного источника воды для формирования жил), в процессе испарения, сублимации или смешения с водами другого происхождения.

Цель исследования – обобщение всех имеющихся данных по изотопному составу голоценовых датированных повторно-жильных льдов на севере Западной Сибири, оценка возможного изменения первичного изотопного сигнала снега на основе анализа имеющихся парных данных $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$, а также рассчитанных значений d_{exc} . Также целью работы является построение карт изоскейп по средним значениям $\delta^{18}\text{O}$ в голоценовых повторно-

жильных льдах и современных жильных ростках и построение карт палеоизотерм среднеянварских температур воздуха для выделенных периодов голоцена.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые исследования на севере Западной Сибири проводились авторами с 1996 по 2016 г., также привлечены данные, ранее полученные Ю.К. Ва-

силычуком. В процессе полевых работ изучены обнажения с повторно-жильными льдами (рис. 1, А), выполнен отбор жильного льда для анализа стабильных изотопов и вмещающих жилы отложений для радиоуглеродного датирования. В результате собран массив данных по восьми голоценовым полигонально-жильным структурам (ПЖЛ-1–ПЖЛ-8, см. рис. 1, Б).

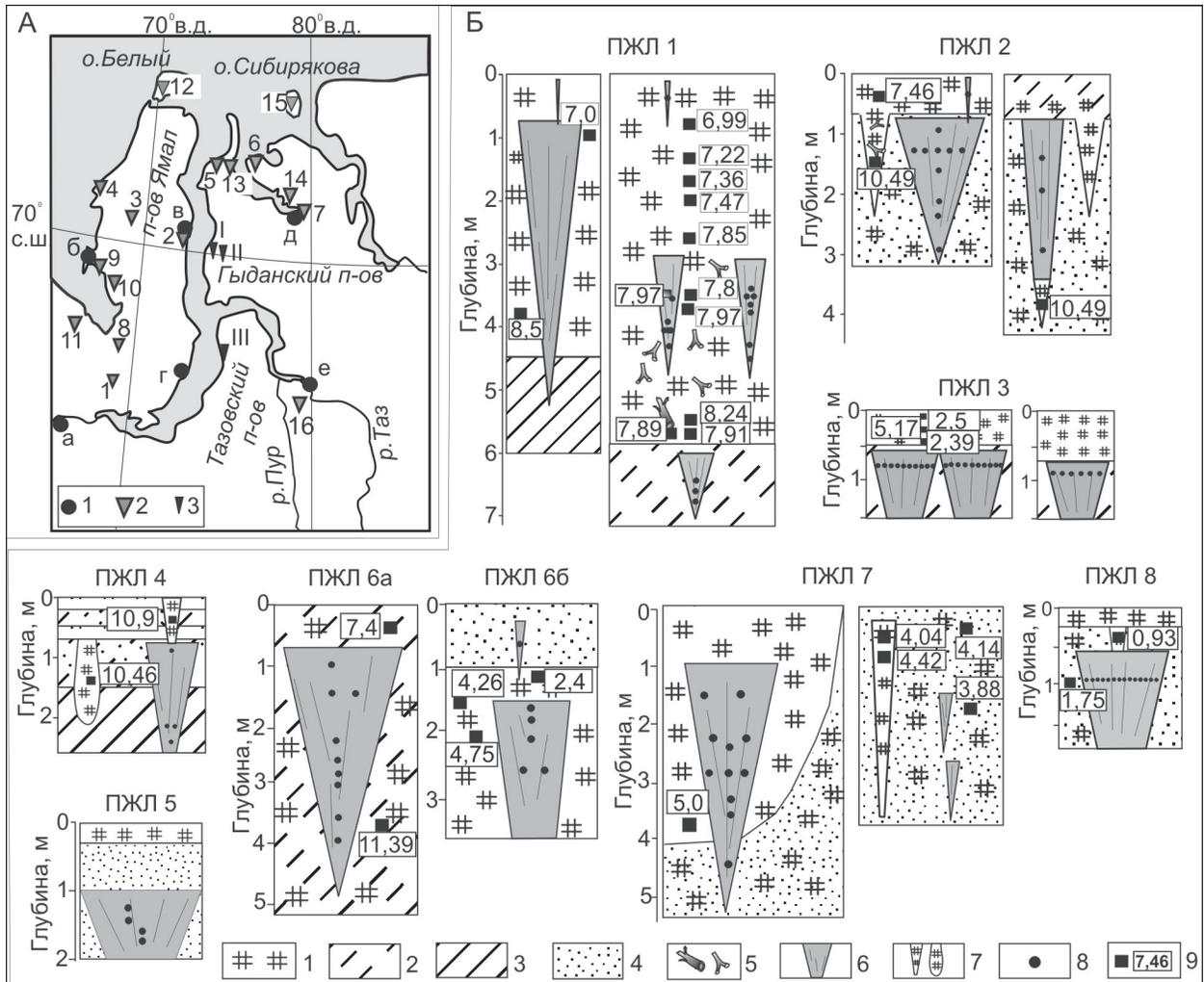


Рис. 1. Район исследования и условия отбора проб на изотопный состав льда:

А – расположение района исследований на севере Западной Сибири: 1 – метеостанции (а – г. Салехард; б – ст. Марре-Сале; в – пос. Сеяха; г – пос. Новый Порт; д – пос. Гыда; е – пос. Тазовский); 2 – участки с повторно-жильными льдами (ПЖЛ) 1–16 (голоценовые жилы и современные жильные ростки); 3 – участки с современными жильными ростками (I – пос. Напалково, II – р. Нгапкай-Яха, III – г. Ямбург); Б – стратиграфия, ¹⁴C датировки отложений с повторно-жильными льдами (ПЖЛ) исследованных авторами участков ПЖЛ 1 – ПЖЛ 8 и схемы отбора жильного льда на изотопный анализ: 1 – торф; 2 – супесь; 3 – суглинок; 4 – песок; 5 – древесные остатки; 6 – повторно-жильные льды; 7 – торфяные жилы; 8 – точки отбора льда для изотопного анализа; 9 – радиоуглеродные датировки (тыс. лет назад)

Fig. 1. Study area and conditions of sampling for the ice isotope composition:

А – Location of the study area in the Northwestern Siberia; 1 – weather stations (a – Salekhard; б – Marre-Sale; в – Seyakha; г – Novy Port; д – Gyda; е – Tazovsky); 2 – sites of studied ice wedges (IW) 1–16 (Holocene ice wedges and modern ice veinlets); 3 – sites with modern ice veinlets (I – Napalkovo settlement; II – Ngapkaï-Yakha River valley; III – Yamburg town); Б – Stratigraphy, ¹⁴C dates of enclosing sediments at the ice wedge (IW) sites IW 1–IW 8 in the Northwestern Siberia and schemes of ice sampling for stable isotope analysis: 1 – peat; 2 – sandy loam; 3 – loam; 4 – sand; 5 – wood remains; 6 – ice wedges; 7 – peat wedges; 8 – sampling of ice for stable isotope analysis; 9 – ¹⁴C dates, cal ka BP

Определения изотопного состава кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) во льду жил, исследованных до 2010 г. (ПЖЛ 1, 2, 4–8), выполнены в лаборатории изотопной гидрологии Института водных проблем РАН, в лаборатории изотопной геологии Института геологии (г. Таллин, Эстония) и изотопной лаборатории университета г. Хельсинки (Финляндия). Определения изотопного состава кислорода и водорода ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$) выполнены в Центре изотопных исследований г. Гронингена (Нидерланды) и в изотопной лаборатории г. Ганновера (Германия). Определения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ во льду жил участка ПЖЛ 3 были выполнены авторами в лаборатории стабильных изотопов географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Для калибровки измерений использовались международные стандарты V-SMOW, GRESP, SLAP. Погрешность определений составила $\pm 1\%$ для $\delta^2\text{H}$ и $\pm 0,4\%$ для $\delta^{18}\text{O}$. Дейтериевый эксцесс d_{exc} рассчитан по формуле В. Дансгора [Dansgaard, 1964]: $d_{\text{exc}} = \delta^2\text{H} - 8\delta^{18}\text{O}$.

Радиоуглеродное датирование образцов органики из вмещающих жилы отложений выполнено в Институте истории материальной культуры РАН, Геологическом институте РАН и радиоуглеродной лаборатории университета г. Хельсинки, Финляндия.

Также были проанализированы данные о возрасте и изотопном составе голоценовых повторно-жильных льдов, полученные коллегами по другим участкам (ПЖЛ 9–ПЖЛ 16). Калибровка всех приведенных в статье датировок проведена с применением программы Oxcal 4.2 на основе базы данных IntCal20 [Bronk Ramsey, 2009; Reimer et al., 2020], даты приведены в виде тысяч калиброванных лет (тыс. кал. лет) назад.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Радиоуглеродное датирование и определение возраста отложений и повторно-жильных льдов. Радиоуглеродное датирование вмещающих жилы отложений, а также AMS ^{14}C датирование органики из жилы (участка ПЖЛ 1) позволило установить время формирования повторно-жильных льдов (см. рис. 1, Б).

По торфу, вмещающему жилы на участке ПЖЛ 1 (южный Ямал, долина р. Щучья), получены 13 ^{14}C датировок от 8,5 до 7 тыс. кал. лет, что позволяет говорить о формировании торфяника в конце гренландского – начале северогриппианского периода голоцена. ^{14}C AMS датировка фрагмента мха из жилы (7,97 тыс. кал. лет) очень близка к датировкам по вмещающему торфу на этой же глубине (7,8 и 7,97 тыс. кал. лет), что является надежным признаком сингенетического роста жилы.

На участке ПЖЛ 2 (восточное побережье Ямала, район пос. Сеяха), по торфу над головной жилы получена ^{14}C датировка 7,5 тыс. кал. лет, а по нижним фрагментам торфяных жил получены две одинаковые даты 10,5 тыс. кал. лет. Это позволяет говорить о формировании ледяных и торфяных жил в течение второй половины гренландского – начале северогриппианского периодов голоцена.

По торфу, перекрывающему жилу на участке ПЖЛ 3 (центральный Ямал, район пос. Бованенково), получены ^{14}C датировки от 5,17 до 2,39 тыс. кал. лет, что указывает на формирование жил во второй половине голоцена, с конца северогриппианского до середины мегхалайского периодов голоцена.

На участке ПЖЛ 4 (западное побережье п-ова Ямал, район пос. Харасавэй) по торфу над ледяной жилой получена ^{14}C датировка 10,9 тыс. кал. лет, по торфяной жиле получена датировка 10,46 тыс. кал. лет. Следовательно, около 10,5 тыс. кал. лет назад, в течение первой половины гренландского периода голоцена происходил рост повторно-жильных льдов в сформировавшейся к тому времени первой морской террасе.

Возраст жилы на участке ПЖЛ 5 (север Гыданского п-ова, устье р. Нгарка-Тетнедаяха) оценивается нами как относительно молодой, не более 3–4 тыс. лет назад (мегхалайский период голоцена), на что косвенно указывает хорошо выраженная вертикально-слоистая текстура жильного льда, которая в более древних жилах слабо выражена из-за процессов метаморфизма льда.

Для участка ПЖЛ 6а (север Гыданского п-ова, устье р. Салемлекабтамба, вторая морская терраса) наиболее достоверная датировка получена по торфу из норки грызуна – 11,4 тыс. кал. лет. Завершение активной стадии формирования массива можно отнести к 7,4 тыс. кал. лет назад, судя по датировке торфа с глубины 0,2 м, т. е. жила формировалась в течение гренландского – начале северогриппианского периодов голоцена.

На участке ПЖЛ 7 (север Гыданского п-ова, район пос. Гыда) из нижней части торфяной линзы получена ^{14}C датировка 5 тыс. кал. лет. По торфяной жиле получены ^{14}C датировки 4,04 и 4,42 тыс. кал. лет, по включениям торфа над узкими ледяными жилами получены датировки 3,88 и 4,14 тыс. кал. лет.

Отложения на исследованных участках лайды и поймы датированы преимущественно мегхалайским периодом голоцена. На участке ПЖЛ 6б (север Гыданского п-ова, лайда Карского моря) по торфу получены три ^{14}C датировки от 4,75 до 2,4 тыс. кал. лет, соответственно, жила формировалась с конца северогриппианского – в первой половине мегхалайского периодов голоцена. На участке ПЖЛ 8 (южный Ямал, пойма р. Еркутаяха) установлен

молодой возраст пойменных отложений: возраст торфа из грунтовой жилы с глубины 0,3 м составил 0,93 тыс. кал. лет, а скопления корешков на глубине 1,0 м датированы в 1,75 тыс. кал. лет.

В районе ст. Марре-Сале (участок ПЖЛ 9) ^{14}C возраст автохтонных растительных остатков из вмещающих отложений жилы варьировал от 8,8 до 6 тыс. кал. лет назад (от 7,91 до 5,2 тыс. лет назад) [Слагода и др., 2012]. На основании этих датировок период формирования жил можно определить от 8,8 до 6 тыс. кал. лет назад, т. е. концом гренландского – первой половины северогриппианского периодов голоцена.

Южнее, в районе метеостанции Виктория, исследованы жилы в линзе торфа (участок ПЖЛ 10), по которому получены датировки от 9,6 до 6,4 тыс. кал. лет. На западном берегу Байдарацкой губы, в низовьях р. Оюяхи по торфянику с жилами (участок ПЖЛ 11) получены ^{14}C датировки от 9,1 до 8,4 тыс. кал. лет [Романенко и др., 2001]. Судя по датировкам, жилы формировались с конца гренландского – в течение первой половины северогриппианского периодов голоцена (ПЖЛ 10) и в течение гренландского периода голоцена (ПЖЛ 11).

В береговых обнажениях о. Белый исследована серия ледяных жил (участок ПЖЛ 12), возраст которых можно определить от 9,5 до 8,9 тыс. кал. лет назад (гренландский период голоцена), судя по датировкам линз и включений торфа из вмещающих отложений [Баранская и др., 2018].

В устье р. Еры-Маретаяха, север Гыданского п-ова, вскрыты сингенетические ледяные жилы, залегающие под слоем торфа (участок ПЖЛ 13). По вмещающим жилы отложениям получены ^{14}C датировки 10 и 9,3 тыс. кал. лет [Облогов, 2016], что позволяет определить возраст жил гренландским периодом голоцена. На северном побережье Гыданской губы, в районе мыса Паха-Сале (участок ПЖЛ 14), в верхней части разреза по древесным остаткам из вмещающих жилы отложений получены ^{14}C датировки 8,9 и 6,1 тыс. кал. лет [Облогов, 2016], определяющие время формирования жил с конца гренландского до первой половины северогриппианского периодов голоцена.

В береговом обнажении о. Сибирякова (участок ПЖЛ 15) торф, перекрывающий ледяные жилы, датирован в 10–9 тыс. кал. лет [Облогов, 2016; Опокина и др., 2010; Стрелецкая и др., 2012], что указывает на формирование жил в течение гренландского периода голоцена. Торфяник с повторно-жильными льдами на Пуртазовском междуречье (участок ПЖЛ 16) дати-

рован от 9,4 до 6,2 тыс. кал. лет [Tikhonravova et al., 2022], возраст жил можно определить концом гренландского – первой половиной северогриппианского периода голоцена.

Анализ радиоуглеродных датировок по участкам ПЖЛ 1–ПЖЛ 16 показывает, что жилы можно отнести к трем возрастным диапазонам: наиболее древние жилы формировались преимущественно в течение гренландского периода голоцена, их возраст от 10,9 до 8,4 тыс. кал. лет назад, большая часть исследованных жил формировалась в течение гренландского – первой половины северогриппианского периодов голоцена – возраст этих жил между 11,4 и 6 тыс. кал. лет назад и наиболее молодые жилы формировались с конца северогриппианского – в течение мегхалайского периодов голоцена, от 5,2 до 0,9 тыс. кал. лет назад.

Вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ в голоценовых и современных повторно-жильных льдах. Авторами обобщены данные по значениям $\delta^{18}\text{O}$ повторно-жильных льдов на всех участках (табл. 1), так как эти данные являются основной для палеотемпературных расчетов и построения карт изоскейп и палеоизотерм.

Анализ массива данных по значениям $\delta^{18}\text{O}$ участков ПЖЛ 1–ПЖЛ 16 показывает, что в жилах голоценового возраста значения $\delta^{18}\text{O}$ варьируют в диапазоне от $-14,1$ до $-21,9\%$ (средние значения – от -15 до $-21,4\%$), при этом более высокие значения, как правило, получены по жилам, расположенным на западных участках территории, а более низкие – по жилам в восточных и северо-восточных районах. В современных жильных ростках на севере Западной Сибири значения $\delta^{18}\text{O}$ варьируют от $-16,1$ до $-19,5\%$.

Зимние палеотемпературные реконструкции: основные подходы и результаты. Для расчета среднеянварских голоценовых палеотемператур воздуха было применено уравнение, полученное Ю.К. Васильчуком [Vasil'chuk, 1991] на основе анализа данных по большей части российской криолитозоны, от северо-востока Европейской части России до востока Чукотки:

$$T_{\text{ср. янв}} = 1,5\delta^{18}\text{O}_{\text{ж.р}} (\pm 3^\circ\text{C}), \quad (1)$$

где $T_{\text{ср. янв}}$ – среднеянварская температура воздуха, $\delta^{18}\text{O}_{\text{ж.р}}$ – изотопно-кислородный состав льда современного жильного ростка. Следует отметить, что эта зависимость позволяет получить лишь приближительные значения палеотемпературы, а допустимая погрешность $\pm 3^\circ\text{C}$ учитывает естественную изменчивость среднеянварской температуры воздуха [Васильчук и др., 2021].

Значения $\delta^{18}\text{O}$ в голоценовых повторно-жильных льдах (ПЖЛ) и современных жилках на севере Западной Сибири

Номер участка ПЖЛ (см. рис. 1, А)	Число проб	Минимальные	Средние	Максимальные
<i>Голоценовые ПЖЛ</i>				
ПЖЛ 3	28	–18,1	–17,0	–16,2
ПЖЛ 8	14	–20,6	–19,6	–18,3
ПЖЛ 9 ^а	10	–18,2	–15,8	–13,1
ПЖЛ 12 ^б	10	–19	–17,7	–16,9
ПЖЛ 13 ^в	3	–19,3	–18,6	–18,1
ПЖЛ 14 ^в	2	–19,2	–19,2	–19,1
ПЖЛ 15 ^г	6	–20,1	–19,2	–18,7
ПЖЛ 1	16	–20,3	–19,0	–17,4
ПЖЛ 2	13	–20,3	–19,6	–17,9
ПЖЛ 4	4	–15,9	–15,0	–14,1
ПЖЛ 5	4	–16,8	–17,5	–17,8
ПЖЛ 6а	9	–20,1	–18,5	–17,2
ПЖЛ 6б	5	–19,9	–19,5	–18,8
ПЖЛ 7	11	–19,9	–18,8	–16,9
ПЖЛ 10 ^д	2	–16,9	–16,8	–16,7
ПЖЛ 11 ^д	3	–17,6	–17	–16,1
ПЖЛ 16 ^е	5	–21,9	–21,4	–20,7
<i>Современные ледяные жилки</i>				
ПЖЛ 1	1	–	–18,2	–
ПЖЛ 8	1	–	–16,1	–
ПЖЛ 16 ^е	2	–19,4	–18,9	–18,4
ПЖЛ 2	3	–18,7	–17,9	–16,6
ПЖЛ 6	1	–	–19,5	–
р. Нгапкай-Яха	1	–	–18,5	–
пос. Напалково		–	–18,0	–
г. Ямбург	1	–	–18,0	–

Примечание. Изотопные данные взяты из работ: ^а [Облогов, 2016; Слагода и др., 2012], ^б [Баранская и др., 2018], ^в [Облогов, 2016], ^г [Облогов, 2016; Стрелецкая и др., 2012], ^д [Романенко и др., 2001], ^е [Tikhonravova et al., 2022].

Уравнение (1) было уточнено для региона севера Западной Сибири с учетом вариаций зимних температур воздуха, отмеченных за период регулярных метеонаблюдений (с 1930 по 2000 г.). Период 1930–1960 гг. был охарактеризован как относительно теплый в течение первой декады (1930–1940-е) с тенденцией к понижению температуры к 1960-м гг.; в конце 1960-х гг. отмечен тренд повышения температуры воздуха, которое было особенно заметным в 1990-е гг. [Васильчук, Суркова, 2020]. Для верификации уравнения были использованы средние значения $\delta^{18}\text{O}$ в современных ледяных жилках ($\delta^{18}\text{O}_{\text{ж.п}}$) в шести точках и среднеянварские температуры воздуха ($T_{\text{ср. янв}}$) за 1930–1966 и 1967–2000 гг.

по ближайшим к этим точкам метеостанциям. Установлено, что коэффициент k в зависимости $T_{\text{ср. янв}} = k\delta^{18}\text{O}_{\text{ж.п}}$ варьирует от 1,28 до 1, для 1930–1966 гг. (рис. 2, А) и от 1,33 до 1,56 – для 1967–2000 гг. (см. рис. 2, Б). Среднее значение коэффициента k в зависимости $T_{\text{ср. янв}} = k\delta^{18}\text{O}_{\text{ж.п}}$ за период метеонаблюдений и отбора образцов льда из жильных ростков составляет 1,4 (см. рис. 2, В). С учетом среднего значения коэффициента k для палеотемпературных реконструкций для региона севера Западной Сибири было использовано уравнение

$$T_{\text{ср. янв}} = 1,4\delta^{18}\text{O}_{\text{ж.п}} (\pm 3^\circ\text{C}). \quad (2)$$

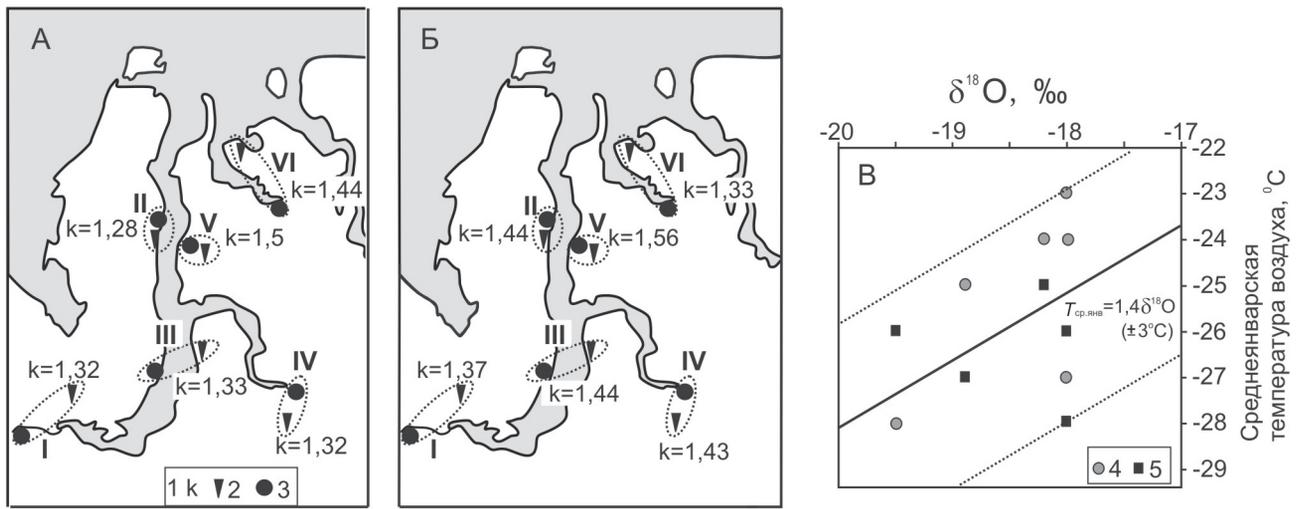


Рис. 2. Расчетные коэффициенты зависимости $T_{\text{ср. январь}} = k\delta^{18}\text{O}_{\text{ж.р}}$ для 1930–1966 гг. (А) и 1967–2000 гг. (Б): 1 – коэффициенты k ; 2 – современные жилые ростки; 3 – метеостанции (I – г. Салехард (ПЖЛ 1); II – м/с Сеяха (ПЖЛ 2), III – г. Ямбург – м/с Новый Порт; V – пос. Напалково – м/с аэропорт Напалково, VI – м/с пос. Гыда (ПЖЛ 6)); В – диаграмма соотношения $T_{\text{ср. январь}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{ж.р}}$ для 1930–1966 гг. (4) и 1967–2000 гг. (5)

Fig. 2. Ratio coefficients for the equation $T_{mJ} = k\delta^{18}\text{O}_{\text{ice veinlets}}$ for the periods of 1930–1966 (A) and 1967–2000 (B): 1 – coefficients k ; 2 – modern ice veinlets; 3 – weather stations (w/s) (I – IW 1 – w/s Salekhard town; II – IW 2 – w/s Seyakha settlement; III – Yamburg town – w/s Novy Port; V – Napalkovo settlement – w/s airport Napalkovo; VI – IW 6 – w/s Gyda settlement); B – diagram of the $T_{mJ} - \delta^{18}\text{O}_{\text{ice veinlets}}$ ratio for the 1930–1966 (4) and 1967–2000 (5)

Соотношение $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ во льду исследованных жил описывается уравнением $y = 7,62x + 3,4$ ($R^2 = 0,95$), что близко к локальной линии метеорных вод (ЛЛМВ), представляющей осадки, выпадающие преимущественно в виде снега в Салехарде и на Тазовском п-ове ($\delta^2\text{H} = 7,14\delta^{18}\text{O}-14,7$) и к глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ) (рис. 3). Для голоценовых ледяных жил значения d_{exc} (от 4,8 до 15‰) в

основном находятся в диапазоне значений d_{exc} для снега в Салехарде (от 2 до 9‰) и снежного покрова на Тазовском п-ове (от 9,5 до 19,5‰ [Васильчук и др., 2016]) и близки к значениям d_{exc} в современных жилых ростках (3,7–14,5‰). Это позволяет предположить, что ледяные жилы формировались из зимних осадков, изотопный состав которых почти не изменен процессами сублимации и/или испарения.

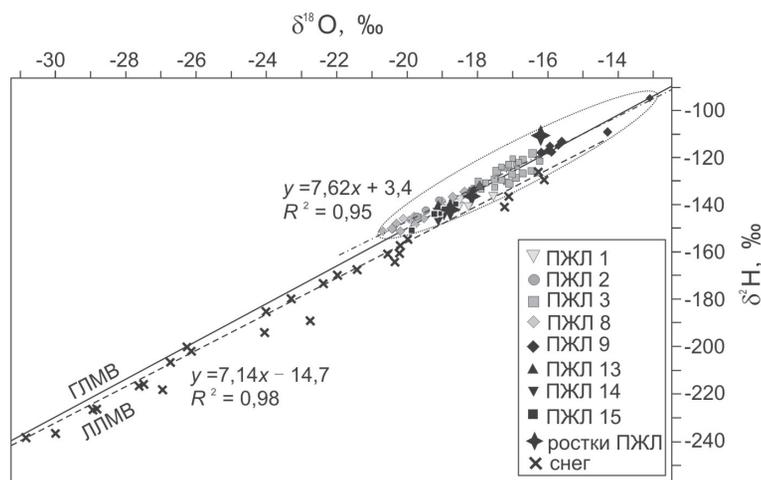


Рис. 3. Соотношение $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ в голоценовых и современных ледяных жилах, а также в современных зимних осадках (снеге) на севере Западной Сибири: ГЛМВ – глобальная линия метеорных вод, ЛЛМВ – локальная линия метеорных вод

Fig. 3. $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ ratio in Holocene and modern ice wedges, and in modern winter precipitation (snow) in the Northwestern Siberia. ГЛМВ – global meteoric water line, ЛЛМВ – local meteoric water line

Реконструкции среднеянварских температур воздуха для трех периодов голоцена. Средние значения $\delta^{18}\text{O}$ по ледяным жилам и уравнение (2) были использованы для расчетов приблизительных среднеянварских температур воздуха на севере Западной Сибири для выделенных периодов голоцена (табл. 2). Средние значения $\delta^{18}\text{O}$ по современным жильным росткам и голоценовым

жилам севера Западной Сибири стали основой для построения карт изоскейп (линий равных значений $\delta^{18}\text{O}$) для современных жил (рис. 4, А) и жил, формировавшихся в течение трех выделенных периодов голоцена (см. рис. 4, Б–Г). Отмечается в целом субмеридиональное положение изоскейп и снижение значений $\delta^{18}\text{O}$ в жилах с запада на восток.

Таблица 2

Период формирования голоценовых повторно-жильных льдов (ПЖЛ) на севере Западной Сибири, средние значения $\delta^{18}\text{O}$ в ПЖЛ и реконструированная среднеянварская температура воздуха $T_{\text{ср. янв}}$ для трех периодов голоцена

Участок с ПЖЛ (см. рис. 1, А)	^{14}C возраст вмещающих отложений, тыс. кал. лет назад	Среднее значение $\delta^{18}\text{O}$, ‰	Реконструированная $T_{\text{ср. янв}}$, °C ($\pm 3^\circ\text{C}$)*
Гренландский период (10,9–8,4 тыс. кал. лет назад)			
ПЖЛ 4	10,9–10,5	–15,0	–21,0
ПЖЛ 13	10,3–9,5	–18,6	–26,0
ПЖЛ 15	10–9	–19,2	–26,9
ПЖЛ 11	9,1–8,4	–18,1	–25,3
ПЖЛ 12	9,5–8,9	–17,7	–24,8
Гренландский – первая половина северогриппианского периодов (11,4–6 тыс. кал. лет назад)			
ПЖЛ 2	10,5–7,5	–19,6	–27,4
ПЖЛ 1	8,5–7	–19,1	–26,7
ПЖЛ 6а	11,4–7,4	–18,5	–25,9
ПЖЛ 14	8,9–6,1	–19,2	–26,9
ПЖЛ 9	8,8–6	–15,7	–22,0
ПЖЛ 10	9,6–6,4	–16,8	–23,5
ПЖЛ 16	9,4–6,2	–21,4	–30,0
Конец северогриппианского – мегхалайский периоды (5,2–0,9 тыс. кал. лет назад)			
ПЖЛ 3	5,2–2,4	–17,0	–23,8
ПЖЛ 6б	4,75–2,4	–19,5	–27,3
ПЖЛ 7	5–4	–18,8	–26,3
ПЖЛ 8	1,75–0,9	–19,6	–27,4
ПЖЛ 5	Точно не установлен	–17,5	–24,5

Примечание. *Рассчитана по уравнению (2).

Для реконструкции $T_{\text{ср. янв}}$ для гренландского периода голоцена использованы изотопные данные по жилам, датированным от 10,9 до 8,4 тыс. кал. лет. Реконструированные среднеянварские температуры варьировали от –21 до –26,9°C. Для реконструкции $T_{\text{ср. янв}}$ для гренландского – первой половины северогриппианского периодов голоцена использованы изотопные данные по жилам, датированным 11,4–6 тыс. кал. лет. Реконструированные среднеянварские температуры варьировали от –22 до –30°C. Для реконструкции $T_{\text{ср. янв}}$ для конца северогриппианского – мегхалайского периода голоцена были использованы изотопные

данные по жилам, датированным от 5,2 до 0,9 тыс. кал. лет. Реконструированные среднеянварские температуры варьировали от –23,8 до –27,4°C.

По реконструированным значениям $T_{\text{ср. янв}}$ построены карты приблизительных среднеянварских изотерм для ключевых периодов голоцена (рис. 5, Б–Г), для сравнения приведена карта современных среднеянварских изотерм (см. рис. 5, А). Можно отметить субмеридиональный характер палеоизотерм и тенденцию снижения значений $T_{\text{ср. янв}}$ с запада на восток исследуемой территории, что характерно и для современного этапа.

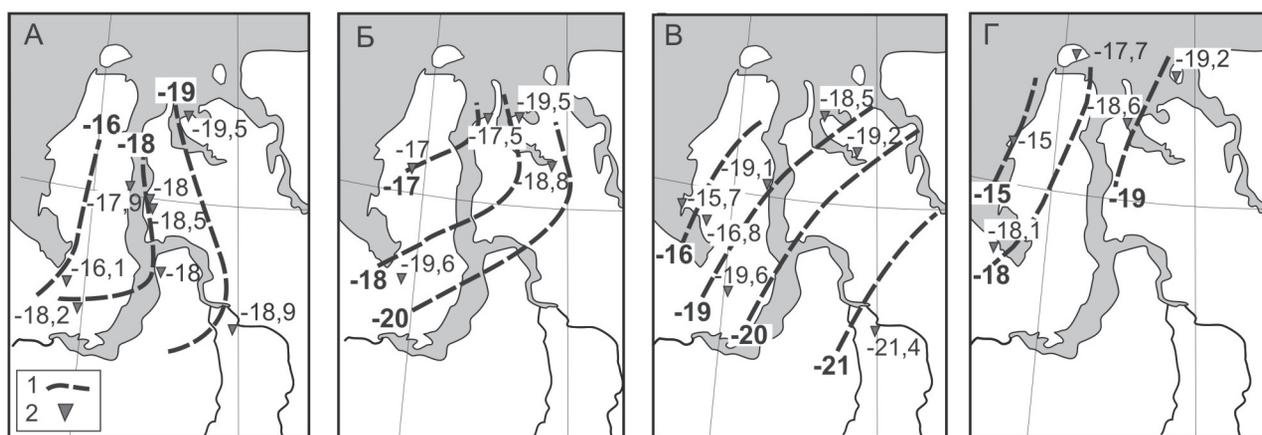


Рис. 4. Приблизительное положение изоскейп по средним значениям $\delta^{18}\text{O}$:

А – в современных ледяных жилках севере Западной Сибири; Б – в жилах, датированных концом северогриппианского – мегхалайским периодами голоцена (5,2–0,9 тыс. кал. лет назад); В – в жилах, датированных гренландским – первой половиной северогриппианского периода голоцена (11,4–6 тыс. кал. лет назад); Г – в жилах, датированных гренландским периодом голоцена (10,9–8,4 тыс. кал. лет назад); 1 – изоскейпы; 2 – участок ПЖЛ

Fig. 4. Approximate isoscapes for mean $\delta^{18}\text{O}$ values:

А – in modern ice veinlets in the Northwestern Siberia; Б – in ice wedges dated to the end of Northgrippian – Meghalayan stages of the Holocene, 5,2–0,9 cal ka BP; В – in ice wedges dated to Greenlandian – first half of Northgrippian stages of the Holocene, 11,4–6 cal ka BP; Г – in ice wedges dated to Greenlandian stage of the Holocene, 10,9–8,4 cal ka BP; 1 – isoscapes; 2 – ice wedge site

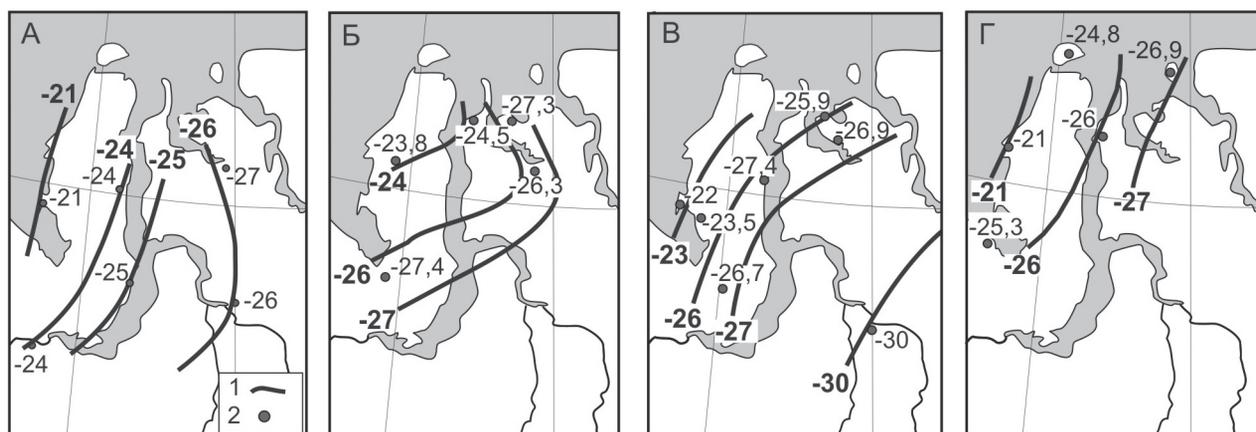


Рис. 5. Приблизительное положение изотерм средних значений среднеянварских температур воздуха севера Западной Сибири:

А – современных; Б – реконструированных для конца северогриппианского – мегхалайского периодов голоцена (5,2–0,9 тыс. кал. лет назад); В – для гренландского – первой половины северогриппианского периодов голоцена (11,4–6 тыс. кал. лет назад); Г – для гренландского периода голоцена (10,9–8,4 тыс. кал. лет назад); 1 – изотермы; 2 – среднеянварские температуры воздуха

Fig. 5. Approximate isotherms of mean January air temperature (T_{mj}) in the Northwestern Siberia:

А – modern; Б – reconstructed for the end of Northgrippian – Meghalayan stages of the Holocene, 5,2–0,9 cal ka BP; В – for Greenlandian – first half of Northgrippian stages of the Holocene, 11,4–6 cal ka BP; Г – for Greenlandian stage of the Holocene, 10,9–8,4 cal ka BP; 1 – isotherms; 2 – T_{mj}

Сопоставление карт палеоизотерм показало, что среднеянварские температуры на севере Западной Сибири в течение гренландского – первой половины северогриппианского периодов голоцена – интервала, который считается термическим оптимумом, так и в течение мегхалайского периода ухудшения климатических условий, были довольно близкими.

Сопоставление полученных палеоклиматических трендов для севера Западной Сибири с другими районами Арктики показывает, что в течение голоцена в одних районах отмечены более стабильные зимние климатические условия, в других зафиксирована явная тенденция повышения зимних температур воздуха от раннего к позднему голоцену. Для района низовий Колымы установлено, что

в течение голоцена среднеянварские температуры воздуха были довольно стабильными и близкими к современным, незначительное похолодание отмечено для мегхалайского периода [Vasil'chuk, Budantseva, 2022]. Для некоторых районов Северной Якутии показано, что зимние климатические условия в позднем голоцене существенно не изменились; общее ухудшение климатических условий обусловлено скорее снижением летних температур воздуха [Wetterich et al., 2009; Schwamborn et al., 2020]. Для востока Чукотки, региона дельты р. Лены и побережья Ойогосского Яра (пролив Дмитрия Лаптева) отмечена явная тенденция улучшения зимних климатических условий от раннего и среднего к позднему голоцену, при этом наиболее высокие значения зимних температур характерны для современного периода [Буданцева и др., 2020; Meyer et al., 2015; Opel et al., 2011].

ВЫВОДЫ

На севере Западной Сибири в пределах полуостровов Ямал, Гыданский и Тазовский повторно-жильные льды формировались на протяжении всего голоцена, их рост продолжается и в настоящее время. Установлено, что в пределах формирующихся торфяников повторно-жильные льды росли в течение гринландского – первой половины северогрип-

пианского периодов голоцена (между 11,4 и 6 тыс. кал. лет назад). В отложениях пойм, лайд, молодых торфяниках жилы формировались с конца северогриппианского – в течение всего мегхалайского периодов голоцена.

Для современных ледяных жилок отмечена устойчивая тенденция снижения значений $\delta^{18}\text{O}$ с запада на восток (от $-16,1$ до $-19,5\text{‰}$), что коррелирует с тенденцией снижения среднеянварской температуры воздуха ($T_{\text{ср. янв}}$) в этом направлении (от -22 до -26°C).

Карты изоскейп по голоценовым повторно-жильным льдам севера Западной Сибири показывают в целом субмеридиональное распределение значений $\delta^{18}\text{O}$ и их снижение с запада на восток, отмечаемое в течение каждого выделенного периода голоцена.

В течение гринландского и первой половины северогриппианского периодов голоцена (между 11,4 и 6 тыс. кал. лет назад) $T_{\text{ср. янв}}$ варьировала приблизительно от -21 до -30°C , с конца северогриппианского – в течение мегхалайского периодов голоцена (между 5,2 и 0,9 тыс. кал. лет назад) $T_{\text{ср. янв}}$ варьировала примерно от -24 до -27°C . Установлено субмеридиональное положение среднеянварских палеоизотерм, а также снижение значений $T_{\text{ср. янв}}$ с запада на восток для каждого выделенного периода голоцена.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда (грант № 23-17-00082).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баранская А.В., Романенко Ф.А., Арсланов Х.А. и др. Стратиграфия, возраст и условия формирования многолетнемерзлых отложений острова Белый // Криосфера Земли. 2018. Т. XXII. № 2. С. 3–15.
- Буданцева Н.А., Маслаков А.А., Васильчук Ю.К. и др. Реконструкция зимней температуры воздуха раннего и среднего голоцена по изотопному составу ледяных жил восточного побережья полуострова Дауркина, Чукотка // Лед и Снег. 2020. Т. 60. № 2. С. 251–262. DOI: 10.31857/S2076673420020038.
- Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Суркова Г.В., Чиждова Ю.Н. О надежности палеотемпературно-изотопных уравнений Васильчука и становлении изотопной палеогеокриологии // Арктика и Антарктика. 2021. № 2. С. 1–26. DOI: 10.7256/2453-8922.2021.2.36145.
- Васильчук Ю.К., Суркова Г.В. Верификация соотношения изотопного состава повторно-жильных льдов и температуры холодного периода за последние 80 лет на севере криолитозоны России // Метеорология и гидрология. 2020. № 11. С. 84–91.
- Васильчук Ю.К., Шевченко В.П., Лисицын А.П. и др. Изотопно-кислородный и дейтериевый состав снежного покрова Западной Сибири на профиле от Томска до Обской губы // Доклады РАН. 2016. Т. 471. № 5. С. 770–775. DOI: 10.7868/S086956521635022X.
- Облогов Г.Е. Эволюция криолитозоны побережья и шельфа Карского моря в позднем неоплейстоцене – голоцене: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук / ИКЗ РАН. Тюмень, 2016. 24 с.
- Опокина О.Л., Слагода Е.А., Стрелецкая И.Д. и др. Криолитология, гидрохимия и микробиология голоценовых озерных отложений и повторно-жильных льдов о-ва Сибирякова Карского моря // Природа шельфов и архипелагов Европейской Арктики. 2010. Вып. 10. С. 241–247.
- Романенко Ф.А., Андреев А.А., Сулержицкий Л.Д. и др. Особенности формирования рельефа и рыхлых отложений западного Ямала и побережья Байдарцкой губы (Карское море) // Проблемы общей и прикладной геоэкологии Севера / под ред. В.И. Соломатина. М.: Изд-во МГУ, 2001. С. 41–68.
- Слагода Е.А., Опокина О.Л., Рогов В.В., Курчатова А.Н. Строение и генезис подземных льдов в верхнеплейстоцен-голоценовых отложениях мыса Марре-Сале (Западный Ямал) // Криосфера Земли. 2012. Т. 16. № 2. С. 9–22.
- Стрелецкая И.Д., Васильев А.А., Слагода Е.А. и др. Полигонально-жильные льды на острове Сибирякова (Карское море) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2012. № 3. С. 57–63.

- Bronk Ramsey C. Bayesian analysis of radiocarbon dates, *Radiocarbon*, 2009, vol. 51(1), p. 337–360.
- Butzin M., Werner M., Masson-Delmotte V. et al. Variations of oxygen-18 in West Siberian precipitation during the last 50 years, *Atmos. Chem. Phys.*, 2014, vol. 14, p. 5853–5869, DOI: 10.5194/acp-14-5853-2014.
- Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation, *Tellus*, 1964, vol. 16, p. 436–468.
- Meyer H., Opel T., Laepple L. et al. Long-term winter warming trend in the Siberian Arctic during the mid- to late Holocene, *Nature Geoscience*, 2015, vol. 8, p. 122–125, DOI: 10.1038/NGEO2349.
- Opel T., Dereviagin A.Y., Meyer H. et al. Palaeoclimatic information from stable water isotopes of Holocene ice wedges on the Dmitrii Laptev Strait, northeast Siberia, Russia, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2011, no. 22, p. 84–100, DOI: 10.1002/ppp.667.
- Opel T., Meyer H., Wetterich S. et al. Ice wedges as archives of winter paleoclimate: A review, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2018, vol. 29(3), p. 199–209, DOI: 10.1002/ppp.1980.
- Reimer P.J., Austin W.E.N., Bard E. et al. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP), *Radiocarbon*, 2020, vol. 62, no. 4, p. 725–757, DOI: 10.1017/RDC.2020.41.
- Schwamborn G., Manthey C., Diekmann B. et al. Late Quaternary sedimentation dynamics in the Eenchime-Salaatinsky Crater, Northern Yakutia, *Arktos*, 2020, vol. 6(1), p. 75–92, DOI: 10.1007/s41063-020-00077-w.
- Tikhonravova Ya., Slogoda E., Butakov V. et al. Isotopic composition of heterogeneous ice wedges in peatlands of the Pur-Taz interfluvium (northern West Siberia), *Permafrost and Periglacial Processes*, 2022, vol. 33(2), p. 114–128, DOI: 10.1002/ppp.2138.
- Vasil'chuk Y.K. Reconstruction of the palaeoclimate of the Late Pleistocene and Holocene of the basis of isotope studies of subsurface ice and waters of the permafrost zone, *Water Resources*, 1991, vol. 17(6), p. 640–647.
- Vasil'chuk Y.K., Budantseva N.A. Holocene ice wedges of the Kolyma Lowland and January paleotemperature reconstructions based on oxygen isotope records, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2022, vol. 33(1), p. 3–17, DOI: 10.1002/ppp.2128.
- Walker M., Head M.J., Lowe J. et al. Subdividing the Holocene Series/Epoch: formalization of stages/ages and sub-series/subepochs, and designation of GSSPs and auxiliary stratotypes, *Journal of Quaternary Science*, 2019, vol. 34, no. 3, p. 173–186, DOI: 10.1002/jqs.3097.
- Wetterich S., Schirrmeister L., Andreev A.A. et al. Eemian and Late Glacial/Holocene palaeoenvironmental records from permafrost sequences at the Dmitry Laptev Strait (NE Siberia, Russia), *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2009, no. 279, p. 73–95, DOI: 10.1016/j.palaeo.2009.05.002.

Поступила в редакцию 20.10.2023

После доработки 05.12.2023

Принята к публикации 14.02.2024

ISOSCAPES AND PALEOISOTHERMS OF THE HOLOCENE MEAN JANUARY AIR TEMPERATURE IN THE NORTHWESTERN SIBERIA (BASED ON STABLE OXYGEN ISOTOPE COMPOSITION OF ICE WEDGES)

N.A. Budantseva¹, Yu.K. Vasil'chuk², A.C. Vasil'chuk³

^{1–3} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography

¹ Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: nadin.budanceva@mail.ru

² Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Professor, D.Sc. in Geology and Mineralogy; e-mail: vasilch@geol.msu.ru

³ Laboratory of Geoecology of the North, Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: alla-vasilch@yandex.ru

Holocene ice wedges at 16 sites in the Northwestern Siberia were studied, the age of ice wedges was determined, and stable isotope data ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values) for all studied ice wedges have been summarized. The $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ ratio and the d_{exc} values for ice wedge ice indicate good preservation of the isotope signal of winter precipitation in ice, which allows to use the obtained $\delta^{18}\text{O}$ values for paleotemperature reconstructions. The isoscapes (lines of equal $\delta^{18}\text{O}$ values) created for the Holocene ice wedges and modern ice veinlets are generally submeridional; the $\delta^{18}\text{O}$ values decrease from west to east of the study area. Taking into account a new Holocene tripartite division scheme it was shown that the mean January air temperature (T_{mj}) in the Northwestern Siberia ranged approximately from -21 to -30°C during Greenlandian and the first half of the Northgrippian stage of the Holocene (11,4 to 6 cal ka BP) and approximately from -24 to -27°C from the end of the Northgrippian – to the Meghalayan stage of the Holocene (5,2 to 0,9 cal ka BP). The Holocene isotherms are close to the modern submeridional position and show an eastward decrease in T_{mj} values. Winter climatic conditions in the Northwestern Siberia were generally stable during the Holocene, meanwhile T_{mj} was on average $1-2^\circ\text{C}$ lower than modern ones.

Keywords: ice wedges, oxygen isotopes, hydrogen isotopes, radiocarbon age

Acknowledgments. The research was financially supported by the Russian Science Foundation (grant 23-17-00082).

REFERENCES

- Baranskaya A.V., Romanenko F.A., Arslanov H.A. et al. Perennially frozen deposits of Belyi Island: stratigraphy, age, depositional environments, *Earth's Cryosphere*, 2018, vol. XXII(2), p. 3–15, DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-2(3-15).
- Bronk Ramsey C. Bayesian analysis of radiocarbon dates, *Radiocarbon*, 2009, vol. 51(1), p. 337–360.
- Budantseva N.A., Maslakov A.A., Vasil'chuk Yu.K. et al. Rekonstruktsiya zimnej temperatury vozduha rannego i srednego golotsena po izotopnomu sostavu ledyanyh zhil vostochnogo poberezh'ya poluostrova Daurkana, Chukotka [Winter air temperature in the early and middle Holocene on the eastern coast of Daurkin Peninsula, Chukotka, reconstructed from stable isotopes of ice wedges], *Led i Sneg*, 2020, vol. 60(2), p. 251–262, DOI: 10.31857/S2076673420020038. (in Russian)
- Butzin M., Werner M., Masson-Delmotte V. et al. Variations of oxygen-18 in West Siberian precipitation during the last 50 years, *Atmos. Chem. Phys.*, 2014, vol. 14, p. 5853–5869, DOI: 10.5194/acp-14-5853-2014.
- Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation, *Tellus*, 1964, vol. 16, p. 436–468.
- Meyer H., Opel T., Laepple L. et al. Long-term winter warming trend in the Siberian Arctic during the mid- to late Holocene, *Nature Geoscience*, 2015, vol. 8, p. 122–125, DOI: 10.1038/NNGEO2349.
- Oblogov G.E. *Evolyuciya kriolitozony poberezh'ya i shel'fa Karskogo morya v pozdnem neoplejstocene – golocene* [Evolution of permafrost of the Kara Sea coast and shelf in Late Pleistocene and Holocene], Ph.D. Thesis, 2016, p. 144 p. (in Russian)
- Opel T., Dereviagin A.Y., Meyer H. et al. Palaeoclimatic information from stable water isotopes of Holocene ice wedges on the Dmitrii Laptev Strait, northeast Siberia, Russia, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2011, vol. 22, p. 84–100, DOI: 10.1002/ppp.667.
- Opel T., Meyer H., Wetterich S. et al. Ice wedges as archives of winter paleoclimate: A review, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2018, vol. 29(3), p. 199–209, DOI: 10.1002/ppp.1980.
- Opokina O.L., Slagoda E.A., Streletskaya I.D. et al. [Cryolithology, hydrochemistry and microbiology of Holocene lake and ice wedge ice of the Sibiriyakov Island of Kara Sea], *Privroda shel'fov i arhipelagov Evropejskoj Arktiki* [The nature of the shelves and archipelagos of the European Arctic], 2010, iss. 10, p. 241–247. (in Russian)
- Reimer P.J., Austin W.E.N., Bard E. et al. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP), *Radiocarbon*, 2020, vol. 62(4), p. 725–757, DOI: 10.1017/RDC.2020.41.
- Romanenko F.A., Voskresenskiy K.S., Tarasov P.E. et al. [The relief and loose sediments forming features on the Western Yamal and Baydaratskaya Bay coast (Kara Sea)], *Problemy obshchej i prikladnoj geokologii Severa* [Problems of general and applied geocology of the North], VI. Solomatin (ed.), Moscow, MSU Publ., 2001, p. 41–68. (in Russian)
- Schwamborn G., Manthey C., Diekmann B. et al. Late Quaternary sedimentation dynamics in the Eenchime-Salaatinsky Crater, Northern Yakutia, *Arktos*, 2020, vol. 6(1), p. 75–92, DOI: 10.1007/s41063-020-00077-w.
- Slagoda E.A., Opokina O.L., Rogov V.V., Kurchatova A.N. Stroenie i genesis podzemnyh ldov v verhnepleistotsen-golotsenovyyh otlozheniyah mysa Marre-Sale (Zapadnyj Yamal) [Structure and genesis of the underground ice in the Neopleistocene-Holocene sediments of Marre-Sale Cape, Western Yamal], *Kriosfera Zemli*, 2012, vol. XVI(2), p. 9–22. (in Russian)
- Streletskaya I.D., Vasiliev A.A., Slagoda E.A. et al. Poligonalno-zhilnye ldy na ostrove Sibiriyakova (Karskoe more) [Polygonal ground-ice wedges on the Sibiriyakov Island (the Kara Sea)], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2012, vol. 3, p. 57–63. (in Russian)
- Tikhonravova Ya., Slagoda E., Butakov V. et al. Isotopic composition of heterogeneous ice wedges in peatlands of the Pur-Taz interfluvium (northern West Siberia), *Permafrost and Periglacial Processes*, 2022, p. 1–15, DOI: 10.1002/ppp.2138.
- Vasil'chuk Y.K., Shevchenko V.P., Lisitzin A.P. et al. Oxygen isotope and deuterium composition of snow cover on the profile of Western Siberia from Tomsk to the Gulf of Ob, *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 471(2), p. 1284–1287, DOI: 10.1134/S1028334X1612014X.
- Vasil'chuk Y.K., Surkova G.V. Verification of the relationship between the isotopic composition of ice wedges and cold-season temperature over the recent 80 years in the northern permafrost zone of Russia, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2020, vol. 45(11), p. 791–796, DOI: 10.3103/S1068373920110060.
- Vasil'chuk A.C., Budantseva N.A., Surkova G.V., Chizhova Ju.N. O nadezhnosti paleotemperaturno-izotopnykh uravnenij Vasilchuka i stanovlenii izotopnoj paleogeokriologii [On the reliability of Vasil'chuk's paleotemperature-isotopic equations and the formation of isotopic paleogeocryology], *Arktika i Antarktika*, 2021, vol. 2, p. 1–25, DOI: 10.7256/2453-8922.2021.2.36145. (in Russian)
- Vasil'chuk Y.K. Reconstruction of the palaeoclimate of the Late Pleistocene and Holocene of the basis of isotope studies of subsurface ice and waters of the permafrost zone, *Water Resources*, 1991, vol. 17(6), p. 640–647.
- Vasil'chuk Y.K., Budantseva N.A. Holocene ice wedges of the Kolyma Lowland and January paleotemperature reconstructions based on oxygen isotope records, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2022, vol. 33(1), p. 3–17, DOI: 10.1002/ppp.2128.
- Walker M., Head M.J., Lowe J. et al. Subdividing the Holocene Series/Epoch: formalization of stages/ages and subseries/subepochs, and designation of GSSPs and auxiliary stratotypes, *Journal of Quaternary Science*, 2019, vol. 34(3), p. 173–186, DOI: 10.1002/jqs.3097.
- Wetterich S., Schirmermeister L., Andreev A.A. et al. Eemian and Late Glacial/Holocene palaeoenvironmental records from permafrost sequences at the Dmitry Laptev Strait (NE Siberia, Russia), *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2009, vol. 279, p. 73–95, DOI: 10.1016/j.palaeo.2009.05.002.

Received 20.10.2023

Revised 05.12.2023

Accepted 14.02.2024

ДИНАМИКА ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 551.583: 551.89(470.2-474.2)

РАЗВИТИЕ И ХРОНОЛОГИЯ КЛИМАТО-ФИТОЦЕНОТИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ПОЗДНЕГО НЕОПЛЕЙСТОЦЕНА (МИС 5–МИС 3) НА ЮГО-ВОСТОЧНОМ ПОБЕРЕЖЬЕ ФИНСКОГО ЗАЛИВА

Н.С. Болиховская¹, А.Н. Молодков²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория новейших отложений и палеогеографии плейстоцена, вед. науч. сотр.; кафедра геоморфологии и палеогеографии, проф.; д-р геогр. наук; e-mail: natbolikh@mail.ru

²Таллинский технологический университет, отдел геологии, научно-исследовательская лаборатория четвертичной геохронологии, зав. лабораторией, д-р геол.-минерал. наук; e-mail: anatoli.molodkov@ttu.ee

Представлен анализ дискуссионной проблемы ранга выделяемых климатостратиграфических подразделений периода двух морских изотопных стадий (МИС) – МИС 5 и МИС 4. Выполнен обзор важнейших для корреляционных построений палинологических записей микулинского межледникового разреза северо-запада Восточно-Европейской равнины. Представительная серия абсолютных датировок, полученных ИК-ОСЛ методом, и детальные палинологические записи позволили выполнить климато-хроностратиграфическое расчленение позднеплейстоценовой толщи опорного разреза Вока на юго-восточном побережье Финского залива. Репрезентативные палинологические спектры убедительно свидетельствуют о теплом интервале межледникового ранга во второй половине МИС 5, отвечающем стандартным микулинским палинозомам M_6 , M_7 , M_8 , а также о периоде значительного похолодания МИС 4, характеризующегося доминированием в районе исследований формаций перигляциальной растительности, что противоречит точке зрения о развитии в это время обширного *калининского оледенения*, распространявшегося, как полагают, на многие сотни километров южнее Финского залива. Данные по МИС 3 свидетельствуют о двухкратном чередовании интервалов межстадиального и стадийного (перигляциального) климата в период от 39 до 33 тыс. л. н.

Впервые для территории Восточно-Европейской равнины (и Северной Евразии в целом) подробно реконструированы и датированы климато-фитоценотические сукцессии палеоклиматических событий межледникового, эндотермального, межстадиального и стадийного рангов периода примерно 100–30 тыс. л. н., отвечающего второй половине МИС 5, МИС 4 и интервалу 39–33 тыс. л. н. МИС 3.

Ключевые слова: поздний плейстоцен, палинология, ИК-ОСЛ хронология, климатостратиграфия, растительность, межрегиональная корреляция

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.8

ВВЕДЕНИЕ

Поздний плейстоцен, которому соответствует поздний неоплейстоцен российской стратиграфической шкалы, – наиболее изученный этап в четвертичной истории геологического развития Северной Евразии. Тем не менее остается еще много вопросов относительно возраста и ландшафтно-климатических особенностей теплых и холодных интервалов разного ранга, реконструируемых для этого этапа. Особенно противоречивы представления о длительности и климаторитмике межледникового и раннеледникового позднего плейстоцена.

На территории Центра и Северо-Западного сектора Восточно-Европейской равнины результаты

палеоботанического (спорово-пыльцевого, диатомового и палеокарпологического) исследования получены для нескольких сотен разрезов морских и континентальных (озерных, озерно-болотных, болотных, аллювиальных, палеопочвенных) отложений последнего межледникового плейстоцена – микулинского в межрегиональной стратиграфической шкале России, муравинского в Беларуси, пранглинского в Эстонии, мяркинского в Литве, фелициановского в Латвии, эемского в Западной Европе. Однако вплоть до последних лет здесь отсутствовали палино- и климато-хроностратиграфические реконструкции палеоклиматических событий позднего плейстоцена, полученные по разрезам с наиболее

полно представленной на данной территории позднплейстоценовой толщей, вся седиментационная последовательность которой была бы охарактеризована детальными палинологическими записями и хронологическими шкалами, базирующимися на репрезентативных сериях абсолютных дат. В связи с этим к числу дискуссионных правомерно должны быть отнесены выводы о продолжительности, временных границах, климаторитмике, региональных особенностях флор и климато-фитоценологических сукцессий межледникового и ледникового интервалов, а также выполняемые корреляции палеоклиматических событий позднего плейстоцена.

Согласно доминирующим представлениям [Mangerud, 1989; Svendsen et al., 2004], сформировавшимся, очевидно, под влиянием концепции отражения глобального климата стадиями изотопно-кислородной кривой [Shackleton, 1969], большая часть территории Северной Евразии во второй половине морской изотопной стадии (МИС) 5 (примерно от 117 до 70 тыс. л. н.) находилась в зоне первого позднплейстоценового оледенения, а межледниковые позднплейстоценовые отложения формировались лишь в течение относительно непродолжительного периода времени (около 13 тыс. л. н.), сопоставляемого с подстадией МИС 5e (~130–117 тыс. л. н.). Соответственно этим взглядам, по примеру Я. Мангеруда [Mangerud, 1989], выполнившего корреляцию стратиграфических подразделений последнего межледникового/ледникового цикла в Северной Европе с кислородно-изотопной стратиграфией, большинством специалистов принято следующее деление и корреляция стратиграфических единиц позднего плейстоцена: московско-валдайское (микулинское, земское) межледниковье (МИС 5e, ~130–117 тыс. л. н.) и валдайская (вейхсельская) ледниковая эпоха с периодами раннего (МИС 5d–5a, 117–70 тыс. л. н.), среднего (МИС 4 – МИС 3, 70–25 тыс. л. н.) и позднего (МИС 2, 25–11,7 тыс. л. н.) валдайского этапов.

Однако этим корреляциям противоречат датировки микулинских (муравинских, меркинских) отложений Восточно-Европейской равнины, полученные $^{230}\text{Th}/\text{U}$ методом в разрезах Микулино (113±11 тыс. л. н.), Нижняя Боярщина [Кузнецов и др., 2002; Максимов и др., 2021], Мурава (102±11,9 тыс. л. н.) [Sanko, 2004], а также двумя палеодозиметрическими (ИК-ОСЛ – оптически инфракрасно-стимулированной люминесценции, ЭПР – электронного парамагнитного резонанса) методами в разрезах Литвы (Нятесос, Меркине, Йонионис и др.) – от 113,1±7,3 тыс. л. н. до 70,7±5,5 тыс. л. н. [Baltrūnas et al., 2013; Gaigalas, Molodkov, 2002]. Так, данные палеоботанического изучения и $^{230}\text{Th}/\text{U}$ датирования торфов и гиттий разрезов Нижняя Боярщина (Смоленская обл.), Килешино и Большая Дубенка (Тверская обл.) свидетель-

ствуют, что лишь первая половина межледниковья, соответствующая стандартным палинозонам M_1 – M_4 , относится к МИС 5e [Максимов и др., 2021].

Материалы хронологических и палинологических исследований авторов данной работы также не подтверждают доминирующих ныне представлений. По результатам наших исследований в интервале примерно от 145–140 до 70 тыс. л. н., сопоставимом с завершающей фазой МИС 6 и со всей МИС 5, на севере Евразии происходило накопление трансгрессивных морских осадков, что на внутриконтинентальных территориях европейской части России могло отвечать микулинскому межледниковому горизонту [Bolikhovskaya, Molodkov, 2006]. Установлено, что климаторитмика микулинского межледникового этапа была сложной как по наиболее полным палинологическим записям, зафиксировавшим климатические оптимумы и внутримежледниковые (эндотермальные) похолодания в изученных опорных континентальных разрезах [Болиховская, 1995, 2007], так и по кластерам датировок, полученных электронно-парамагнитно-резонансным (ЭПР) методом для морских трансгрессивных осадков, в которых также выделяются несколько термических максимумов, разделенных эндотермальными похолоданиями [Molodkov, Bolikhovskaya, 2009]. Причем 84% всех находок раковин морских и пресноводных моллюсков на территориях выше 55° с. ш. (около 200) в интервале 130–70 тыс. л. н. и ЭПР датировок по ним приходится на интервал 110–70 тыс. л. н. (МИС 5d–5a), что предполагает существование наиболее благоприятных климатических условий в этом интервале МИС 5.

Решению изложенных выше дискуссионных вопросов способствуют полученные авторами и представленные в настоящей статье результаты детального палинологического (спорово-пыльцевого) анализа и абсолютного датирования ИК-ОСЛ методом позднплейстоценовых отложений опорного разреза Вока. Впервые для территории Восточно-Европейской равнины (и Северной Евразии в целом) подробно реконструированы и датированы климато-фитоценологические сукцессии основных палеоклиматических событий интервала примерно от 100 до 30 тыс. л. н., отвечающего второй половине МИС 5, МИС 4 и МИС 3.

ОБЪЕКТ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Опорный разрез Вока (59°24,9' с. ш., 27°35,9' в. д., рис. 1А) расположен на берегу Финского залива, в пределах глинтавой бухты (см. рис. 1Б). Здесь в береговом обрыве (протяженностью около 2,2 км) в центральной части обнажения вскрывается ~22-метровая толща субаквальных (озерных) осадков.

При отсутствии результатов абсолютного датирования в предшествующих исследованиях, базировавшихся на геолого-геоморфологических данных и литологических особенностях горизонтов этого разреза, а также динамике отступления последнего ледника на территории Эстонии, предполагалось, что здесь представлены позднеледниковые осадки Балтийского приледникового озера [Miidel 2003; Raukas, Stankowski, 2005], существовавшего в интервале от 14,4 до 12,2 тыс. л. н.

Однако уже первыми результатами датирования толщи рыхлых отложений Воки ИК-ОСЛ ме-

тодом установлен ее значительно более древний позднеплейстоценовый возраст [Molodkov, 2007], подтвержденный палинологическими данными [Bolikhovskaya, Molodkov, 2007; Болиховская, Молодьков, 2009]. Серии ИК-ОСЛ датировок, полученные по представительной коллекции образцов отложений разреза, свидетельствуют, что изученные осадки имеют возраст в интервале примерно от 100 до 30 тыс. л. н. (рис. 2). Такие разрезы, охватывающие столь длительный период позднего плейстоцена, в Северо-Западном регионе Восточно-Европейской равнины крайне редки.

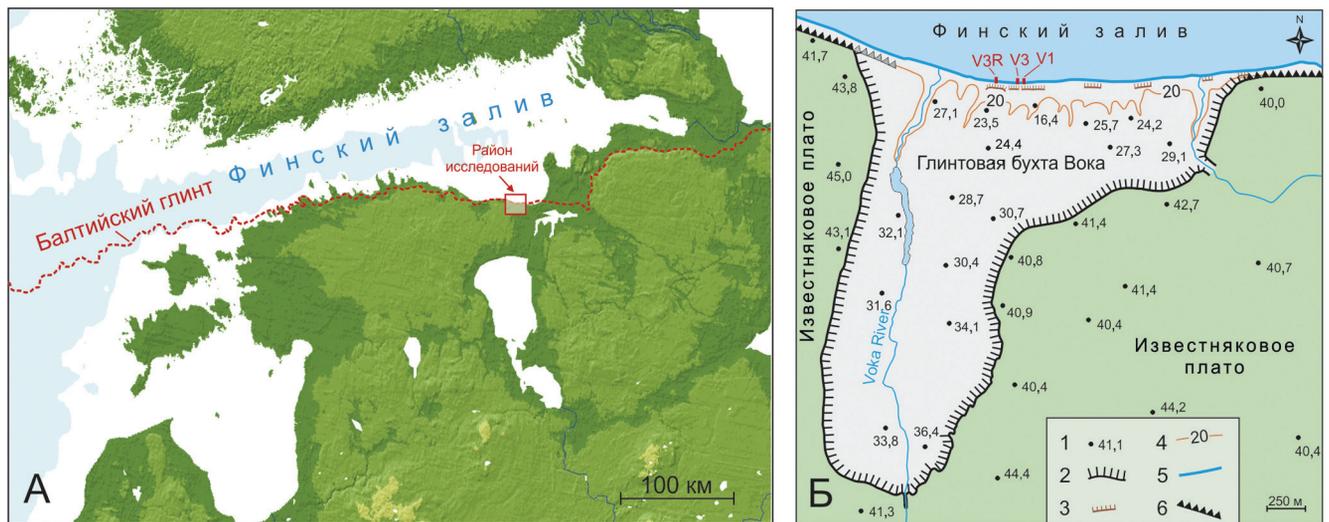


Рис. 1. Местоположение обнажения Вока (А) и схема глинтавой бухты Вока с расположением расчисток изученных отложений (Б): 1 – отметки абсолютных высот; 2 – граница глинтавой бухты Вока; 3 – обнажение; 4 – 20-метровая изолиния; 5 – береговая линия; 6 – глинт

Fig. 1. Location map of the Voka outcrop (A) and scheme of the Voka clint bay with locations of the studied outcrops (B): 1 – elevations above sea level; 2 – Voka clint-bay boundary; 3 – outcrop; 4 – 20 m contour line; 5 – coastline; 6 – clint

Геологическое строение разреза и геолого-геоморфологическая характеристика изучаемого района подробно освещались нами ранее [Bolikhovskaya, Molodkov, 2007; Болиховская, Молодьков, 2009]. В разрезе выделяются два основных литолого-стратиграфических компонента. Под современной почвой в интервале глубин от 1,85 до 12,15 м обнажается датированная интервалом от ~ 39 до 30 тыс. л. н. толща «А» (профиль V3-05), сложенная мелко- и тонкозернистыми параллельно-слоистыми песками, местами замещающимися глинистыми отложениями с песчаными прослоями. Эта толща отделяется от нижележащей толщи «Б» (профили V1-05 и V3R) микулинских и ранневалдайских осадков маломощным гравийно-галечным «маркерным» прослоем, свидетельствующем наряду с данными ИК-ОСЛ датирования о сравнительно коротком (около 700 лет) перерыве осадконакопления. Толща «Б» в восточной части обнажения (V1-05) представлена

мелко- и среднезернистыми песками с прослоями суглинков и глин, а в западном крыле (V3R) – преимущественно глинистыми осадками с тонкими прослоями суглинков и песков в верхней части.

При палинологическом изучении позднеплейстоценовых отложений разреза Вока и стратиграфо-палеогеографической интерпретации полученных спорово-пыльцевых данных использовались преимущественно стандартные методические приемы [Гричук, Заклинская, 1948; Гричук, 1961, 1966; Болиховская, 1995, 2010].

В ледниковых регионах северо-запада Восточно-Европейской равнины основная трудность палинологического анализа позднеплейстоценовых озерных, аллювиальных и морских отложений и установления их принадлежности к межледниковым или ледниковым, межстадиальным или стадийным климатохронам связана с необходимостью выявить переотложенные пыльцевые зерна и

споры. В связи с этим для получения корректных репрезентативных данных и надежной дифференциации автохтонных и аллохтонных компонентов, присутствующих в палинологических комплексах, при выделении палиноморф применялись наиболее щадящие методы физико-химического дизагрегирования и диспергации отложений, не разрушающие спорополлениновые оболочки пыльцы и спор. Подробное изучение и документирование тафономических особенностей пыльцы и спор выполнялось с

помощью микроскопа AXIO Imager D1 и цифровой камеры AXIO Cam. Для каждого исследуемого образца создана коллекция цифровых снимков пыльцы деревьев, кустарников, травяно-кустарничковых растений и спор несомненного *in situ* комплекса и аллохтонных (с разной степенью минерализации и деструкции) зерен. Примеры автохтонных и перетолженных пыльцевых и споровых зерен, а также докайнозойских палиноморф, присутствующих в отложениях разреза Вока, показаны на рис. 3.

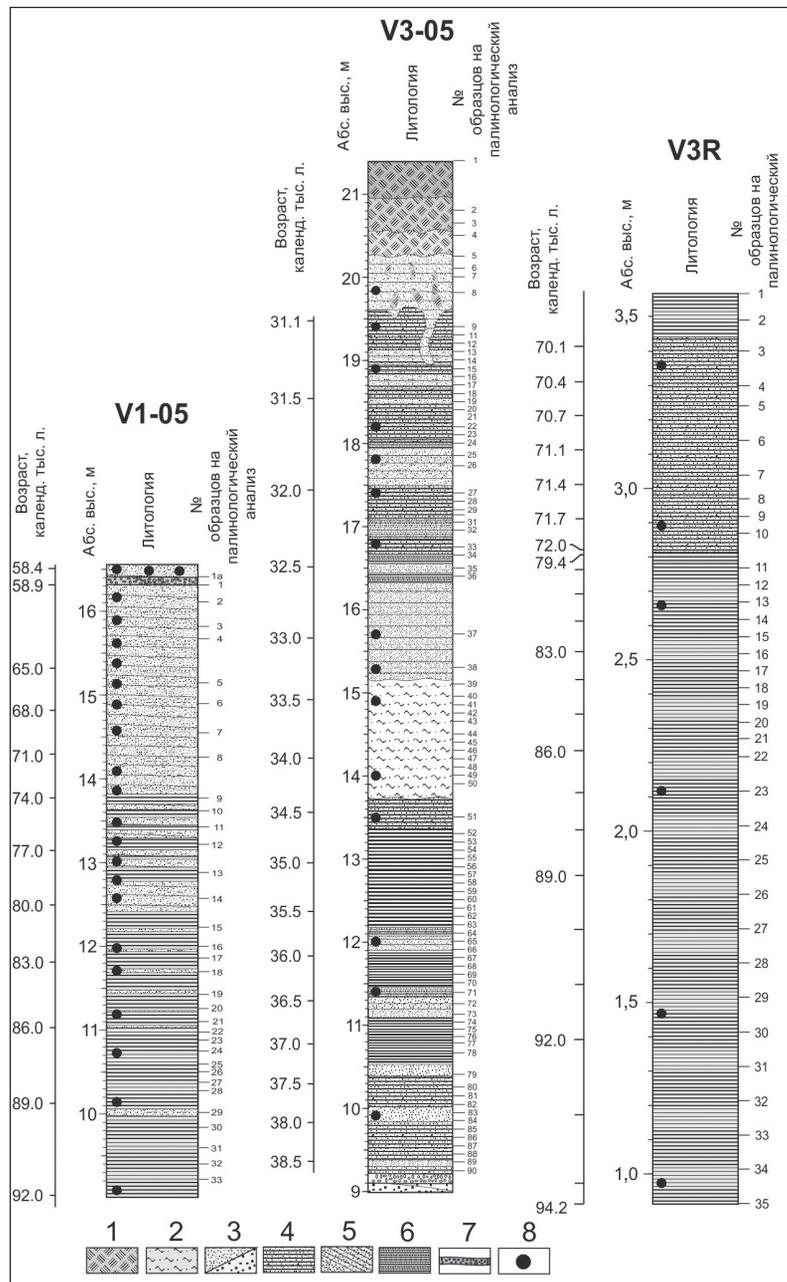


Рис. 2. Схема строения и абсолютный возраст отложений в изученных профилях опорного разреза Вока: 1 – современная почва; 2 – суглинки; 3 – тонко- и крупнозернистые пески; 4 – горизонтально-слоистые пески; 5 – косослоистые пески; 6 – глинистые осадки; 7 – гравийный слой; 8 – точки отбора образцов для ИК-ОСЛ датирования

Fig. 2. Lithological structure and absolute age of deposits in the studied profiles of the Voka outcrop sections: 1 – modern soil; 2 – loams; 3 – fine- and coarse-grained sands; 4 – horizontally layered sands; 5 – cross-stratified sands; 6 – clay sediments; 7 – gravel layer; 8 – sampling points for IR-OSL dating



Рис. 3. Пыльца (*in situ* и переотложенная), споры (*in situ*) и переотложенные докайнозойские мiosпоры из отложений, вскрытых в профиле V3R разреза Вока ($\times 400$)

Fig. 3. Images of the pollen (*in situ* and re-deposited), spores (*in situ*) and re-deposited Pre-Cenozoic miospores found in the Voka V3R deposition sequence (zoom $\times 400$)

Вкупе в автохтонных микулинской и ранневалдайской палинофлорах определены пыльца и споры более 150 таксонов: группа деревьев и кустарников (AP – Arboreal pollen) содержит более 50 родов и видов, группа трав и кустарничков (NAP – Non-Arboreal pollen) – более 70 семейств, родов и видов, а группа спор – около 30 таксонов мхов, папоротников, плаунов и т. д. Весь список в [Molodkov, Bolikhovskaya, 2022].

В иллюстрирующих результаты палинологических исследований спорово-пыльцевых диаграммах

на сводном графике AP/NAP/SP содержания пыльцы деревьев, кустарников, трав и кустарничков, а также спор показаны в процентах от общей суммы пыльцы и спор. Процентное содержание пыльцы или спор каждого таксона рассчитано по отношению к его содержанию в соответствующей группе: таксона деревьев и кустарников – от суммы пыльцы деревьев и кустарников; таксона трав и кустарничков – от суммы пыльцы трав и кустарничков; таксона высших споровых растений – от суммы спор.

Подробные палинологические записи, полученные по данным ~ 130 репрезентативных спорово-пыльцевых спектров, позволили выполнить детальное климатостратиграфическое расчленение изученной позднеплейстоценовой толщи, зафиксировать «пробелы» в геологической летописи Воки, реконструировать климато-фитоценотические сукцессии и временные границы межледниковых и эндотермальных, межстадиальных и стадиальных ландшафтно-климатических событий.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Палиноклиматостратиграфия последнего межледниковья плейстоцена. С целью определения путем сравнительного анализа стратиграфического положения и ранга (межстадиального, межледникового(?)) детально изученных палинологическим методом позднеплейстоценовых отложений разреза Вока, рассмотрим основные данные по спорово-пыльцевым последовательностям, полученным для восточно-европейского межрегионального стратотипа и парастратотипа микулинского межледниковья, а также разрезов Эстонии и Ленинградской области.

Характерные особенности спорово-пыльцевых записей, полученных для стратотипа (горизонта торфа в разрезе у с. Микулино в 32 км к северо-западу от г. Смоленска) и парастратотипа (озерно-болотной толщи разреза у д. Нижняя Боярщина на р. Ка-спле) микулинского межледниковья, а также состав показательных видов микулинской флоры [Гричук, 1961, 1989 и др.] позволяют надежно определять принадлежность изученных палинологическим методом разрезов Центра и Северо-Запада Восточно-Европейской равнины к последнему интергляциалу плейстоцена. Специфическая структура последовательностей максимумов пыльцы бореальных (ель, сосна, береза) и широколиственных (дуб, вяз, липа, граб) таксонов дендрофлоры (табл.), установленная В.П. Гричуком по этим представительным записям, является корреляционным и диагностическим эталоном палиностратиграфии микулинского межледниковья на обширном пространстве Восточно-Европейской равнины. Она устойчиво выражена на палинологических диаграммах микулинских отложений в разрезах позднего неоплейстоцена не только ледниковой [Махнач, 1971; Девятова, 1972; Гричук и др., 1973; Кондратене, 1996; Borisova et al., 2007; Новенко, 2016], но и ледниково-перигляциальной и внеледниковой зон этой территории [Болиховская, 1995; Zelikson, 1995; Gerasimenko, 2001, 2006], а также разрезов Западной и Центральной Европы [Гричук, 1982; Menke, Tynni, 1984].

Согласно сменам кульминаций пыльцы широколиственных пород в осадках, отвечающих ин-

тервалам с самыми оптимальными на протяжении межледниковья климатическими условиями, и пыльцы бореальных пород в начальные и заключительные периоды этого термохрона, В.П. Гричук выделил 8 палинозон (ПЗ) – М₁–М₈, характеризующих фазы в развитии межледниковой растительности. М₁ (еловые леса с элементами перигляциальной флоры) и М₇ (еловые леса с примесью широколиственных пород) фиксируют нижний и верхний максимумы ели (*Picea*), две переходные ПЗ М₂ (зона сосны и березы с елью) и М₃ (зона сосны и березы с дубом и вязом) отражают соответственно фазы сосновых и березовых лесов сначала с участием ели, а затем с примесью дуба, вяза и лещины. М₄, М₅ и М₆, характеризующиеся максимальным участием пыльцы широколиственных пород и специфической последовательностью их кульминаций на спорово-пыльцевых диаграммах: «...дуб и вяз, затем лещина, потом липа и, наконец, граб» [Гричук, 1961, с. 48], соответствуют самым оптимальным климато-фитоценотическим фазам межледниковья. Другой важнейший критерий принадлежности отложений к позднеплейстоценовому межледниковью – состав показательных видов дендрофлоры оптимальных фаз: *Carpinus betulus*, *Tilia cordata*, *T. tomentosa*, *T. platyphyllos*, *Quercus robur*, *Q. petraea*, *Q. pubescens*, *Ulmus laevis*, *U. campestris* (*U. foliacea*), *U. scabra* (*U. glabra*), *Corylus avellana*, *Alnus glutinosa*, *A. incana* и др. К числу характерных видов микулинской дендрофлоры, являвшихся эдификаторами доминировавших лесных формаций, относятся также *Picea abies*, *Pinus sylvestris*, *Betula pendula*, *B. pubescens* / *B. alba*. Всего же по пыльце и спорам микулинских межледниковых осадков Центра и Северо-Запада Восточно-Европейской равнины определено свыше 70 видов высших растений [Гричук, 1989].

Для всего региона Финского залива, в юго-восточной части которого находится изучаемый авторами опорный разрез Вока, детальные палинологические и диатомовые анализы выполнены для морских и пресноводных отложений микулинского межледниковья разрезов Мга, Синявино [Знаменская, 1959; Знаменская, Черемисинова, 1962; Соколова и др., 1972], Рыбацкое [Лаврова, 1962], скважин в районах р. Мга, оз. Тохолодское, оз. Пашозеро и др. [Плешивцева и др., 1998; Плешивцева, 2011], Прангли, Рынгу и Пееду [Лийвранд, 1999; Liivrand, 1991], Пески и Пыхья-Ухтью [Miettinen et al., 2002] и ряда других. Важное стратиграфо-корреляционное значение имеют также спорово-пыльцевые записи, полученные для морских и озерных межледниковых отложений этого возраста для ближайших прибалтийских разрезов Латвии и Литвы [Кондратене, 1996; Kalnina, 2001; Satkunas et al., 2003].

Таблица

Корреляция палинозон микулинского (эмского, пранглиского) межледниковья Западной и Центральной Европы, стратотипа Восточно-Европейской равнины и разрезов Эстонии с палинозонами и субпалинозонами опорного разреза Вока

Западная и Центральная Европа [Menke, Tynni, 1984]	Восточно-Европейская равнина		
	Микулино, Нижняя Боярщина [Гричук, 1961, 1989]	Прангли, Рынгү [Liivrand, 1991]	Вока Н.С. Болиховская (в данной работе)
		Ранневейхсельское похолодание: <i>Betula nana</i> , <i>Selaginella selaginoides</i> , <i>Botrychium boreale</i> , <i>Lycopodium alpinum</i> , <i>L. pungens</i> , <i>L. appressum</i>	Ранневалдайское похолодание: <i>Betula nana</i> , <i>Alnaster fruticosus</i> , <i>Selaginella selaginoides</i> , <i>S. sibirica</i> , <i>Botrychium boreale</i> , <i>Lycopodium alpinum</i> , <i>L. pungens</i> , <i>L. appressum</i>
E7 – <i>Pinus</i>	M ₈ – <i>Pinus</i> with <i>Picea</i> и <i>Betula</i>	E8 – <i>Pinus</i> . <i>Betula</i> и <i>Picea</i> постоянно присутствуют	M8 – <i>Pinus sibirica</i> , <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Betula</i> sect. <i>Albae</i>
E6 – <i>Pinus-Picea-Abies</i>	M ₇ – <i>Picea</i> с примесью широколиственных пород	E7 – <i>Picea</i>	V1-05 профиль: M7c – <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Betula</i> sect. <i>Albae</i> , <i>Carpinus</i> , <i>Tilia</i> , <i>Ulmus</i> ; M7b – <i>Picea</i> , <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Betula</i> sect. <i>Albae</i> , <i>Quercus</i> ; M7a – <i>Picea</i> , <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Betula</i> sect. <i>Albae</i> , <i>Carpinus</i> , <i>Tilia</i> , <i>Quercus</i> . V3R профиль: M7b – <i>Picea</i> , <i>Pinus sibirica</i> , <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Betula</i> sect. <i>Albae</i> ; M7a – <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Betula</i> sect. <i>Albae</i> , <i>Carpinus</i> , <i>Quercus</i> , <i>Ulmus</i>
E5 – <i>Carpinus-Picea</i>	M ₆ – <i>Carpinus</i> с участием <i>Tilia</i> , <i>Quercus</i> , <i>Ulmus</i> и <i>Picea</i>	E6 – <i>Carpinus</i> . <i>Corylus</i> и <i>Alnus</i> сокращают участие	V1-05 профиль: M6e – <i>Picea</i> , <i>Pinus</i> s.g. <i>Haploxyylon</i> , <i>Betula</i> sect. <i>Albae</i> , <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Ulmus</i> ; M6d – <i>Carpinus</i> , <i>Quercus</i> , <i>Tilia</i> , <i>Corylus</i> , <i>Alnus</i> , <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Betula</i> sect. <i>Albae</i> ; M6c – <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Betula</i> sect. <i>Albae</i> , <i>Carpinus</i> , <i>Tilia</i> , <i>Quercus</i> , <i>Ulmus</i> ; M6b – <i>Carpinus</i> , <i>Tilia</i> , <i>Quercus</i> , <i>Ulmus</i> , <i>Alnus</i> , <i>Pinus sylvestris</i> ; M6a – <i>Picea</i> , <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Carpinus</i> , <i>Tilia</i> ; V3R профиль: M6e – <i>Pinus</i> s.g. <i>Haploxyylon</i> , <i>Betula</i> sect. <i>Albae</i> , <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Carpinus</i> , <i>Tilia</i> , <i>Quercus</i> , <i>Fraxinus</i> , <i>Ulmus</i> , <i>Populus</i> ; M6d – <i>Carpinus</i> , <i>Tilia</i> , <i>Quercus</i> , <i>Ulmus</i> , <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Betula</i> sect. <i>Albae</i> ; M6c – <i>Betula</i> sect. <i>Albae</i> , <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Carpinus</i> , <i>Quercus</i> , <i>Fraxinus</i> , <i>Ulmus</i> , <i>Populus</i> ; M6b – <i>Carpinus</i> , <i>Tilia</i> , <i>Quercus</i> , <i>Fraxinus</i> , <i>Ulmus</i> , <i>Populus</i> , <i>Corylus</i> ; M6a – <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Carpinus</i> , <i>Quercus</i> , <i>Tilia</i> , <i>Fraxinus</i> , <i>Ulmus</i> , <i>Corylus avellana</i>

Западная и Центральная Европа [Menke, Tunni, 1984]	Восточно-Европейская равнина		
	Микулино, Нижняя Боярщина [Гричук, 1961, 1989]	Прангли, Рынгу [Liivrand, 1991]	Вока Н.С. Болиховская (в данной работе)
E4b – <i>Corylus-Taxus-Tilia</i>	M ₅ – <i>Tilia</i> с большим участием <i>Carpinus</i> , <i>Quercus</i> и <i>Ulmus</i> (вторая половина максимума <i>Corylus</i>)	E5 – <i>Tilia</i> . Максимумы <i>Corylus</i> и <i>Alnus</i>	Спорово-пыльцевых данных нет
E4a – <i>Quercetum mixtum – Corylus</i>	M ₄ – <i>Quercus</i> и <i>Ulmus</i> (первая половина максимума <i>Corylus</i>)	E4 – <i>Quercus</i> и <i>Ulmus</i> . Первые максимумы <i>Corylus</i> и <i>Alnus</i>	
E3 – <i>Pinus-Quercetum mixtum</i>	M ₃ – <i>Pinus</i> и <i>Betula</i> с примесью <i>Quercus</i> , <i>Ulmus</i> и <i>Corylus</i>	E3 – <i>Pinus</i> , <i>Betula</i> , <i>Quercus</i> , <i>Ulmus</i> . Растет содержание <i>Corylus</i> и <i>Alnus</i>	
E2 – <i>Pinus-Betula</i>	M ₂ – <i>Pinus</i> и <i>Betula</i> с небольшим участием <i>Picea</i>	E2 – <i>Pinus</i> и <i>Betula</i> . Исчезает <i>Betula nana</i>	
E1 – <i>Betula</i>	M ₁ – <i>Picea</i> с небольшим участием <i>Betula</i> и <i>Pinus</i>	E1 – <i>Betula</i> и <i>Pinus</i> . <i>Betula nana</i> в незначительном количестве	

Морские межледниковые отложения микулинского возраста, известные под названием мгинских, широко распространены на севере и северо-западе Ленинградской области, а континентальные осадки большей частью приурочены к ее восточным районам. В палинологических записях всех изученных в скважинах разрезов (р. Мга, оз. Тохколадское, оз. Пашозеро и др.) отражена полная последовательность ПЗ (M₁–M₈) микулинского межледниковья с относительно высоким содержанием пыльцы широколиственных пород в самые оптимальные фазы (M₄–M₆) и типичной последовательностью их кульминаций на палинологических диаграммах [Плешивцева и др., 1998; Плешивцева, 2011].

В Эстонии отложения микулинского (пранглиского) возраста по сравнению с другими районами Северо-Запада Восточно-Европейской равнины немногочисленны и менее полны, часто фрагментарны и находятся в переотложенном залегании. Тем не менее их возраст уверенно устанавливается по палинологическим данным в трех разрезах – морских отложений (мощностью 8 м) в Прангли, озерно-болотных осадков (мощность <1 м) в Рынгугу и аллювиальных образований (2 м) разреза Пееду [Лийвранд, 1999; Liivrand, 1991]. В палинологических записях этих разрезов выделяются восемь палинозон (E1–E8) (см. табл.), отвечающих ПЗ M₂–M₈ схемы микулинской палиностратиграфии В.П. Гри-

чука [1961] и восьми фазам трансформации доминировавших лесных сообществ. К сожалению, во всех трех разрезах ПЗ E5, E6 и E7, т. е. второй половины микулинского (пранглиского) времени, выделены по единичным спектрам. Тем не менее на диаграммах отчетливо видно, что максимум пыльцы *Carpinus* (<50% в Прангли и Рынгугу, ~20% в Пееду) приурочен к основанию ПЗ E6, а затем количество пыльцы граба резко сокращается.

По результатам изучения наиболее представительных разрезов установлены региональные палинозоны, соответствующие пыльцевым зонам микулинских отложений Центра и северной половины Восточно-Европейской равнины. Они отражают региональную специфику схем периодизации микулинского межледниковья в каждом районе и являются основой корреляции климато-фитоценологических сукцессий, т. е. изменений растительности и климата, происходивших в различных частях Европейского субконтинента.

Результаты палинологического изучения разреза Вока. Нижняя толща «Б», залегающая под маркерным прослоем разреза, охарактеризована детальными спорово-пыльцевыми записями отложений, изученных по двум дополняющим и дублирующим друг друга профилям V1-05 и V3R (см. рис. 2). Сравнительный анализ палинозон стратотипических микулинских седиментаций Западной

и Центральной Европы, Восточно-Европейской равнины и палинозон двух палинологических записей, полученных по результатам детального спорово-пыльцевого анализа позднеплейстоценовой толщи, залегающей в нижней половине разреза Вока [Molodkov, Bolikhovskaya, 2022], несомненно, свидетельствует, что здесь представлены отложения микулинского межледниковья (см. табл.).

О микулинском межледниковом возрасте свидетельствует также присутствие в составе палинофлоры обеих позднеплейстоценовых седиментационных последовательностей, датированных интервалами ~92–70 тыс. л. н. (в профиле V1-05) и ~94–70 тыс. л. н. (в V3R), показательных видов (*Carpinus betulus*, *Tilia cordata*, *T. tomentosa*, *T. platyphyllos*, *Quercus robur*, *Q. petraea*, *Ulmus laevis*, *U. scabra* (*U. glabra*), *Corylus avellana*, *Alnus glutinosa*, *A. incana* и др.) микулинской флоры Восточно-Европейской равнины. Несомненным доказательством этого вывода является и высокое (свыше 25%) содержание в спорово-пыльцевых спектрах нижней толщи Воки пыльцы широколиственных пород [Molodkov, Bolikhovskaya, 2022]. Эти отложения не могут быть отнесены к ранневалдайским межстадиальным образованиям, так как ранневалдайские перигляциальные осадки в разрезах на территории Эстонии характеризуются спектрами с господством пыльцы *Betula nana*, других тундровых и северо-бореальных видов (*Selaginella selaginoides*, *Botrychium boreale*, *Lycopodium alpinum*, *L. pungens*, *L. appressum* и др.), а также травяно-кустарничковых ксерофитов. Для времени их образования реконструирован растительный покров, в составе которого преобладали кустарниковые ерниковые сообщества из *Betula nana* и полынно-злаковые ассоциации с участием аркто-бореальных и гипоарктических видов [Лийвранд, 1999]. Э. Лийвранд выявлены два слабовыраженных ранневалдайских межстадиальных потепления, которые на спорово-пыльцевых диаграммах разрезов Прангли и Рыngu представлены возрастанием количества пыльцы сосны, березы древовидной, вересковых и сложноцветных (Compositae), без какого-либо (даже единичного) участия пыльцевых зерен широколиственных пород.

Рассмотрим особенности, динамику и хронологические границы реконструированных для юго-восточного побережья Финского залива климато-фитоценологических сукцессий (МИС 5 – МИС 3), имеющих большое значение для решения вопросов климатостратиграфии и корреляции палеоклиматических событий позднего плейстоцена не только северо-запада Восточно-Европейской равнины, но и других районов Европейского субконтинента.

Формировавшаяся в довольно обширном водоеме 7-метровая толща песчаных осадков с гли-

нистыми прослоями, подстилающая маркерный прослой в восточном крыле обнажения и изученная в профиле V1-05, накапливалась в период от ~92 до 58 тыс. л. н., что указывает как минимум на два редких обстоятельства, а именно на существование здесь непрерывной осадочной летописи, охватывающей наиболее противоречивый этап развития природной среды во второй половине МИС 5, и, как представляется, на уникальную запись динамики осадконакопления в период развития, как полагают, мощного калининского ледникового покрова (МИС 4), граница которого, согласно классической схеме границ плейстоценовых ледяных щитов Восточно-Европейской равнины [Заррина, 1991], располагалась к югу от Финского залива на расстоянии примерно 800 км.

Временная шкала и детальные палинологические данные, представленные спорово-пыльцевой диаграммой 34 спектров (рис. 4), однозначно иллюстрируют климато-фитоценологические сукцессии и хронологию палеоклиматических событий второй половины микулинского межледниковья и ранневалдайского времени.

Согласно всей совокупности полученных палинологических данных, отложения из профиля V1-05, датированные интервалом от ~ 92 до 70 тыс. л. н. формировались в межледниковом климате. Состав спорово-пыльцевых спектров свидетельствует, что отложения этого интервала соответствуют стандартным палинозонам М6, М7 и М8 [Гричук, 1961, 1982, 1989], т. е. накапливались во вторую половину последнего межледниковья. О межледниковых климатических условиях и микулинском возрасте формирования этих отложений свидетельствуют последовательность лесных сукцессий, максимумы пыльцы широколиственных пород (*Carpinetum mixtum* – 28 и 29%, *Corylus avellana* – до 20%) и большая роль в автохтонном комплексе характерных таксонов микулинской флоры (*Picea abies* / *P. excelsa*, *Pinus* subgen. *Haploxyton*, *P. cf. cembra*, *P. sylvestris*, *Betula pendula*, *B. pubescens*, *Carpinus betulus*, *Tilia cordata*, *T. tomentosa*, *T. platyphyllos*, *Quercus robur*, *Q. petraea*, *Ulmus laevis*, *U. scabra* / *U. glabra*, *Fraxinus* sp., *Acer* sp., *Corylus avellana*, *Alnus glutinosa*, *A. incana*, *Osmunda cinnamomea* / *Osmundastrum cinnamomeum*).

Наиболее теплomu климату (интервал от ~92 до 81,8 тыс. л. н.) отвечает палинозона М6 (*Carpinus-Tilia-Quercus-Fraxinus-Ulmus-Corylus-Pinus sylvestris-Pinus Haploxyton* type), подразделяющаяся на пять субпалинозон (СПЗ М6а – М6е), отражающих последовательные смены в развитии господствовавших хвойно-широколиственных и широколиственных лесных формаций. Реконструированы следующие фазы развития

растительности в этом интервале: М6а – хвойно-широколиственные (сосново-грабово-еловые, сосново-грабовые, сосново-дубово-грабовые) леса; М6b – смешанные леса, состоявшие из грабовых лесов с примесью дуба, липы, ясеня, вяза и хвойных (елово-кедрово-сосновых, елово-кедровых) древостоев; М6с – елово-кедрово-сосновые леса с примесью граба; М6d – дубово-грабовые леса с липой, ясенем и участки березово-сосновых сообществ; М6е – березово-сосновые леса с примесью широколиственных пород. В рассматриваемом интервале субпалинозоной М6с, отражающей значительное сокращение (до 6%) доли пыльцы широколиственных деревьев, по-видимому, фиксируется эндотермальное (внутримежледниковое) похолодание.

Отложения, накапливавшиеся в интервале ~81,8–70,4 тыс. л. н., охарактеризованы палинозонами М7 и М8. ПЗ М7 отражает фазу господства преимущественно кедрово-еловых лесов и сосново-еловых лесов с разной долей участия мелколиственных и широколиственных пород. Она подразделяется на три подфазы – М7а (смешанные кедрово-еловые и сосново-березовые леса с участием граба, липы, дуба, ольхи и лещины в подлеске), М7b (кедрово-еловые и сосново-березовые леса с почти полным исчезновением широколиственных деревьев, отвечающие эндотермалу) и М7с (березово-елово-сосновые леса с незначительной примесью граба, липы, вяза, ольхи и участием в подлеске лещины). Спорно-пыльцевые спектры ПЗ М8 иллюстрируют растительный покров заключительной фазы межледниковья, когда в рассматриваемом районе господствовали березово-сосново-кедровые леса, редколесья с кедром сибирским (*Pinus sibirica*) в качестве доминанта и лугово-болотные сообщества на открытых участках.

Последующий интервал от ~70 до 58 тыс. л. н. характеризуется значительно более суровыми условиями и соответствует времени ранневалдайского криохрона, для которого предполагалось, что исследуемая область была скрыта под мощным ледяным покровом калининского оледенения. Однако, как следует из спорно-пыльцевых спектров исследуемого разреза, развитие фитоценозов продолжалось, хотя и в гораздо более суровых условиях, чем в предыдущий период (МИС 5 d–a). Как свидетельствуют четыре палинозоны (V1–V4) постмикулинских осадков, отражающие эволюцию фитоценозов под влиянием климатических условий холодного периода МИС 4, на протяжении этого интервала в составе растительного покрова изучаемого района доминировали перигляциальные тундровые и лесотундровые фи-

тоценозы с преобладающей ролью ерниковых формаций (*Betula nana*, *Alnaster fruticosus*), лугово-болотных сообществ и участков редколесий из сосны обыкновенной, сибирского кедра и ели. Состав характерных таксонов палинофлоры ранневалдайского холодного этапа включает типичных представителей перигляциальной растительности – *Betula* sect. *Nanae*, *Betula nana*, *B. sect. Fruticosae*, *Betula fruticosa*, *Alnaster fruticosus* / *Duschekia fruticosa*, *Pinus sibirica*, *P. sylvestris*, *Larix* cf. *sibirica*, *Juniperus* sp., *Betula pendula*, *B. pubescens*, *B. cf. tortuosa*, *Ephedra distachya*, *E. monosperma*, *Artemisia* subgenera *Seriphidium*, *A.* subgenera *Dracunculus*, *Botrychium boreale*, *Lycopodium alpinum*, *L. dubium* / *L. pungens*, *Selaginella selaginoides*, *S. sibirica* и др.

Для дополнительного изучения видового состава межледниковой палинофлоры, контроля и корректирования полученных климато-хроностратиграфических реконструкций были проведены исследования отложений, вскрытых расчисткой V3R, расположенной в 120 м к западу от профиля V1-05 на абсолютных высотах 0,8–3,6 м. Они представлены пачкой однородных глинистых осадков мощностью 2 м и перекрывающим их 0,8-метровым горизонтом переслаивающихся суглинков и песков (см. рис. 2). Результаты детального палинологического анализа 35 образцов этих отложений, формировавшихся в более глубокой части палеоводоёма на протяжении интервала от ~94 до 70 тыс. л. н., подтвердили их межледниковый ранг, а также региональные особенности реконструированных климато-фитоценологических сукцессий и хронологию выделенных фаз и подфаз в развитии растительности и климата интервала от МИС 5с до границы МИС 5 / МИС 4 включительно (рис. 5).

Последовательности спорно-пыльцевых спектров отложений, формировавшихся в течение периода от ~94 до ~70 тыс. л. н., здесь также отвечают стандартным палинозонам М₆, М₇ и М₈ микулинского межледниковья и характеризуют особенности развития растительности и климата изучаемого района во вторую половину МИС 5. Состав межледниковой палинофлоры из отложений профиля V3R, в автохтонном комплексе которой присутствуют характерные таксоны микулинской дендрофлоры (*Carpinus betulus*, *Tilia cordata*, *T. tomentosa*, *T. cf. dasystyla*, *Quercus robur*, *Q. petraea*, *Ulmus laevis*, *U. glabra*, *Corylus avellana*, *Alnus glutinosa*, *A. incana* и др.), несомненно, подтверждает возраст и межледниковые климатические условия накопления этих осадков. Сумма пыльцы широколиственных деревьев в максимумы составляет 31 и 26%.

Периоду ~94,1–81,3 тыс. л. н. соответствует ПЗ М6 (Carpinus-Tilia-Quercus-Ulmus-Corylus-Pinus Narproxylon type). Эта палинозона подразделяется на СПЗ М6а-М6е, отражающие некоторую изменчивость межледникового климата в указанный период времени и последовательные смены в развитии господствовавших лесных формаций: М6а – широколиственно-хвойные леса с господством сосны и граба; М6б – грабовые леса с примесью липы, дуба, ясеня, вяза и хвойных деревьев; М6с – широколиственно-хвойные леса с преобладанием сосны, граба и заметным участием березы; М6д – грабовые леса с примесью дуба, липы и вяза и хвойных деревьев; М6е – широколиственно-хвойные леса с господством кедровидной сосны, ели, граба и возросшей ролью сосны обыкновенной и березы. В рассматриваемом интервале также, как и в профиле V1-05, в СПЗ М6с зафиксировано эндотермальное (внутримежледниковое) похолодание, отраженное на графике суммы пыльцы широколиственных пород снижением содержания ее содержания до 8,5%.

Отложения, датированные интервалом 81,3–71,6 тыс. л. н. с перерывом в 7 тыс. лет внутри него, отвечают палинозоне М7. Она характеризует две фазы в развитии растительности: сначала (М7а) преобладания сосново-елово-широколиственных лесов (с грабом и единичным участием дуба и вяза), а затем (М7б) – кедрово-еловых формаций с сосной и березой. Интервал 71,6–70 тыс. л. н. представляет ПЗ М8 (*Pinus sibirica*-*Pinus sylestris*-*Betula sect. Albae*), спектры которой свидетельствуют о составе растительного покрова заключительного этапа межледниковья, когда в рассматриваемом районе господствовали березово-сосново-кедровые леса и редколесья с *Pinus sibirica* в качестве доминанта, а также лугово-болотные ценозы. В финале межледниковья болотные биотопы стали осваивать ерниковые и ольховниковые (*Betula nana*, *Alnaster fruticosus*) сообщества. ПЗ М8 отражает постепенный переход от теплого климата к более прохладному, типичный для заключительной фазы МИС 5 с последующим переходом МИС 5 / МИС 4.

Как видим, палинологические записи, полученные при изучении позднеплейстоценовой толщи в профилях V1-05 and V3R, не противоречат спорово-пыльцевым данным микулинских межледниковых отложений Северо-Западного сектора и Центра Восточно-Европейской равнины, т. е. однозначно свидетельствуют о межледниковых климатических условиях времени накопления отложений, залегающих в нижней половине позднеплейстоценового разреза Вока.

О межледниковых климатических условиях накопления позднеплейстоценовой толщи, вскры-

той в профилях V1-05 and V3R, наглядно свидетельствуют также палинологические данные, полученные нами для средневалдайских отложений разреза Вока, залегающих над маркерным слоем (профиль V3-05 на рис. 2). На основании репрезентативных спорово-пыльцевых спектров 45 образцов и данных ИК-ОСЛ-датирования этих осадков (рис. 6) установлено, что изученные средневалдайские отложения формировались в период от 39 до 33 тыс. л. н. в природных обстановках двух межстадиалов и двух стадиалов [Bolikhovskaya, Molodkov, 2007].

На полученной палинологической записи выделены четыре серии субпалинозон, согласно которым подробно реконструированы изменения растительности и климата, происходившие на протяжении каждого из климатохронов [Болиховская, Молодков, 2009]. Здесь лишь отметим, что два стадийных интервала характеризовались суровым климатом с господством тундро-степи и тундро-лесостепи (в диапазоне 37,6–36,8 тыс. л. н.; СПЗ 2а–2с) и перигляциальной лесотундры (35,3–32,6 тыс. л. н.; СПЗ 4а–4g). Интерстадиалы отличались заметным смягчением климатических условий. Во время потепления, датированного 38,6–37,6 тыс. л. н. (СПЗ 1а–1е), господствовали перигляциальные лесотундры с участками елово-сосновых (с участием *Larix* и *Pinus sibirica*) редколесий. В следующий теплый интервал (36,8–35,3 тыс. л. н.; СПЗ 3а–3f) доминирование перигляциальной лесотундры с участками елово-сосновых редколесий дважды сменялось фазами более влажного и более теплого климата и широкого распространения северо-таежных лесных сообществ. Как видим, в осадках даже самых теплых межстадиалов пыльца широколиственных деревьев отсутствует. В составе растительного покрова преобладали бореальные и аркто-бореальные таксоны, климатические условия были намного холоднее современных.

Завершая обзор полученных палинологических данных, отметим, что отложения, изученные в разрезе Вока, образовались в неглубоком бассейне, о чем свидетельствуют присутствующие в изученных мацератах зеленые водоросли *Botryococcus* и *Pediastrum*, а также высокое содержание пыльцы водных растений (*Myriophyllum*, *Potamogeton*, *Lemna*, *Nymphaea alba*, *Nymphaea* sp., *Stratiotes aloides*, *Halloragidaceae*, *Butomus* и др., населяющих лиманы, озера, болота) и представителей прибрежных сообществ (*Alisma* sp., *Alisma plantago-aquatica*, *Typha*, *Sparganium* и др.). Палинологические показатели солоновато-водной среды встречаются редко (некоторые цисты динофлагеллят).

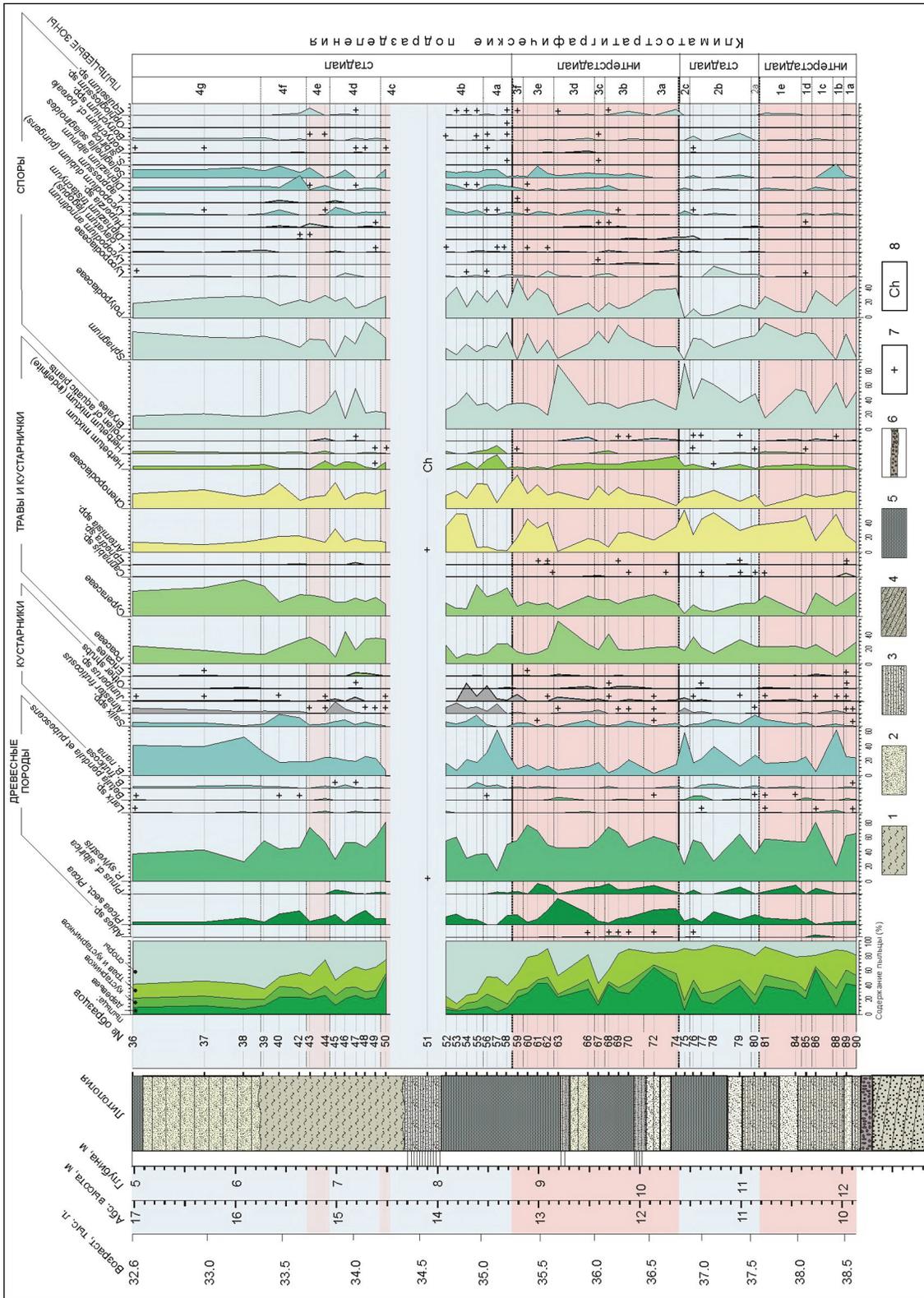


Рис. 6. Спорно-пыльцевая диаграмма и хронологическая шкала средневалдайских отложений, вскрытых в профиле V3-05 разреза Вока:

1 – суслинки; 2 – пески; 3 – горизонтально-слоистые пески; 4 – косослоистые пески; 5 – глинистые отложения;

6 – гравийный слой; 7 – содержание пыли менее 1%; 8 – Chamaemorus

Fig. 6. Spore-pollen diagram and chronological scale of the MIS 3 deposits from the V3-05 section of the Voka outcrop: 1 – loams; 2 – sands; 3 – horizontally layered sands; 4 – cross-stratified sands; 5 – clay deposits; 6 – gravel layer; 7 – pollen content less than 1%; 8 – Chamaemorus

ВЫВОДЫ

Таким образом, на основании результатов ИК-ОСЛ датирования и палинологического изучения отложенных опорного разреза Вока нами установлены хронологические границы палинозон и соответствующих им фаз в развитии климата и растительности исследуемого района на юго-западном побережье Финского залива, реконструированы флористические и фитоценотические особенности изученных палеоклиматических этапов позднего плейстоцена, определена их хронология и продолжительность. Полученные результаты однозначно свидетельствуют, что вторая половина МИС 5 в интервале ~100–70 тыс. л. н. отвечает второй половине микулинского межледникового.

Реконструированные климато-фитоценотические сукцессии примерно 70-тысячелетнего интервала позднего неоплейстоцена отражают динамику изменений растительности и климата второй половины последнего (микулинского) межледникового в диапазоне от ~94 до 70 тыс. л. н. (т. е. от МИС 5с до перехода МИС 5 / МИС 4), ранневалдайского криохрона в диапазоне от 70 до 58 тыс. л. н. (МИС 4) и на протяжении отрезка от 39 до 33 тыс. л. н. средневалдайского мегаинтерстадиала (МИС 3), предшествовавшего эпохе последнего (МИС 2) на исследуемой территории крупного похолодания.

Не подтверждено наступление суровых климатических условий вследствие, как полагают, интенсивного развития Баренцево-Карского ледникового покрова в Северной Евразии [Svendsen et al., 2004] во второй половине МИС 5. Напротив, полученные палинологические записи однозначно указывают, что отложения в разрезе Вока, датированные ин-

тервалом от ~94 до 70 тыс. л. н. (т. е. второй половиной МИС 5), которые, вероятно, должны были находиться в зоне перигляциальных процессов, на самом деле формировались в теплых климатических условиях, полностью соответствующих потеплению межледникового ранга.

Результаты палинологических и хронологических исследований разреза Вока показали, что толща отложений, накапливавшаяся в интервале от 70 до 58 тыс. л. н. (МИС 4), не содержит ни гляциогенных отложений, которые могли бы служить доказательством прохождения ледника через Финский залив в последующий за МИС 5 период времени, ни прерывания осадконакопления. Развитие растительного покрова на исследуемой территории в этот период также не прекращалось и было этапом господства в суровых климатических условиях перигляциальной растительности.

Палино-климато-хроностратиграфические записи, полученные по разрезу Вока, имеют большое значение для решения вопросов климатостратиграфии и корреляции палеоклиматических событий позднего плейстоцена как Северо-Запада, так и других районов Восточно-Европейской равнины – для корреляции с межледниковой / ледниковой ритмикой, реконструированной в районах ледниково-перигляциальной и внеледниковой зон, и, в частности, датированных ОСЛ методом осадков карангатской трансгрессии Азово-Черноморского бассейна [Курбанов и др., 2019] и датированных разными методами абсолютной хронологии седиментаций позднеплейстоценовых трансгрессивных и регрессивных стадий и подстадий Понто-Каспия.

Благодарности. Данная статья была подготовлена Н.С. Болиховской в рамках исследовательских федеральных тем географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова «Палеогеографические реконструкции природных геосистем и прогнозирование их изменений» (121051100135-0) и «Эволюция природной среды в кайнозое, динамика рельефа, геоморфологические опасности и риски природопользования» (121040100323-5), а А.Н. Молодковым – по грантам Эстонского научного фонда № 5440, 6112 и 8425.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Болиховская Н.С. Палинологический метод // Методы палеогеографических реконструкций: метод. пособие. М.: Географический факультет МГУ, 2010. С. 60–103.
- Болиховская Н.С. Пространственно-временные закономерности развития растительности и климата Северной Евразии в неоплейстоцене // Археология, этнография и антропология Евразии. 2007. Т. 4. № 32. С. 2–28.
- Болиховская Н.С. Эволюция лессово-почвенной формации Северной Евразии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 270 с.
- Болиховская Н.С., Молодков А.Н. Эволюция растительности и климата на юго-восточном побережье Финского залива в интервале 39–33 тыс. л. н. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2009. № 6. С. 46–53.
- Гричук В.П. История флоры и растительности Русской равнины в плейстоцене. М.: Наука, 1989. 183 с.
- Гричук В.П. Растительность Европы в позднем плейстоцене (карты 9, 10, 11) // Палеогеография Европы в последние сто тысяч лет. М.: Наука, 1982. С. 92–109.
- Гричук В.П. Гляциальные флоры Русской равнины // Значение палинологического анализа для стратиграфии и палеофлористики. М.: Наука, 1966. С. 189–196.
- Гричук В.П. Ископаемые флоры как палеонтологическая основа стратиграфии четвертичных отложений // Рельеф и стратиграфия четвертичных отложений северо-запада Русской равнины. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 25–71.

- Гричук В.П., Губонина З.П., Зеликсон Э.М., Моносзон М.Х. Межледниковые отложения района г. Ростова (Ярославского) // Палинология плейстоцена и плиоцена. М.: Наука, 1973. С. 188–203.
- Гричук В.П., Заклинская Е.Д. Анализ ископаемых пыльцы и спор и его применение в палеогеографии. М.: Географгиз, 1948. 224 с.
- Девятова Э.И. Палинологическая характеристика верхнечетвертичных отложений Карелии // Четвертичная геология и геоморфология восточной части Балтийского щита. Л., 1972. С. 59–96.
- Заррина Е.П. Четвертичные отложения северо-западных и центральных районов европейской части СССР. Л.: Недра, 1991. 187 с.
- Знаменская О.М. Стратиграфическое положение мгинских морских отложений // Доклады АН СССР. 1959. Е.129. № 2. С. 401–404.
- Знаменская О.М., Черемисинова Е.А. Распространение мгинского межледникового моря и основные черты его палеогеографии // Вопросы стратиграфии четвертичных отложений северо-запада европейской части СССР. Л.: Гостоптехиздат, 1962. С. 140–160.
- Кондратене О.П. Стратиграфия и палеогеография квартера Литвы по палеоботаническим данным // Вильнюс: АСАДЕМИА, 1996. 212 с.
- Кузнецов В.Ю., Арсланов Х.А., Козлов В.Б. и др. Абсолютный возраст погребенного торфа из стратотипического разрез Микулино и парастратотипического разреза Нижняя Боярщина по данным уран-ториевого датирования // Материалы III Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода. Том 1. Смоленск: Ойкумена, 2002. С. 135–136.
- Курбанов Р.Н., Янина Т.А., Мюррей Э.С. и др. Возраст карангатской трансгрессии (поздний плейстоцен) Черного моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2019. № 6. С. 29–38.
- Лаврова М.А. Основной разрез верхнего плейстоцена Ленинградского района // Вопросы стратиграфии четвертичных отложений северо-запада европейской части СССР. Л.: Гостоптехиздат, 1962. С. 125–139.
- Лийвранд Э.Д. Палинологические исследования ранне- и средневалдайских перигляциальных отложений Эстонии // Актуальные проблемы палинологии на рубеже третьего тысячелетия: тезисы докладов IX Всероссийской палинологической конференции. М.: ИГИР-ГИ, 1999. С. 162–163.
- Максимов Ф.Е., Кузнецов В.Ю., Савельева Л.А. и др. К вопросу о временных границах микулинского межледниковья и его отдельных фаз // Пути эволюционной географии. Вып. 2: материалы II Всероссийской научной конференции, посвященной памяти проф. А.А. Величко. М.: Институт географии РАН, 2021. С. 812–816.
- Махнач Н.А. Этапы развития растительности Белоруссии в антропогене. Минск: Наука и техника, 1971. 210 с.
- Новенко Е.Ю. Изменения растительности и климата Центральной и Восточной Европы в позднем плейстоцене и голоцене в межледниковые и переходные этапы климатических макроциклов. М.: ГЕОС, 2016. 228 с.
- Плешивецова Э.С. Палиностратиграфия плейстоцена Северо-Запада Русской равнины в пределах Ленинградской, Псковской, Новгородской и Вологодской областей // Сб. ст. сотрудников ФГУП «Петербургская комплексная геологическая экспедиция», посвященный 60-летию организации. СПб.: Роснедра, 2011. С. 92–100.
- Плешивецова Э.С., Гаркуша В.И., Горшкова С.С. Микулинские озера в междуречье Паши и Ояти (Ленинградская область) // История плейстоценовых озер Восточно-Европейской равнины. СПб.: Наука, 1998. С. 111–114.
- Соколова Л.Ф., Малясова Е.С., Вишневская Е.М., Лаврова М.А. Новая находка межледниковых отложений в центральной части Карельского перешейка // Вестник Ленингр. ун-та. 1972. № 2. С. 124–131.
- Baltrūnas V., Šeiriene V., Molodkov A. et al. Depositional environment and climate changes during the late Pleistocene as recorded by the Netiesos section in southern Lithuania, *Quaternary International*, 2013, vol. 292, p. 136–149.
- Bolikhovskaya N.S., Molodkov A.N. Pollen and IR-OSL evidences for palaeoenvironmental changes between ca 39 kyr to ca 33 kyr BP recorded in the Voka key section, NE Estonia, *Geological Survey of Finland, Special Paper*, 2007, vol. 46, p. 103–112.
- Bolikhovskaya N.S., Molodkov A.N. East-European loess-palaeosol sequences: Palynology, stratigraphy and correlation, *Quaternary International*, 2006, vol. 149, p. 24–36.
- Borisova O.K., Novenko E.Yu., Velichko A.A. et al. Vegetation and climate changes during the Eemian and Early Weichselian in the Upper Volga Region (Russia), *Quaternary Science Reviews*, 2007, vol. 26, iss. 19–21, p. 2574–2585.
- Gaigalas A., Molodkov A. ESR Ages of Three Lithuanian Mid-Late Pleistocene Interglacials: Methodical and Stratigraphical Approach, *Geochronometria*, 2002, vol. 21, p. 57–64.
- Gerasimenko N. Upper Pleistocene loess-palaeosol and vegetational successions in the Middle Dnieper Area, Ukraine, *Quaternary International*, 2006, vol. 149, p. 55–66.
- Gerasimenko N. Late Pleistocene vegetation and soil evolution at the Kiev loess plain as recorded in the Stari Bezradychy section, Ukraine, *Stud. Quatern.*, 2001, vol. 17, p. 19–28.
- Kalnina L. Middle and Late Pleistocene environmental changes recorded in the Latvian part of the Baltic Sea basin, *Quaternaria*, Ser. A, Theses and Research Papers, no. 9, Stockholm, 2001, 173 p.
- Liivrand E. *Biostratigraphy of the Pleistocene deposits in Estonia and correlations in the Baltic region*, Doctoral Thesis, Stockholm, Stockholm University, Department of Quaternary Research, 1991, 114 p.
- Mangerud J. Correlation of the Eemian and the Weichselian with deep sea oxygen isotope stratigraphy, *Quaternary International*, 1989, vol. 3(4), p. 1–4.
- Menke B., Tynni R. Das Eeminterglazial und das Weichselfruhglazial von Rederstall, Ditthmarschen und ihre Bedeutung für die mitteleuropäische Jungpleistozan-Gliederung, *Geologisches Jahrbuch*, 1984, vol. 76, p. 3–120.
- Miettinen A., Rinne K., Haila H. et al. The marine Eemian of the Baltic: new pollen and diatom data from Peski, Russia, and Põhja-Uhtyu, Estonia, *Journal of Quaternary Science*, 2002, vol. 17(5–6), p. 445–458.
- Müdel A. Stop 14. Voka outcrop, *Excursion Guide and Abstracts of the International Symposium on Human Impact and Geological Heritage*, 2003, Tallinn, May 12–17, p. 33–35.
- Molodkov A. IR-OSL dating of uranium-rich deposits from the new late Pleistocene section at the Voka site, North-Eastern Estonia, *Quaternary Geochronology*, 2007, no. 2, p. 208–215.

- Molodkov A.N., Bolikhovskaya N.S. Palaeoenvironmental changes and their chronology during the latter half of MIS 5 on the south-eastern coast of the Gulf of Finland, *Quaternary International*, 2022, vol. 616, p. 40–54, DOI: 10.1016/j.quaint.2021.10.016.
- Molodkov A.N., Bolikhovskaya N.S. Climate change dynamics in Northern Eurasia over the last 200 ka: evidence from mollusc-based ESR-chronostratigraphy and vegetation successions of the loess-palaeosol records, *Quaternary International*, 2009, vol. 201, p. 67–76.
- Raukas A., Stankowski W. Influence of sedimentological composition on OSL dating of glaciofluvial deposits: examples from Estonia, *Geological Quarterly*, 2005, vol. 49, p. 463–470.
- Sanko A.F. The first U-Th dating of the Muravian Interglacial deposits in Belarus, *Abstracts of the 8th International Conference “Methods of Absolute Chronology”*, 17–19 May 2004, Ustroń, Poland, Gliwice, 2004, p. 132–133.
- Satkunas J., Grigiene A., Velichkevich F. et al. Upper Pleistocene stratigraphy at the Medininkai site, eastern Lithuania: a continuous record of the Eemian – Weichselian sequence, *Boreas*, 2003, vol. 32, p. 627–641.
- Shackleton N.J. The last interglacial in the marine and terrestrial records, *Proceedings of the Royal Society*, London, 1969, Series B, 174, p. 135–154.
- Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V.I. et al. The Late Quaternary ice sheet history of Northern Eurasia, *Quaternary Science Reviews*, 2004, vol. 23, p. 1229–1271.
- Zelikson E.M. Climate and environment changes of East Europe during interstadials and interglacials of the Middle and Late Pleistocene, *Climate and environment changes of East Europe during Holocene and Late – Middle Pleistocene*, Research materials for IGU Conference “Global Changes and Geography”, Moscow, Institute of Geography RAS, 1995, p. 80–92.

Поступила в редакцию 16.11.2023

После доработки 15.01.2024

Принята к публикации 14.02.2024

CLIMATIC AND PHYTOCENOTIC EVENTS OF THE LATE PLEISTOCENE (MIS 5–MIS 3) AT THE SOUTHEASTERN COAST OF THE GULF OF FINLAND

N.S. Bolikhovskaya¹, A.N. Molodkov²

¹ *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Research Laboratory of Recent Deposits and Paleogeography of the Pleistocene, Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; Department of Geomorphology and Paleogeography, Professor; e-mail: natbolikh@mail.ru*

² *Tallinn University of Technology, Department of Geology, Research Laboratory for Quaternary Geochronology, Head of the Laboratory, D.Sc. in Geology; e-mail: anatoli.molodkov@ttu.ee*

The paper analyses a debatable issue concerning the ranking of climatic-stratigraphic units within two marine isotope stages (MIS) – MIS 5 and MIS 4. Palynological records from the Mikulino interglacial sections of the northwestern Russian Plain which are most critical for correlations are reviewed. A representative series of numerical dates obtained by the IR-OSL method, and detailed palynological records enabled a detailed climatic-chronostratigraphic division of the Late Pleistocene sequence of the Voka reference section on the southeastern coast of the Gulf of Finland. The representative palynological spectra provide strong evidence of a warm interval of interglacial rank in the latter half of MIS 5, corresponding to the standard M₆, M₇, and M₈ Mikulino palynozones. Additionally, they highlight a period of significant cooling during MIS 4, characterized by the dominance of periglacial vegetation formations in the study area. This challenges the viewpoint of the extensive Kalinin glaciation during that time, believed to have spread many hundreds of kilometers south of the Gulf of Finland. Data for MIS 3 reveal a two-fold alternation of interstadial and stadial (periglacial) climate intervals during the period between 39 ka and 33 ka.

For the first time, detailed reconstructions and datings of climate-phytocenotic successions of paleoclimatic events approximately between 100 ka and 30 ka have been provided for the territory of the East European Plain (and Northern Eurasia as a whole). These events correspond to the latter half of MIS 5, MIS 4, and an interval between 39 ka and 33 ka during MIS 3.

Keywords: Late Pleistocene, palynology, IR-OSL chronology, climatic stratigraphy, vegetation, interregional correlation

Acknowledgements. The paper was prepared under the research themes of the MSU Faculty of Geography “Paleogeographical reconstructions of natural geosystems and forecast of their future changes” (121051100135-0) and “Cenozoic evolution of the environment, dynamics of the relief, geomorphologic hazards and risks of land-use” (121040100323-5) (N.S. Bolikhovskaya), and within the framework of grants no. 5440, 6112 и 8425 from the Estonian Science Foundation (A.N. Molodkov).

REFERENCES

- Baltrūnas V., Šeirienė V., Molodkov A., Zinkutė R. et al. Depositional environment and climate changes during the late Pleistocene as recorded by the Netiesos section in southern Lithuania, *Quaternary International*, 2013, vol. 292, p. 136–149.
- Bolikhovskaya N.S. [Palynological method], *Metody paleogeograficheskikh rekonstrukcij: Metodicheskoye posobiye* [Methods of paleogeographical reconstruction. Methodical manual], Moscow, Geograficheskij fakul'tet MGU, 2010, p. 60–103. (In Russian)
- Bolikhovskaya N.S. *Evolutsiya lessovo-pochvennoj formatsii Severnoj Evrazii* [The Evolution of Loess-Paleosol Formation of Northern Eurasia], Moscow, MSU Publ., 1995, 270 p. (In Russian)
- Bolikhovskaya N.S. Prostranstvenno-vremennyye zakonomernosti razvitiya rastitel'nosti i klimata Severnoj Evrazii v neopleistocene [Spatial and temporal regularities in the evolution of vegetation and climate of North Eurasia in the Neopleistocene] *Archaeology, Ethnology & Anthropology of Eurasia*, 2007, vol. 4, no. 32, p. 2–28. (In Russian and English)
- Bolikhovskaya N.S., Molodkov A.N. East-European loess-palaeosol sequences: Palynology, stratigraphy and correlation, *Quaternary International*, 2006, vol. 149, p. 24–36.
- Bolikhovskaya N.S., Molodkov A.N. Evolyutsiya rastitel'nosti i klimata na yugo – vostochnom poberezh'ye Finskogo zaliva v intervale 39–33 tys. let nazad [Evolution of vegetation and climate at the southeastern coast of the Gulf of Finland in the interval of 39–33 kyr], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2009, no. 6, p. 47–54. (In Russian)
- Bolikhovskaya N.S., Molodkov A.N. Pollen and IR-OSL evidences for palaeoenvironmental changes between ca 39 kyr to ca 33 kyr BP recorded in the Voka key section, NE Estonia, *Geological Survey of Finland, Special Paper*, 2007, vol. 46, p. 103–112.
- Borisova O.K., Novenko E.Yu., Velichko A.A., Boettger T., Junge F.W. Vegetation and climate changes during the Eemian and Early Weichselian in the Upper Volga Region (Russia), *Quaternary Science Reviews*, 2007, vol. 26, iss. 19–21, p. 2574–2585.
- Devyatova E.I. [Palynological description of the Upper Quaternary deposits in Karelia], *Chetvertichnaya geologiya i geomorfologiya vostochnoj chasti Baltijskogo schita* [Quaternary geology and geomorphology of the eastern part of the Baltic shield], Leningrad, 1972, p. 59–96. (In Russian)
- Gaigalas A., Molodkov A. ESR Ages of Three Lithuanian Mid-Late Pleistocene Interglacials, Methodical and Stratigraphical Approach, *Geochronometria*, 2002, vol. 21, p. 57–64.
- Gerasimenko N. Upper Pleistocene loess-palaeosol and vegetational successions in the Middle Dnieper Area, Ukraine, *Quaternary International*, 2006, vol. 149, p. 55–66.
- Gerasimenko N. Late Pleistocene vegetation and soil evolution at the Kiev loess plain as recorded in the Stari Bezradychy section, Ukraine, *Studia Quaternaria*, 2001, vol. 17, p. 19–28.
- Grichuk V.P. [Fossil floras as a paleontological basis for the stratigraphy of Quaternary deposits], *Rel'yef i stratigrafiya chetvertichnykh otlozhenij severo-zapada Russkoj ravniny* [Relief and stratigraphy of Quaternary deposits of the north-western Russian Plain], Moscow, AN SSSR Publ., 1961, p. 25–71. (In Russian)
- Grichuk V.P. [Glacial floras of the Russian Plain], *Znachenije palinologicheskogo analiza dl'a stratigrafii i paleofloristiki* [The importance of palinological analysis in stratigraphy and paleoflorology], Moscow, Nauka Publ., 1966, p. 189–196. (In Russian)
- Grichuk V.P. [Vegetation of Europe during the Late Pleistocene], *Paleogeografiya Evropy v posledniye sto tys'ach let* [Paleogeography of Europe during the recent 100 thousand years], I.P. Gerasimov, A.A. Velichko (eds.), Moscow, Nauka Publ., 1982, p. 92–109. (In Russian)
- Grichuk V.P. *Istoriya flory i rastitel'nosti Russkoj ravniny v plejstocene* [History of Flora and Vegetation of the Russian Plain During the Pleistocene], Moscow, Nauka Publ., 1989, 183 p. (In Russian)
- Grichuk V.P., Zaklinskaya E.D. *Analiz iskopayemykh pyl'tsy i spor i yego primeneniye v paleogeografii* [The analysis of fossil pollen and spores and its application in paleogeography], Moscow, Geographgiz Publ., 1948, 224 p. (In Russian)
- Grichuk V.P., Gubonina Z.P., Zelikson E.M., Monoszon M.Kh. [Interglacial deposits in the Rostov-Yaroslavl district], *Palinologiya plejstotsena i pliocena* [Palinology of the Pleistocene and the Pliocene], Moscow, Nauka Publ., 1973, p. 188–203. (In Russian)
- Kalnina L. Middle and Late Pleistocene environmental changes recorded in the Latvian part of the Baltic Sea basin, *Quaternaria, Ser. A, Theses and Research Papers*, Stockholm, 2001, no. 9, 173 p.
- Kondratienė O.P. *Stratigrafija i paleogeografija kvartera Litvy po paleobotaničeskim dannym* [The Quaternary Stratigraphy and Palaeogeography of Lithuania Based on Palaeobotanic Studies], Vil'n'us, Akademiya Publ., 1996, 212 p. (In Russian)
- Kurbanov R.N., Yanina T.A., Murray E.S. et al. Vozrast karangatskoj transgressii (pozdnij plejstotsen) Chernogo mor'a [Age of the Karangat transgression (Late Pleistocene) of the Black Sea], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2019, no. 6, p. 29–38. (In Russian)
- Kuznetsov V.Yu., Arslanov Kh.A., Kozlov V.B., Maksimov F.E., Savelyeva L.A., Chernov S.B., Baranova N.G. [Absolute age of buried peat from the Mikulino stratotypic section and the lower Boyar Region parastratotypic section according to uranium-thorium dating data], *Materials of the III All-Russian conference on the study of the Quaternary period* [Proc. of the All-Russian Conference on the Quaternary studies], Smolensk, Oikumena Publ., 2002, vol. 1, p. 135–136. (In Russian)
- Lavrova M.A. [The main section of the Late Pleistocene in the Leningrad Area (in Russian)], *Voprosy stratigrafii chetvertichnykh otlozhenij severo-zapada Evropejskoj chasti SSSR* [Issues related to the stratigraphy of Quaternary deposits in the north-eastern European part of Russia], Leningrad, Gostoptekhizdat Publ., 1962, p. 125–139. (In Russian)
- Liivrand E. *Biostratigraphy of the Pleistocene deposits in Estonia and correlations in the Baltic region*, Doctoral Thesis, Stockholm, Stockholm University, Department of Quaternary Research, 1991, 114 p.
- Liivrand E.D. [Palynological investigations of the Early- and Middle-Valdaian periglacial deposits in Estonia], *Aktual'nyye problemy palinologii na rubezhe tret'yego*

- tys'acheletiya* [Actual problems of palinology at the turn of the Millennium], Tezisy докладov IX Vserossijskoj palinologicheskoy konferencii, Moscow, IGIRGI Publ., 1999, p. 162–163. (In Russian)
- Makhnach N.A. *Etapy razvitiya rastitel'nosti Belorussii v antropogene* [Stages of development of vegetation in Belarus in the Anthropogene], Minsk, Nauka i tehnika Publ., 1971, 210 p.
- Maksimov F.E., Kuznetsov V.Yu., Savelyeva L.A., Grigoriev V.A., Petrov A.Yu., Fomenko A.P., Baranova N.G. [On the temporal boundaries of the Mikulin interglacial and its individual phases], *Puti evol'utsionnoj geografii* [Pathways of the evolutionary geography], vyp. 2, Materialy II Vserossijskoj nauchnoj konferencii, posv'aschennoj pam'ati prof. A.A. Velichko, Moscow, Institut geografii RAN, 2021, p. 812–816. (In Russian)
- Mangerud J. Correlation of the Eemian and the Weichselian with deep sea oxygen isotope stratigraphy, *Quaternary International*, 1989, vol. 3/4, p. 1–4.
- Menke B., Tynni R. Das Eeminterglazial und das Weichselfrühglazial von Rederstall, Ditthmarschen und ihre Bedeutung für die mitteleuropäische Jungpleistozän-Gliederung, *Geologisches Jahrbuch*, 1984, vol. 76, p. 3–120.
- Miettinen A., Rinne K., Haila H. et al. The marine Eemian of the Baltic: new pollen and diatom data from Peski, Russia, and Põhja-Uhtyu, *Estonia Journal of Quaternary Science*, 2002, vol. 17(5–6), p. 445–458.
- Miidel A. Stop 14. Voka outcrop, *Excursion Guide and Abstracts of the International Symposium on Human Impact and Geological Heritage*, 2003, Tallinn, May 12–17, p. 33–35.
- Molodkov A. IR-OSL dating of uranium-rich deposits from the new late Pleistocene section at the Voka site, North-Eastern Estonia, *Quaternary Geochronology*, 2007, no. 2, p. 208–215.
- Molodkov A., Bitinas A., Damušytė A. IR-OSL studies of till and inter-till deposits from the Lithuanian Maritime Region, *Quaternary Geochronology*, 2010, vol. 5, p. 263–268.
- Molodkov A.N., Bolikhovskaya N.S. Climate change dynamics in Northern Eurasia over the last 200 ka: evidence from mollusc-based ESR-chronostratigraphy and vegetation successions of the loess-palaeosol records, *Quaternary International*, 2009, vol. 201, p. 67–76.
- Molodkov A.N., Bolikhovskaya N.S. Palaeoenvironmental changes and their chronology during the latter half of MIS 5 on the south-eastern coast of the Gulf of Finland, *Quaternary International*, vol. 616, 2022, p. 40–54, DOI: 10.1016/j.quaint.2021.10.016.
- Novenko E.Yu. *Izmeneniya rastitel'nosti i klimata Central'noj i Vostochnoj Evropy v pozdnem plejstocene i golocene v mezhdnednikovyye i perehodnyye etapy klimaticheskikh makrociklov* [Vegetation and climate changes in Central and Eastern Europe in the Late Pleistocene and Holocene at the Interglacial and transitional stages of climatic macro-cycles], Moscow, GEOS Publ., 2016, 228 p. (In Russian)
- Pleshivtseva E.S. Palinostratigrafiya plejstocena Severo-Zapada Russkoy ravniny v predelah Leningradskoj, Pskovskoj, Novgorodskoj i Vologodskoj oblastej [Palinostratigraphy of the Pleistocene of the North-Western Russian Plain within the Leningrad, Pskov, Novgorod and Vologda regions], Sb. St. sotrudnikov FGUP "Peterburgskaya kompleksnaya geologicheskaya ekspeditsiya", posv'aschennyj 60-letiyu organizacii [Collection of papers of the staff of the Peterburg Complex Geological Expedition], St-Peterburg, Rosnedra Publ., 2011, p. 92–100. (In Russian)
- Pleshivtseva E.S., Garkusha V.I., Gorshkova S.S. [Mikulin lakes within the interfluvium of the Pasha and Oyati rivers (Leningrad region)], *Istoriya plejstotsenovyykh ozer Vostochno-Evropejskoj ravniny* [History of the Pleistocene lakes of the East-European Plain], St-Peterburg, Nauka Publ., 1998, p. 111–114. (In Russian)
- Raukas A., Stankowski W. Influence of sedimentological composition on OSL dating of glaciofluvial deposits: examples from Estonia, *Geological Quarterly*, 2005, vol. 49, p. 463–470.
- Sanko A.F. The first U-Th dating of the Muravian Interglacial deposits in Belarus, *Book of Abstracts of the 8th International Conference "Methods of Absolute Chronology"*, 17–19 May 2004, Ustroń, Poland, Gliwice, 2004, p. 132–133.
- Satkunas J., Grigienė A., Velichkevich F. et al. Upper Pleistocene stratigraphy at the Medininkai site, eastern Lithuania: a continuous record of the Eemian – Weichselian sequence, *Boreas*, 2003, vol. 32, p. 627–641.
- Shackleton N.J. The last interglacial in the marine and terrestrial records, *Proceedings of the Royal Society*, London, 1969, Series B, 174, p. 135–154.
- Sokolova L.F., Malyasova E.S., Vishnevskaya E.M., Lavrova M.A. Novaya nahodka mezhdnednikovyykh otlozhenij v central'noj chasti Karel'skogo pereshejka [A new find of the interglacial deposits in the central parts of the Karelian Isthmus], *Vestn. Leningr. un-ta*, 1972, vol. 2, p. 124–131. (In Russian with English Summary)
- Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V.I. et al. The Late Quaternary ice sheet history of Northern Eurasia, *Quaternary Science Reviews*, 2004, vol. 23, p. 1229–1271.
- Zarrina E.P. *Chetvertichnyye otlozheniya severo-zapadnykh i central'nykh rajonov evropejskoj chasti SSSR* [Quaternary deposits of the north-western and central regions of the European part of the USSR], Leningrad, Nedra Publ., 1991, 187 p. (In Russian)
- Zelikson E.M. Climate and environment changes of East Europe during interstadials and interglacials of the Middle and Late Pleistocene, *Climate and environment changes of East Europe during Holocene and Late – Middle Pleistocene*, Research materials for IGU Conference "Global Changes and Geography", Moscow, Institute of Geography RAS, 1995, p. 80–92.
- Znamenskaya O.M., Cherimisinova Ye.A. [Lateral spreading of the Mga interglacial sea and main features of its palaeogeography], *Voprosy stratigraphii chetvertichnykh otlozhenij severo-zapada Evropejskoj chasti SSSR* [Issues related to the stratigraphy of Quaternary deposits in the north-eastern European part of Russia], Leningrad, Gostoptekhizdat Publ., 1962, p. 140–60. (In Russian)
- Znamenskaya O.M. Stratigraficheskoye polozheniye mgin-skikh morskikh otlozhenij [Stratigraphical position of the Mga marine sediments], *Doklady Akademii Nauk USSR*, 1959, vol. 129, no. 2, p. 401–404. (In Russian)

Received 16.11.2023
 Revised 15.01.2024
 Accepted 14.02.2024

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВОДНОГО СТОКА РЕКИ КОЛЫМЫ К СОВРЕМЕННЫМ КЛИМАТИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЯМ

А.А. Лисина¹, А.А. Сазонов², Н.Л. Фролова³, И.Н. Крыленко⁴, Ю.Г. Мотовилов⁵

^{1–4} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, кафедра гидрологии суши
^{1,2,4,5} Институт водных проблем РАН, лаборатория региональной гидрологии

¹ Асп.; e-mail: lisanastya99@mail.ru

² Ст. препод., канд. геогр. наук; e-mail: sazonov.lesha@gmail.com

³ Проф., д-р геогр. наук; e-mail: frolova_nl@mail.ru

⁴ Вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: krylenko_i@mail.ru

⁵ Глав. науч. сотр., д-р геогр. наук; e-mail: motol49@yandex.ru

Колыма – крупная река в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород, бассейн которой подвержен значительным климатическим изменениям. В качестве инструмента исследования особенностей водного режима и изучения его динамики в работе использован информационно-моделирующий комплекс ЕСОМАГ, рассчитывающий ежесуточные расходы воды в заданных створах на основе метеорологических данных с разрешением один сутки.

В работе анализируется современная динамика водного стока Колымы и стокоформирующих факторов за период 1979–2013 гг., проводится адаптация физико-математической модели для бассейна р. Колымы, а также исследуется чувствительность характеристик водного режима реки к изменениям климатических параметров.

Калибровка и верификация показали хорошую воспроизводимость моделью ЕСОМАГ фактических расходов воды для двух створов на р. Колыме и удовлетворительную воспроизводимость на притоке – Большом Аное. Использование модели ЕСОМАГ, впервые применяемой для бассейна Колымы, позволило исследовать климатически обусловленные изменения стока. Предварительный статистический анализ показал, что при сравнении средних значений гидрологических характеристик за 2000–2013 гг. со средними за 1979–1999 гг. зафиксирован рост годового стока на 5,1% в гидростворе Колымское в 283 км от устья Колымы (от 99,4 км³ в 1979–1999 гг. до 104,5 км³ в 2000–2013 гг.). Фактические изменения годового стока и его внутригодового распределения хорошо воспроизводятся расчетами и по модели ЕСОМАГ.

Для современного периода характерен рост среднегодовой температуры воздуха на 1,3°C. При этом в марте, апреле, ноябре и декабре температура воздуха по данным метеостанций возросла более чем на 2,5°C. Годовая сумма осадков увеличилась на 8,3%, наиболее резкий рост характерен для сентября и марта.

Для более полного понимания механизмов отклика водного режима р. Колымы на изменения климатических характеристик на базе модели ЕСОМАГ выполнен анализ чувствительности характеристик стока к изменениям температуры воздуха и осадков на основе искусственно смоделированных метеорологических рядов. Показано, что сток воды на 5% чувствительнее к увеличению осадков, чем к росту температуры на 1°C.

Ключевые слова: Колыма, ЕСОМАГ, гидрологический режим, чувствительность стока, климатические изменения

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.9

ВВЕДЕНИЕ

Современная динамика гидрологического режима рек Арктической зоны России является откликом на изменения климатических условий данной территории. При этом изменения важнейших факторов формирования стока, температуры воздуха и суммы осадков в полярных областях проявляется наиболее существенно по сравнению с другими регионами планеты [Тепловодообмен..., 2007]. Работы последних лет [Dai et al., 2019] подтверждают

существование эффекта «полярного усиления», при котором более интенсивное потепление происходит вблизи полюсов Земли. Важной отличительной особенностью рек Арктической зоны России является наличие многолетней мерзлоты в пределах их водосборов [Георгиади и др., 2011; Yang, Kane, 2021]. К криолитозоне – области распространения многолетней мерзлоты – относится около четверти суши Северного полушария и более половины территории России. Активная деградация криолитозоны

дополнительно оказывает влияние на гидрологический режим рек, приводя к внутригодовому перераспределению стока [Георгиади и др., 2011; Magritsky et al., 2018]. В последние годы для исследования особенностей гидрологического режима и изучения его динамики все чаще применяются современные физико-математические модели формирования речного стока с распределенными параметрами.

В качестве объекта исследования в работе выбран бассейн р. Колымы – крупнейший речной бассейн, полностью расположенный в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты. Физико-математические модели формирования стока на водосборе Колымы использованы в работе [Kuchment, Gelfan, Demidov, 2000], где объектом исследования является бассейн Верхней Колымы (до створа Усть-Среднекан), и в исследовании [Lebedeva et al., 2019], посвященном водосборам ручьев Колымской водно-балансовой станции. В данной работе для бассейна Колымы впервые применен ИМК ЕСОМАГ [Motovilov et al., 1999], широко использующийся для арктических бассейнов в условиях изменяющегося климата [Gottschalk et al., 2001; Krylenko et al., 2015; Gelfan et al., 2014].

Использование гидрологических моделей позволяет оценить влияние климатических изменений на речной сток. Для этого в качестве входной информации задаются искусственные метеорологические ряды. В ряде работ авторы получают метеорологические сценарии с использованием моделей [Krylenko et al., 2015; Гельфан и др., 2021; Гусев и др., 2014]. При данном подходе точность оценок возможных изменений гидрологического режима лимитируется неопределенностью будущих климатических сценариев.

Другой подход позволяет оценить чувствительность к величинам метеорологических характеристик [Gelfan et al., 2017]. Благодаря линейной трансформации исходных рядов наблюдений становится возможным физически обоснованный анализ чувствительности речного стока к изменению температуры воздуха и количества осадков [Кучмент и др., 1990]. Недостатком подобного подхода является то, что не учитывается внутригодовая неравномерность будущего изменения метеорологических характеристик [Motovilov, Gelfan, 2013]. В данном исследовании на основе метода delta-change transformation [Gelfan et al., 2017] выполнен анализ чувствительности стока Колымы к изменению исходных рядов температуры и осадков.

Таким образом, цель данного исследования заключается в изучении динамики стока Колымы за период с 1979 по 2013 гг. с применением физико-математической модели ЕСОМАГ [Motovilov et al., 2017]. Рассчитаны изменения характеристик гидро-

логического режима Колымы, определена динамика основных стокоформирующих факторов в бассейне реки в течение исследуемого периода и выполнен анализ чувствительности стока к изменению метеорологических характеристик.

Бассейн р. Колымы. Площадь бассейна р. Колымы составляет 647 000 км², около половины его территории занимает Магаданская область, примерно по четверти приходится на Республику Якутия и Чукотский АО, к Хабаровскому краю относится менее 1% бассейна. Колыма образуется при слиянии рек Аян-Юрях и Кулу, которые берут начало на Нерском плоскогорье. Река имеет протяженность 2129 км и впадает в Колымский залив Восточно-Сибирского моря. Среди российских рек, впадающих в Северный Ледовитый океан, Колыма занимает четвертое место по площади водосбора (647 тыс. км²) и длине (2129 км) после Оби, Енисея и Лены. Тем не менее, из-за своей труднодоступности и малой плотности населения бассейн Колымы остается слабоизученным.

В соответствии с орографическими условиями в бассейне Колымы можно выделить две зоны: к горной местности относятся верхнее и среднее течение, к равнинной – нижнее. Более 80% бассейна принадлежат Яно-Чукотской горной стране: абсолютные отметки высот достигают 2,5 км. Нижнее течение реки приходится на Колымскую низменность, где выделяют таежную и тундровую зоны. Лесистость бассейна достигает 80%, заболоченность – 8%, озера занимают 10%, большинство из которых – термокарстовые озера Колымской низменности [Научно-популярная..., 2023]. Крупнейшими реками бассейна, помимо Колымы, являются Омолон (площадь бассейна $F = 113\,000$ км²), Анюй ($F = 107\,000$ км²), Большой Анюй ($F = 57\,300$ км²), Малый Анюй ($F = 49\,800$ км²), Коркодон ($F = 49\,800$ км²), Ясачная ($F = 35\,900$ км²), Березовка ($F = 28\,400$ км²).

По оценкам [Научно-популярная..., 2023], среднесуточный годовой сток Колымы составляет $W_0 = 121$ км³, что соответствует среднегодовому расходу воды $Q_0 = 3830$ м³/с, модулю стока $q_0 = 5,9$ л/с·км², слою стока $y_0 = 187$ мм. По классификации рек по водному режиму Б.Д. Зайкова, р. Колыма относится к Восточно-Сибирскому типу; по классификации П.С. Кузина, Колыма относится к типу Пб1 (реки с весенне-летним половодьем и паводками в теплое время года). Гидрологический режим Колымы является характерным для рек криолитозоны. В гидроцикле Колымское половодье обычно наблюдается в конце мая – июне, летний период, прерываемыйся дождевыми паводками, длится до октября. По классификации М.И. Львовича, Колыма имеет смешанное питание. Так, по данным [Научно-популярная..., 2023], доля снегового питания составляет

47%, дождевого – 42%, подземного – 11%. Летний подземный сток формируется благодаря дренированию сезонно-талого слоя и водоносного горизонта хорошо проницаемых аллювиальных пород. В зимний период сток обеспечивается, главным образом, за счет прирусловых таликов [Lebedeva et al., 2019]. По данным [Глотов, Глотова, 2010], 80% зимнего стока Колымы приходится на октябрь и ноябрь. Суммарная площадь сквозных таликов не превышает 1–2% площади бассейна [Lebedeva et al., 2019].

Бассейн находится в субарктическом и арктическом климатических поясах. Годовая сумма осадков в нижнем течении на территории Колымской низменности составляет около 250 мм. Количество осадков в верхнем течении более чем в два раза выше – превышает 500 мм. Средняя температура в зимние месяцы опускается ниже -30°C , в наиболее жарком месяце, июле, составляет около 13°C .

Сток р. Колымы зарегулирован Колымским каскадом ГЭС, включающим в себя две ГЭС сезонного регулирования: верхняя ступень – Колымская ГЭС (1894 км от устья) и нижняя ступень – Усть-Среднеканская ГЭС (1678 км от устья). Наполнение Колымского водохранилища началось в 1980-х и в 1988 г. доведено до проектных объемов [Научно-популярная..., 2023]. Строительство Усть-Среднеканской ГЭС продолжается, окончание запланировано на 2024 г. [АО Усть-Среднеканская..., 2023]. Регулирование стока приводит к перераспределению внутригодового стока, в первую очередь к увеличению зимнего меженного стока [Магрицкий, 2008]. По данным [Magritsky et al., 2018], зарегулирование стока Колымским водохранилищем привело к снижению стока половодья на 30–50% на нижерасположенных участках реки. Помимо регулирования стока, влияние на динамику гидрологического режима р. Колымы оказывают климатические изменения [Магрицкий и др., 2019; Алексеевский и др., 2015; Соколов, Ушаков, 2012; Ушаков, 2013]. В настоящее время динамика водного стока Колымы также подвержена климатическим изменениям [Magritsky et al., 2018; Majhi, Yang, 2008]. В створе Среднеколымск при сравнении периодов 1936–1975 и 1976–2013 гг. отмечается существенный рост зимнего стока воды – на 174% [Magritsky et al., 2018]. Годовой слой стока в бассейне увеличился на 8,7 мм. В верхней незарегулированной части бассейна фиксируется увеличение стока рек, что приводит к росту притока воды в Колымское водохранилище [Lebedeva et al., 2019; Majhi, Yang, 2008]; по оценкам [Ушаков, Лебедева, 2016], годовой приток возрос на 14%.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для разработки модели бассейна Колымы собрана обширная информация о рельефе, характе-

ристиках почв и подстилающей поверхности. Источником цифровой модели рельефа с разрешением 1 км и 90 м – проект The Global Land Base Elevation (GLOBE) американского агентства Defense Mapping Agency (DMA). Данные о характере растительности определены по почвенной карте России 1 : 250 000, разработанной коллективом под руководством М.А. Глазовской и представленной в электронном виде Почвенным институтом РАН. Источник информации о подстилающей поверхности – ландшафтная карта стран бывшего СССР 1 : 2 500 000 в электронном виде, разработанная под руководством В.А. Николаева и представленная Почвенным институтом РАН.

В бассейне Колымы на сегодняшний день функционирует 35 гидрологических постов, определение расходов воды на Колыме производится в двух створах: в г. Среднеколымск (641 км от устья) и в пос. Усть-Среднекан – нижнем бьефе Усть-Среднеканской ГЭС (1623 км от устья). Продолжительный ряд ежесуточных расходов воды имеется также для гидроствора Колымское в 283 км от устья на несколько километров ниже впадения крупнейшего притока – р. Омолон. Однако в Колымском с 1998 г. перестали производиться измерения скоростей течения и значения расходов воды стали восстанавливаться по зависимостям $Q = f(H)$.

В качестве входной информации для модели ЕСОМАГ использованы ежесуточные расходы воды в исследуемых створах, взятые из гидрологических ежегодников и с сайта АИС ГМВО [Автоматизированная..., 2023] за период 1979–2013 гг. Так как сток Колымы зарегулирован, в модели использовались данные о сбросах воды Колымской ГЭС как условия на верхней границе участка (рис. 1).

Источником ежесуточных данных о температуре воздуха, количестве осадков и дефиците влажности послужили архивы наблюдений 37 метеостанций в исследуемом регионе (см. рис. 1). Для получения подробной информации о распределении запасов воды в снеге взяты данные проекта FMI GlobSnow. На сайте Европейского космического агентства в рамках проекта GlobSnow для пользователей доступны данные, покрывающие всю территорию Северного полушария [GlobSnow, 2023].

Методика применения модели формирования стока ЕСОМАГ. Информационно-моделирующий комплекс (ИМК) ЕСОМАГ [Motovilov et al., 1999] представляет собой пространственно-распределенную модель гидрологического цикла и формирования стока, состоящую из гидрологического блока, описывающего происходящие на водосборе процессы: инфильтрацию, испарение, термический и водный режим почв, формирование

снежного покрова и снеготаяние, формирование поверхностного, внутрпочвенного, грунтового и речного стока, а также геохимического блока. В основе пространственной структуры ЕСОМАГ лежат отдельные ландшафтные единицы («элементарные водосборы»), образующие нерегулярную сетку. Схематизация водосборной площади и речной сети в бассейне позволяет передать пространственные неоднородности рельефа, почв, ти-

пов землепользования и учесть пространственные особенности гидрометеорологических полей [Мотовилов, Гельфан, 2018].

Расчет по модели производился в створах, для которых имелись продолжительные ряды наблюдений: в двух створах на Колыме – Колымское (283 км от устья) и Среднеколымск (641 км от устья), а также на крупном притоке – р. Большой Анюй в створе станции Константиновская.



Рис. 1. Бассейн р. Колымы с расположением гидрометрических постов, архивы которых использовались при калибровке и верификации модели формирования стока

Fig. 1. Basin of the Kolyma River with the location of gauging stations, the archives of which were used in calibration and verification of a runoff formation model

ЕСОМАГ содержит набор физически обоснованных параметров, калибровка которых в модели производилась вручную путем расчета критерия Нэша-Сатклифа R^2_{NS} [Nash, Sutcliffe, 1970], часто используемого на практике для оценки точности работы модели и ошибки среднего $BIAS$, рассчитываемых по формулам

$$R^2_{NS} = 1 - \frac{\sum (q_{0i} - q_{si})^2}{\sum (q_{0i} - \bar{q})^2}, \quad (1)$$

$$BIAS = \frac{\bar{Q}_f - \bar{Q}_s}{\bar{Q}_f} \cdot 100\%, \quad (2)$$

а также с помощью визуального сравнения фактических и смоделированных гидрографов. Значения R^2_{NS} , превышающие принятое в практике пороговое значение 0,75, $|BIAS| < 10\%$, характеризуют качество расчетов по модели как хорошее. При R^2_{NS} , находящемся в диапазоне от 0,5 до 0,75, и $|BIAS|$ от 10 до 15% – как удовлетворительное [Мотовилов, Гельфан, 2018]. При калибровке параметров модели приведенные выше критерии качества рассчитывались для трех створов и усреднялись с учетом веса, пропорционального площади бассейна для каждого створа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты калибровки модели ЕСОМАГ для бассейна Колымы. По расчетам воспроизводимость моделью ЕСОМАГ фактических расходов воды оказалась хорошей (табл. 1) для обоих створов на р. Колыме (Колымское и г. Среднеколымск), для которых критерий Нэша-Сатклифа за период калибровки (1979–1996 гг.) и верификации (1997–2013 гг.) превышал 0,82, ошибка среднего лежала в пределах 5,1%. Качество расчетов для створа р. Большой Анюй – ГМС Константиновская с меньшей площадью водосбора по принятым грациям оказалось хуже: удовлетворительным по критерию

Нэша-Сатклифа ($0,50 \leq R^2_{NS} < 0,75$), хорошим по величине ошибки среднего ($|BIAS| < 10\%$). На рис. 2 представлены фактические и рассчитанные суточные гидрографы для Колымского, расположенного в 283 км от устья Колымы.

Для оценки произошедших изменений анализируемые ряды расходов воды были разделены на две части: 1979–1999 и 2000–2013 гг. Для каждого периода построены типовые гидрографы, ординаты которых получены как средние расходы воды за каждую дату в среднем для двух периодов (рис. 3). Важно отметить, что ИМК ЕСОМАГ хорошо воспроизводит изменение объема годового стока: в гидростворе Колымское по результатам расчетов сток увеличился на 5,7% (от 95,6 до 101,1 км³), а по фактическим рядам – на 5,1% (от 99,4 до 104,5 км³). Для створа г. Среднеколымск рассчитанный годовой сток увеличился на 8,3% (от 68,4 до 74,1 км³), фактический – на 15,9% (от 68,6 до 79,6 км³). Для Большого Анюя снижение стока отмечено как по данным наблюдений (на 9,2% – от 8,8 до 8,0 км³), так и по расчетам модели (на 10,8% – от 8,1 до 7,2 км³).

Отмечена хорошая воспроизводимость ИМК ЕСОМАГ следующих внутригодовых изменений стока (см. рис. 3): смещения волны половодья на более ранние даты, более позднего наступления зимней межени и увеличения стока во второй половине августа – октябре. Однако стоит отметить, что расчеты по ЕСОМАГ несколько искажают изменения максимальных расходов воды. В створе р. Колыма – Колымское по фактическим данным средние значения максимальных суточных расходов воды снизились на 0,5% (с 18 300 до 18 200 м³/с), тогда как рассчитанные значения для Колымского увеличились на 8,5% (с 14 900 до 16 100 м³/с). В створе р. Колыма – г. Среднеколымск максимальные фактические расходы воды возросли на 15,7% (с 10 500 до 12 200 м³/с), рассчитанные – на 9,9% (с 10 700 до 11 800 м³/с).

Таблица 1

Значения критериев качества расчета суточного и месячного стока в бассейне р. Колымы для периодов калибровки и верификации

Река – гидропост	Площадь бассейна, тыс. км ²	Расстояние от устья, км	Период калибровки 1979–1996 гг.		Период верификации 1997–2013 гг.			
			Сутки	Месяц	Сутки	Месяц		
			R^2_{NS}	$BIAS$, %	R^2	R^2_{NS}	$BIAS$, %	R^2
Колыма – гидроствор Колымское	526	283	0,90	1,58	0,94	0,82	1,92	0,85
Колыма – г. Среднеколымск	361	641	0,87	5,09	0,92	0,84	–1,31	0,87
Большой Анюй – ГМС Константиновская	49,6	67	0,51	5,25	0,87	0,51	7,26	0,79

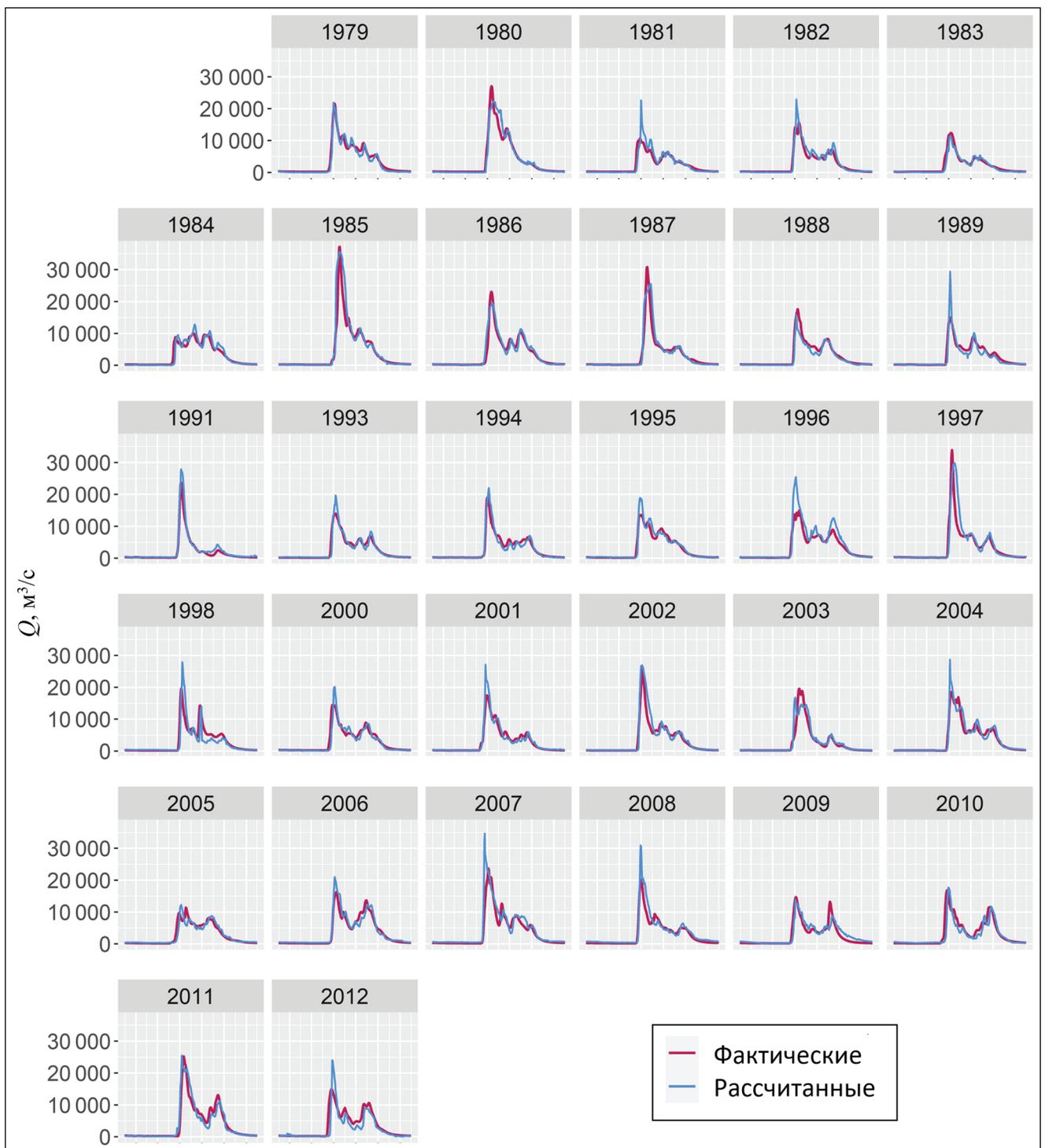


Рис. 2. Фактические и рассчитанные гидрографы в створе р. Колымы – Колымское за 1979–2013 гг.

Fig. 2. Actual and calculated hydrographs at the Kolyma River section – Kolymskoye for 1979–2013

Подобные различия между фактическими и смоделированными данными в гидростворе Колымское для периода верификации связаны, вероятно, с тем, что с 1998 г. перестали производиться измерения скоростей течения в Колымском, и значения расходов воды стали восстанавливаться по зависимостям $Q = f(H)$. Качество получаемых данных с сети Росгидромета ухудшилось.

Динамика метеорологических характеристик в бассейне р. Колымы в 1979–2013 гг. Расчеты стока с использованием модели ECOMAG выполнены для 1979–2013 гг. Ниже на основе имеющихся массивов метеорологических данных за этот период рассматривается динамика основных факторов формирования стока в бассейне р. Колымы.

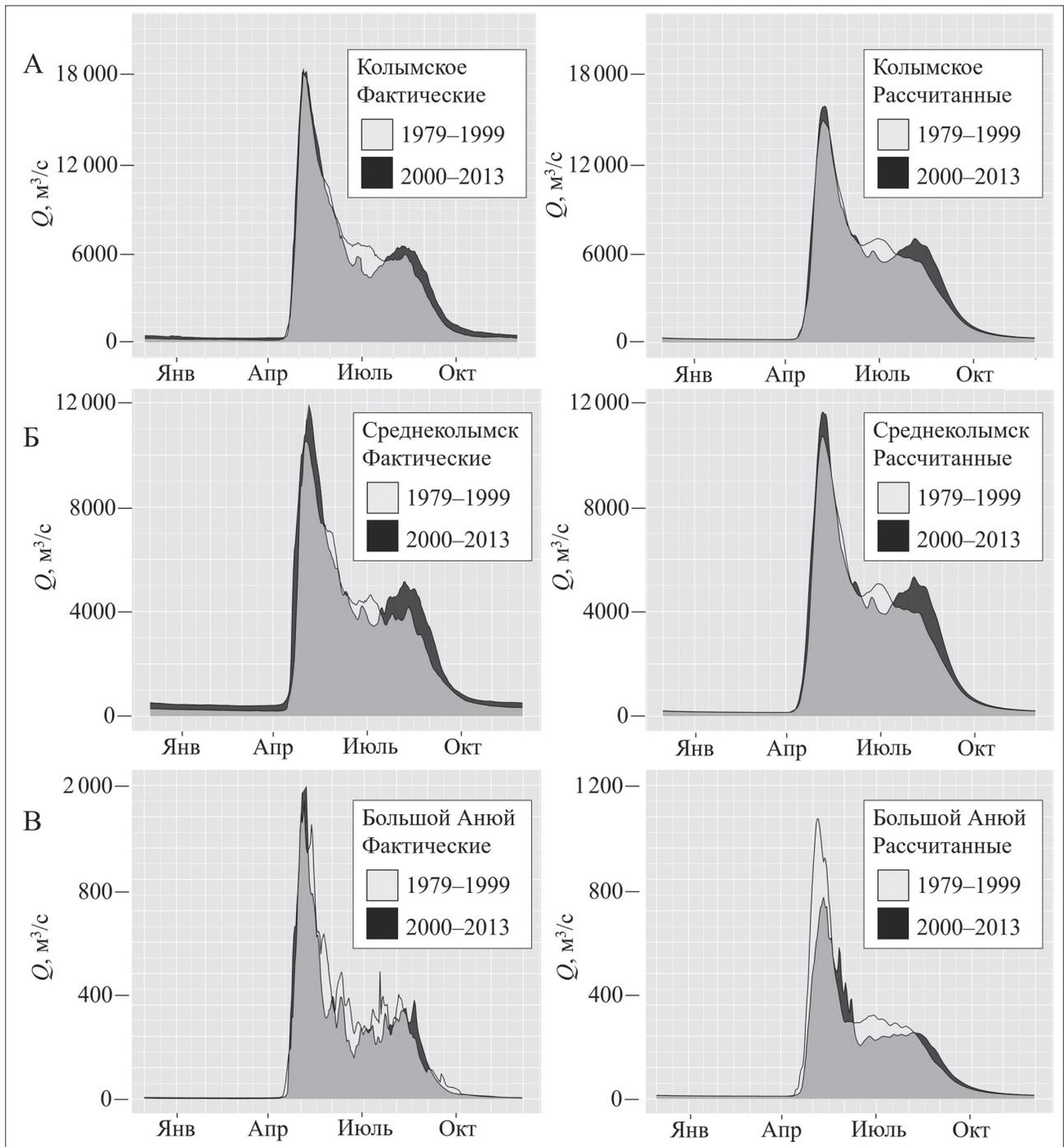


Рис. 3. Фактические и рассчитанные типовые гидрографы за периоды 1979–1999 и 2000–2013 гг. для р. Колыма – гидроствор Колымское (А), для створа р. Колыма – г. Среднеколымск (Б), для створа р. Большой Анюй – ГМС Константиновская (В)

Fig. 3. Actual and calculated typical hydrographs for the periods 1979–1999 and 2000–2013 for the Kolyma River – Kolymskoe hydraulic station (A), for the Kolyma River section – Srednekolymsk (Б), for the Bolshoi Anyui River section – HMS Konstantinovskaya (B)

Получена количественная оценка изменений температуры воздуха и осадков, произошедших в бассейне Колымы. С этой целью временной ряд метеорологических характеристик за 1979–2013 гг. был поделен на две части, сравнивались средние по всему бассейну величины

для двух периодов: 1979–1999 и 2000–2013 гг. Произшедшие в бассейне Колымы изменения среднегодовой температуры воздуха и годового количества осадков в среднем в 2000–2013 гг. относительно среднего в 1979–1999 гг. отражены на рис. 4.

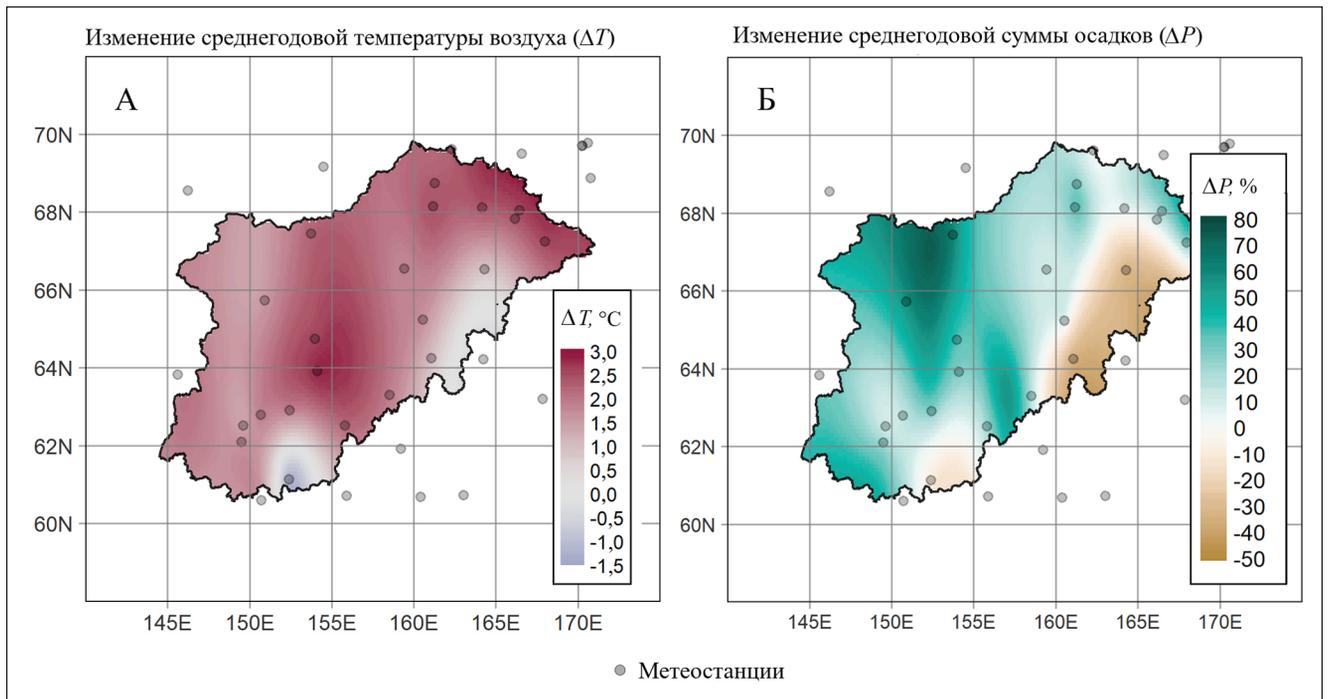


Рис. 4. Изменение среднегодовой температуры воздуха (А) и суммы осадков (Б) в бассейне р. Колымы в 2000–2013 гг. относительно 1979–1999 гг.

Fig. 4. Changes in the average annual air temperature (A) and the amount of precipitation (B) in the Kolyma River basin in 2000–2013 relative to 1979–1999

Расчитанные средние значения метеорологических характеристик для каждого месяца и за год, а также их изменение, приведены в табл. 2. В бассейне Колымы с 1979 г. отмечена тенденция роста среднегодовых температур воздуха и годовой суммы осадков. Средняя температура в 2000–2013 гг. ($-10,2^{\circ}\text{C}$) выросла на $1,3^{\circ}\text{C}$ относительно 1979–1999 гг. ($-11,5^{\circ}\text{C}$), годовая сумма осадков – на $8,3\%$ (с 350 до 379 мм). Наиболее активный рост температуры наблюдается в ноябре (на $3,2^{\circ}\text{C}$), марте (на $2,9^{\circ}\text{C}$), декабре (на $2,6^{\circ}\text{C}$) и апреле (на $2,3^{\circ}\text{C}$). При сравнении периодов 1979–1999 и 2000–2013 гг. можно отметить увеличение весенних температур на $2,3^{\circ}\text{C}$, осенних – на $1,8^{\circ}\text{C}$, летних – на $1,0^{\circ}\text{C}$, зимних – на $2,0^{\circ}\text{C}$. Количество осадков увеличилось более чем на 20% в августе и сентябре, а также в марте и декабре. При этом в феврале и ноябре зафиксировано снижение суммы осадков. В июне, когда на Колыме проходит пик половодья, количество осадков возросло на 16% , за летне-осенний период (с августа по октябрь) – увеличилось на 19% .

Помимо температуры воздуха и количества осадков важным стокоформирующим фактором является высота снежного покрова. Использование данных пассивной микроволновой радиометрии (международный проект GlobSnow), а также метеорологического реанализа ERA5 позволило

оценить точность результатов расчета распределения снежного покрова внутри модели ECOMAG. Соответствие межгодового хода средней для бассейна Колымы величины запасов воды в снежном покрове бассейна по различным источникам данных оказалось хорошим (рис. 5), что дает возможность использовать эту информацию для решения различных гидрологических задач. В феврале коэффициент корреляции между величинами запаса воды в снеге по ECOMAG и по ERA5 составил $0,78$ в среднем для 2000–2010 гг. В апреле соответствие между моделью и реанализом лучше: коэффициент корреляции $0,86$. При этом заметно систематическое превышение данных ERA5 и ECOMAG над GlobSnow. Так, коэффициент корреляции между величинами запаса воды в снеге по реанализу ERA5 и микроволновой съемке GlobSnow составил $0,68$ для февраля и $0,80$ для апреля (см. рис. 5). На основе данных метеорологического реанализа ERA5 рассчитаны величины запаса воды в снежном покрове в среднем на всем бассейне Колымы для каждого месяца в 1979–1999 и 2000–2013 гг. (табл. 3). Увеличение запасов воды в снеге в зимние месяцы связано с существенным увеличением количества осадков в декабре – на $29,8\%$ (см. табл. 2). При этом в мае и октябре запасы воды в снеге снизились, что связано с ростом температуры в эти месяцы.

**Изменение средней годовой температуры воздуха и суммы осадков в бассейне р. Колымы
в 2000–2013 гг. относительно 1979–1999 гг.**

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Средняя температура воздуха, °С													
1979–1999	–34,2	–31,3	–25,3	–13,3	0,8	11,0	13,4	9,8	2,7	–11,1	–26,3	–34,1	–11,5
2000–2013	–34,6	–32,9	–22,4	–11,0	2,6	11,3	14,8	11,0	3,5	–9,7	–23,1	–31,5	–10,2
Изменение, °С	–0,4	–1,6	2,9	2,3	1,8	0,3	1,4	1,2	0,8	1,4	3,2	2,6	1,3
Средняя сумма осадков, мм													
1979–1999	18,3	19,8	9,9	11,6	17,9	33,3	61,5	43,3	26,6	25,5	37,7	13,8	321
2000–2013	18,2	16,8	13,3	12,7	19,3	39,8	62,9	55,2	35,6	27,0	31,5	17,6	350
Изменение, %	–0,3	–17,9	25,6	8,7	7,3	16,3	2,2	21,6	25,3	5,6	–19,7	21,6	8,3

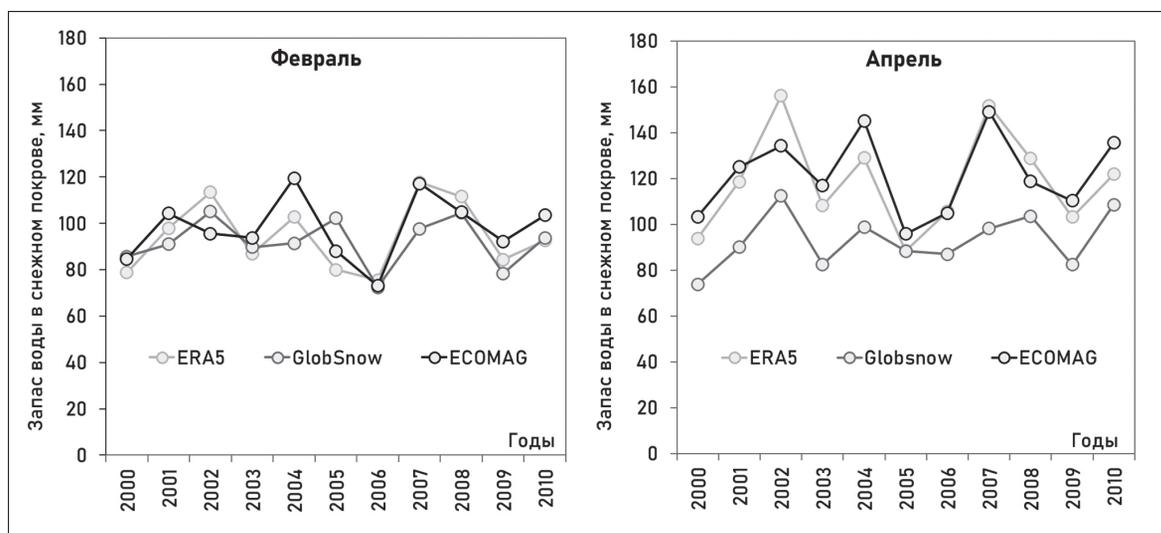


Рис. 5. Запасы воды в снежном покрове в среднем для бассейна р. Колымы по данным реанализа ERA5, по спутниковым данным GlobSnow и по результатам расчета в модели ECOMAG для февраля и апреля за 2000–2010 гг.

Fig. 5. Average water reserves in snow cover for the Kolyma River basin according to the ERA5 reanalysis data, the GlobSnow satellite data and the results of the ECOMAG model calculations for 2000–2010 (February and April)

**Изменение средних запасов воды в снежном покрове в бассейне р. Колымы по данным реанализа
ERA5 в 2000–2013 гг. относительно 1979–1999 гг.**

Месяц	Запасы воды в снежном покрове, мм		Изменение запасов воды в снежном покрове	
	1979–1999 гг.	2000–2013 гг.	мм	%
Октябрь	30	28	–2,62	–8,6
Ноябрь	58	58	–0,16	–0,3
Декабрь	76	82	5,49	7,2
Январь	93	97	3,38	3,6
Февраль	110	111	0,89	0,8
Март	124	125	1,13	0,9
Апрель	133	134	1,83	1,4
Май	97	89	–7,98	–8,2

Наиболее легко идентифицируемым показателем темпов деградации криолитозоны является глубина сезонно-талого слоя – максимальная за год глубина оттаивания многолетнемерзлых грунтов. Основным источником данных является программа CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring), в рамках которой, начиная с 1990 г., проводятся годы измерения глубины сезонно-талого слоя [CALM..., 2023]. Однако из-за нерегулярной сети мониторинга становится невозможным рассчитать с высокой точностью скорость увлечения глубины сезонно-талого слоя для всего бассейна Колымы. При сравнении средних глубин сезонного оттаивания в бассейне Колымы для периода 1990–1999 и 2000–2013 гг. следует отметить увеличение глубин для всей территории бассейна. Максимальное увеличение глубин наблюдается в нижней части бассейна ближе к устью Колымы, где глубины сезонного оттаивания возросли более чем на 50% в 2000–2013 гг. относительно 1990–1999 гг., т. е. прирост сезонно талого слоя превысил 2 см/год.

Таблица 4

Аномалии моделируемых значений годового стока (%) при изменении годовых температуры воздуха (ΔT , °C) и суммы осадков (ΔP , %) в створе р. Колыма – Колымское для искусственного 30-летнего периода относительно 1984–2013 гг.

ΔT , °C \ ΔP , %	-1	0	+1	+2	+3
-10	-10	-14,7	-19	-24	-29
-5	-2,1	-7,1	-12	-17	-21
0	5,9	100,6 км³	-4,0	-9,0	-14
5	14	9,1	4,0	-1,1	-6,2
10	23	17	12	7,1	2,8
15	31	26	21	15	10
20	40	34	29	24	18

Примечание. Жирным шрифтом указана норма годового стока.

Анализ чувствительности стока р. Колымы к климатическим изменениям. Хорошая воспроизводимость фактических данных позволила использовать ЕСОМАГ для анализа чувствительности годового и сезонного стока воды р. Колымы к климатическим изменениям. Искусственные ряды ежесуточных значений температуры воздуха и осадков получены путем трансформации исходных данных за 1984–2013 гг.: все значения в 30-летнем ряду температур воздуха изменялись на заданную величину ΔT , в ряду осадков – на заданный множитель ΔP . Поправки рассматривались в диапазо-

не от -1 до $+4^\circ\text{C}$ для температуры и от 0,9 до 1,2 для осадков (т. е. варианты от снижения суммы осадков на 10% до увеличения на 20%). По результатам моделирования ежесуточных расходов воды для каждого тридцатилетнего периода для различных заданных ΔT и ΔP были рассчитаны типовые гидрографы стока, ординаты которых получены как средние расходы воды за каждую дату для выделенного периода. Дальнейший анализ проводился для типовых гидрографов (рис. 6, табл. 4–6).

Среднегодовое годовое стока воды, полученный по модели для 1984–2013 гг., в створе р. Колыма – Колымское составляет 100,6 км³/год. При неизменном количестве осадков либо температуре воздуха заметна тенденция увеличения стока с ростом осадков и снижения стока при увеличении температуры вследствие повышения потерь на испарение. Установлено, что в случае, когда количество осадков возрастает на 5%, увеличивая приходную составляющую водного баланса, а при этом температура воздуха растет на 1°C , повышая потери на испарение, то водный сток увеличивается на 4%. Таким образом, моделируемые гидрографы более чувствительны к повышению количества осадков на 5%, чем к росту температуры на 1°C (см. табл. 4).

Как было упомянуто выше, годовое стока в створе р. Колыма – Колымское в 2000–2013 гг. по данным наблюдений увеличился на 5,7% относительно 1979–1999 гг. Температура воздуха за этот же период возросла на $1,1^\circ\text{C}$, годовая сумма осадков – на 7,7%. Дополнительно к рассмотренным выше сочетаниям ΔT и ΔP выполнены расчеты по ИМК ЕСОМАГ, когда все значения в ряду температур увеличены на $\Delta T = 1,1^\circ\text{C}$, а ко всем значениями в ряду осадков добавлен множитель $\Delta P = 1,077$. При этом смоделированный годовое стока увеличился на 6,8% относительно расчета по исходным метеорологическим рядам без поправок ΔT и ΔP . Данный результат хорошо соотносится с изменением стока на 5,7%, которое было получено по фактическим расходам воды при сравнении 2000–2013 гг. и 1979–1999 гг. Это подчеркивает определяющее влияние на формирование стока температуры воздуха и осадков. При этом прочие стокоформирующие факторы могут оказывать более существенный вклад на изменение стока, чем его увеличение на 1,1% (6,8%–5,7%), так как эти факторы могут иметь разнонаправленное влияние на величину стока, в результате компенсируя друг друга.

Сток воды в зимнюю межень, в отличие от годового, при неизменных осадках будет расти с увеличением температуры, что связано не только с практически полным отсутствием потерь на испарение в зимнюю межень, но и с замедлением процесса истощения зимнего стока при более высокой температуре (табл. 5).

Таблица 5

Аномалии моделируемых значений среднего расхода воды зимней межени (%) при изменении годовых температуры воздуха (ΔT , °C) и суммы осадков (ΔP , %) для створа р. Колыма – Колымское для искусственного 30-летнего периода относительно 1984–2013 гг.

ΔP , % \ ΔT , °C	-1	0	+1	+2	+3
-10	-0,6	-0,6	-1,4	-3,5	-5,3
-5	1,5	-0,9	-1,6	-3,6	-5,1
0	2,1	6,98 км³	-1,9	-3,8	-4,8
5	1,9	0,0	-2,4	-3,0	-6,1
10	2,3	0,4	-2,0	-3,7	-6,6
15	1,3	0,0	-1,7	-3,9	-6,1
20	1,2	-1,3	-2,8	-5,0	-5,8

Примечание. Жирным шрифтом указана норма зимнего меженного стока.

Максимальные расходы воды снижаются при росте температуры и при уменьшении числа осадков. При этом максимальные расходы воды увеличиваются быстрее, чем объемы стока в половодье, а снижаются медленнее. Уменьшение количества осадков на 5% и снижение температуры на 1°C приводит к незначительному увеличению максимальных расходов воды, в отличие от годового стока, который в таком случае снижается (табл. 6).

Полученные результаты позволяют сравнить чувствительность годового стока р. Колымы с другими крупнейшими реками – Леной [Motovilov, Gelfan, 2013] и Северной Двиной [Krylenko et al., 2015]. Сток Северной Двины, сходной по водности с Колымой, сильнее подвержен изменениям климатических параметров. Относительное изменение стока Лены в сравнении с Колымой более существенно при снижении стока и менее существенно при его росте. Так, рост температуры на 1°C приведет к снижению годового стока на 2, 5, 7% для Колымы, Лены и Северной Двины соответственно, увеличение суммы осадков на 10% – к росту годового стока на 19, 16, 21% для Колымы, Лены и Северной Двины соответственно.

ВЫВОДЫ

Анализ архивов наблюдений на 37 метеостанциях в исследуемом регионе показал, что в 2000–2013 гг. относительно 1979–1999 гг. среднегодовая температура воздуха увеличилась на 1,3°C, годовая сумма осадков – на 8,3%. При этом наиболее резкие изменения произошли в марте и декабре, когда температура воздуха увеличилась на 2,9 и 2,6°C, а количество осадков увеличилось на 25,6 и 21,6% соответственно.

Таблица 6

Аномалии моделируемых значений максимальных расходов воды (%) при изменении годовых температуры воздуха (ΔT , °C) и суммы осадков (ΔP , %) для створа р. Колыма – Колымское для искусственного 30-летнего периода относительно 1984–2013 гг.

ΔP , % \ ΔT , °C	-1	0	+1	+2	+3
-10	-6	-16	-22	-28	-34
-5	2	-8	-15	-20	-27
0	11	15 800 м³/с	-7	-13	-20
5	22	10	2	-5	-12
10	32	20	10	4	-3
15	43	30	19	13	5
20	55	40	29	22	14

Примечание. Жирным шрифтом указана норма максимальных расходов воды.

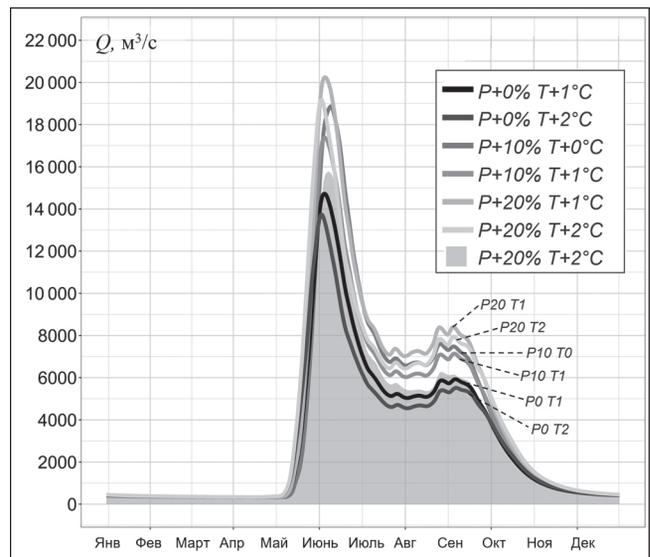


Рис. 6. Типовые смоделированные гидрографы стока для 30-летних периодов, полученные при изменениях годовой температуры воздуха и суммы осадков для водосбора р. Колыма – Колымское

Fig. 6. Typical runoff hydrographs for 30-year periods, modeled with regard to changes in annual air temperature and precipitation for the Kolyma River catchment – Kolymskoye

В результате сравнения среднемесячных запасов воды в снежном покрове по архивам ERA5 и Globsnow с рассчитанными величинами по модели ECOMAG установлена хорошая сходимость данных этих баз и расчетов модели ECOMAG. Зафиксировано снижение запасов воды в снеге в октябре и мае и увеличение в зимние месяцы.

Для всего бассейна р. Колымы впервые разработана физико-математическая модель формирования стока ECOMAG с пространственно-распределенными параметрами. Расчеты по модели с хорошей точностью воспроизводят фактические гидрографы стока в створах р. Колыма – г. Среднеколымск и р. Колыма – Колымское, и с удовлетворительной точностью гидрографы стока в створе р. Большой Анюй – ГМС Константиновская. При этом качество расчетов хуже для створа с меньшей площадью – р. Большой Анюй – ГМС Константиновская, а также для максимальных расходов воды в створе р. Колыма – Колымское, когда расходы воды восстанавливались по зависимости $Q = f(H)$.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке РНФ (проект № 24-17-00084). Часть данных собрана и обработана в рамках темы № FMWZ-2022-0001 государственного задания ИВП РАН, оценка чувствительности стока – в рамках темы FMWZ-2022-0003 государственного задания ИВП РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеевский Н.И., Магрицкий Д.В., Михайлов В.Н. Антропогенные и естественные изменения гидрологических ограничений для природопользования в дельтах рек Российской Арктики // Водное хозяйство России. 2015. № 1. С. 14–31.
- Гельфан А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Мотовилов Ю.Г., Гусев Е.М. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7. № 1. С. 36–79. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-1-36-79.
- Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П. и др. Сценарная оценка вероятных изменений речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 1: Бассейн реки Лены. М.: Макс Пресс, 2011. 179 с.
- Глотов В.Е., Глотова Л.П. Изменения ресурсов пресных природных вод в горных районах криолитозоны при глобальном потеплении климата (на примере северо-востока России) // Водные ресурсы. 2011. № 1. С. 1408–1412.
- Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я., Айзель Г.В. Сценарное прогнозирование изменения составляющих водного баланса рек Оленек и Индигирка в связи с возможным изменением климата в районе Республики Саха (Якутия) // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 6. С. 621–636. DOI: 10.7868/S0321059614030092.
- Кучмент Л.С., Мотовилов Ю.Г., Назаров Н.А. Чувствительность гидрологических систем. М.: Наука, 1990. 144 с.
- Магрицкий Д.В. Антропогенные воздействия на сток рек, впадающих в моря Российской Арктики // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. № 1. С. 3–16.
- Магрицкий Д.В., Поваляникова Е.С., Фролова Н.Л. История изучения стока воды и водного режима рек Арктической зоны России в XX в. и начале XXI в. // Арктика и Антарктика. 2019. № 3. С. 61–96. DOI: 10.7256/2453-8922.2019.3.29939.
- Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Российская академия наук, 2018. 296 с.
- Соколов О.В., Ушаков М.В. Учет климатических изменений при прогнозировании притока воды в Колымское водохранилище на май // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2012. № 566. С. 289–297.
- Тепловодообмен в мерзлотных ландшафтах Восточной Сибири и его факторы / отв. ред. А.Г. Георгиади, А.Н. Золотокрылин. М.: Триада, 2007. 576 с.
- Ушаков М.В. Влияние Колымской ГЭС и климатических изменений на гидрологический режим р. Колыма // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2013. № 2. С. 20–24.
- Ушаков М.В., Лебедева Л.С. Климатические изменения режима формирования притока воды в Колымское водохранилище // Научные ведомости БелГУ. Сер. Естественные науки. 2016. Т. 25. № 246. С. 120–127.
- Dai A., Luo D., Song M., Liu J. Arctic amplification is caused by sea-ice loss under increasing CO₂, *Nature Communications*, 2019, vol. 10, no. 1, p. 121, DOI: 10.1038/s41467-018-07954-9.
- Gelfan A., Gustafsson D., Motovilov Yu. et al. Climate change impact on the water regime of two great Arctic rivers: modeling and uncertainty issues, *Clim. Change*, 2017, vol. 141, p. 499–515, DOI: 10.1007/s10584-016-1710-5.
- Gelfan A., Motovilov Y., Krylenko I. et al. Testing the robustness of the physically-based ECOMAG model with respect to changing conditions, *Hydrological Sciences Journal*, 2014, vol. 60, no. 7–8, p. 1266–1285, DOI: 10.1080/02626667.2014.935780.
- Gottschalk L., Beldring S., Engeland K. et al. Regional/mesoscale hydrological modelling: A Scandinavian experience, *Hydrological Sciences Journal*, 2001, no. 46, p. 963–982, DOI: 10.1080/02626660109492889.
- Krylenko I., Motovilov Y., Antokhina E. et al. Physically-based distributed modelling of river runoff under changing climate conditions, *IAHS-AISH Proceedings and Reports*, 2015, vol. 368, p. 156–161, DOI: 10.5194/pi-ahs-368-156-2015.

- Kuchment L.S., Gelfan A.N., Demidov V.N. A distributed model of runoff generation in the permafrost regions, *Journal of Hydrology*, 2000, vol. 240, no. 1–2, p. 1–22, DOI: 10.1016/S0022-1694(00)00318-8.
- Lebedeva L., Makarieva O., Vinogradova T. Analysis of spatial variability of river streamflow at the catchment area of the Kolyma reservoir, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 321, no. 1, p. 012022, DOI: 10.1088/1755-1315/321/1/012022.
- Magritsky D.V., Frolova N.L., Evstigneev V.M. et al. Long-term changes of river water inflow into the seas of the Russian Arctic sector, *Polarforschung*, 2018, vol. 87, no. 2, p. 177–194, DOI: 10.2312/polarforschung.87.2.177.
- Majhi I., Yang D. Streamflow characteristics and changes in Kolyma basin in Siberia, *Journal of Hydro-meteorology*, 2008, vol. 9, no. 2, p. 267–279, DOI: 10.1175/2007jhm845.1.
- Motovilov Y., Gottschalk L., Engeland K., Rodhe A. Validation of a distributed hydrological model against spatial observations, *Agric. For. Meteorol.*, 1999, no. 98–99, p. 257–277, DOI: 10.1016/S0168-1923(99)00102-1.
- Motovilov Y., Gelfan A. Assessing runoff sensitivity to climate change in the Arctic basin: empirical and modelling approaches, *IAHS-AISH Proceedings and Reports*, 2013, vol. 360, p. 105–112.
- Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models, pt I, A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 1970, vol. 10, no. 3, p. 282–290.
- Yang D., Kane D.L. Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems, Cham., Springer, 2021, 914 p., DOI: 10.1007/978-3-030-50930-9.
- Электронные ресурсы*
 Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения 01.07.2023).
 АО Усть-Среднеканская ГЭС им. А.Ф. Дьякова: URL: <http://www.usges.rushydro.ru/> (дата обращения 01.07.2023).
 Научно-популярная энциклопедия «Вода России». URL: https://water-ru.ru/Водные_объекты/434/Колыма (дата обращения 01.07.2023).
 CALM Program Description, URL: <https://www2.gwu.edu/~calm/about/program.html> (дата обращения 01.07.2023).
 GlobSnow, Finnish meteorological institute, ESA, URL: <http://www.globsnow.info/> (дата обращения 01.07.2023).

Поступила в редакцию 03.09.2023

После доработки 15.12.2023

Принята к публикации 14.02.2024

SENSITIVITY OF THE KOLYMA RIVER RUNOFF TO MODERN CLIMATE CHANGE

A.A. Lisina¹, A.A. Sazonov², N.L. Frolova³, I.N. Krylenko⁴, Yu.G. Motovilov⁵

^{1–4}Lomonosov Moscow State University, Department of Land Hydrology

^{1,2,4,5}Water Problem Institute of the Russian Academy of Science, Laboratory of Regional Hydrology

¹Postgraduate student; e-mail: lisanastya99@mail.ru

²Senior Lecturer, Ph.D. in Geography; e-mail: sazonov.lesha@gmail.com

³Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: frolova_nl@mail.ru

⁴Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: krylenko_i@mail.ru

⁵Chief Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: motol49@yandex.ru

The Kolyma River is a large river in the continuous permafrost zone. Its basin is subject to significant climatic changes. An information-modeling complex ECOMAG is employed for the study of water regime features and dynamics. ECOMAG calculates daily water flow rates at specified points based on meteorological data with a one-day resolution.

This study analyzes the actual dynamics of water runoff and runoff-forming factors during the period from 1979 to 2013. A physical-mathematical model is adapted for the Kolyma River basin. Furthermore, the study examines the sensitivity of water regime characteristics to changing climate parameters.

Calibration and verification demonstrated the ECOMAG's ability to accurately reproduce observed water discharges for two points on the Kolyma River and the satisfactory performance on its tributary, the Bolshoy Anyui River. The ECOMAG model was for the first time employed for the Kolyma River basin, thus allowing the investigation of climate-related runoff changes. The preliminary statistical analysis revealed that if the average hydrological characteristics in the Kolyma River basin from 2000 to 2013 are compared with those from 1979 to 1999 a 5,1% rise of annual river runoff is evident for the Kolymskoye river section 283 km upstream the Kolyma River mouth (from 99,4 km³ in 1979–1999 up to 104,5 km³ in 2000–2013). The ECOMAG model also effectively captures changes in the annual water runoff and its intra-annual distribution.

A rise in the mean annual air temperature by 1,3°C is characteristic of the modern time period. According to weather station data, the air temperature in March, April, November, and December increased by more

than 2,5°C. The total annual precipitation increased by 8,3%, with September and March experiencing the most pronounced growth.

To gain a more comprehensive understanding of the mechanisms governing the Kolyma River's response to climate changes, the sensitivity of water runoff characteristics to air temperature and precipitation changes was analyzed using the ECOMAG model to generate artificial meteorological data series. The study demonstrates that water discharge is more sensitive to a 5% increase in precipitation than to a 1°C rise in air temperature.

Keywords: the Kolyma River, ECOMAG, hydrological regime, runoff sensitivity, climate change

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project 24-17-00084). The data were partly collected and processed under the state task theme FMWZ-2022-0001 of the WPI RAS, the assessment of runoff sensitivity was carried out under the state task theme FMWZ-2022-0003 of the WPI RAS.

REFERENCES

- Alekseevsky N.I., Magritskiy D.V., Mikhailov V.N. Antropogennyye i estestvennyye izmeneniya gidrologicheskikh ogranicheniy dlya prirodopol'zovaniya v del'tah rek Rossijskoj Arktiki [Anthropogenic and natural changes in hydrological restrictions for nature management in the deltas of the rivers of the Russian Arctic], *Vodnoe hozyajstvo Rossii*, 2015, no. 1, p. 14–31. (In Russian)
- Dai A., Luo D., Song M., Liu J. Arctic amplification is caused by sea-ice loss under increasing CO₂, *Nature Communications*, 2019, vol. 10, no. 1, p. 121, DOI: 10.1038/s41467-018-07954-9.
- Gelfan A., Gustafsson D., Motovilov Yu., Arheimer B., Kalugin A., Krylenko I., Lavrenov A. Climate change impact on the water regime of two great Arctic rivers: modeling and uncertainty issues, *Clim. Change*, 2017, V. 141, p. 499–515, DOI: 10.1007/s10584-016-1710-5.
- Gelfan A., Motovilov Y., Krylenko I., Moreido V., Zakharova E. Testing the robustness of the physically-based ECOMAG model with respect to changing conditions, *Hydrological Sciences Journal*, 2014, vol. 60, no. 7–8, p. 1266–1285, DOI: 10.1080/02626667.2014.935780.
- Gelfan A.N., Frolova N.L., Magritskiy D.V., Kireeva M.B., Grigoriev V.Yu., Motovilov Yu.G., Gusev E.M. Vliyanie izmeneniya klimata na godovoj i maksimal'nyj stok rek Rossii: oценка i prognoz [The impact of climate change on the annual and maximum flow of Russian rivers: assessment and forecast], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2021, vol. 7, no. 1, p. 36–79, DOI: 10.21513/2410-8758-2021-1-36-79. (In Russian)
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Milyukova I.P. et al. *Scenarnaya oценка veroyatnykh izmenenij rechnogo stoka v bassejnakh krupnejshikh rek Rossii* [Scenarios of possible river runoff changes in the basins of the largest rivers of Russia], chast' 1, Bassejn reki Leny, Moscow, Maks Press, 2011. 179 p. (In Russian)
- Glotov V.E., Glotova L.P. Izmeneniya resursov presnykh prirodnykh vod v gornyx rajonax kriolitozony pri global'nom potepnenii klimata (na primere severo-vostoka Rossii) [Changes of fresh natural water resources in mountain areas of cryolithozone at global climate warming (on the example of North-East of Russia)], *Vodnye Resursy*, 2011, no. 1, p. 1408–1412. (In Russian)
- Gottschalk L., Beldring S., Engeland K. et al. Regional/mesoscale hydrological modelling: A Scandinavian experience, *Hydrological Sciences Journal*, 2001, no. 46, p. 963–982, DOI: 10.1080/02626660109492889.
- Gusev E.M., Nasonova O.N., Jogan L.Ya., Aizel G.V. Scenario prediction of changes in water balance components of the Olenek and Indigirka rivers in the context of possible climate change in the region of the Republic of Sakha, *Water Resources*, 2014, vol. 41, no. 6, p. 748–762, DOI: 10.7868/S0321059614030092.
- Krylenko I., Motovilov Y., Antokhina E. et al. Physically-based distributed modelling of River runoff under changing climate conditions, *IAHS-AISH Proceedings and Reports*, 2015, no. 368, p. 156–161, DOI: 10.5194/pi-ahs-368-156-2015.
- Kuchment L.S., Gelfan A.N., Demidov V.N. A distributed model of runoff generation in the permafrost regions, *Journal of Hydrology*, 2000, vol. 240, no. 1–2, p. 1–22, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00318-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00318-8).
- Kuchment L.S., Motovilov Yu.G., Nazarov N.A. *Chuvstvitel'nost' gidrologicheskikh sistem* [Sensitivity of hydrological systems], Moscow, Nauka Publ., 1990, 144 p. (In Russian)
- Lebedeva L., Makarieva O., Vinogradova T. Analysis of spatial variability of river streamflow at the catchment area of the Kolyma reservoir, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 321, no. 1, p. 012022, DOI: 10.1088/1755-1315/321/1/012022.
- Magritskiy D.V., Povalishnikova E.S., Frolova N.L. Istoriya izucheniya stoka vody i vodnogo rezhima rek Arkticheskoy zony Rossii v XX v. i nachale XXI v. [History of the study of water flow and water regime of the rivers of the Arctic zone of Russia in the XX century and the beginning of the XXI century], *Arktika i Antarktika*, 2019, no. 3, p. 61–96, DOI: 10.7256/2453-8922.2019.3.29939. (In Russian)
- Magritskiy D.V. Anthropogenic Impact on the Runoff of Russian Rivers Emptying into the Arctic Ocean, *Water Resources*, 2008, vol. 35, no. 1, p. 3–16.
- Magritskiy D.V., Frolova N.L., Evstigneev V.M. et al. Long-term changes of river water inflow into the seas of the Russian Arctic sector, *Polarforschung*, 2018, vol. 87, no. 2, p. 177–194, DOI: 10.2312/polarforschung.87.2.177.
- Majhi I., Yang D. Streamflow characteristics and changes in Kolyma basin in Siberia, *Journal of Hydrometeorology*, 2008, vol. 9, no. 2, p. 267–279, DOI:10.1175/2007jhm845.1.
- Motovilov Y., Gelfan A. Assessing runoff sensitivity to climate change in the Arctic basin: empirical and modelling approaches, *IAHS-AISH Proceedings and Reports*, 2013, no. 360, p. 105–112.

- Motovilov Y., Gottschalk L., Engeland K., Rodhe A. Validation of a distributed hydrological model against spatial observations, *Agric. For. Meteorol.*, 1999, no. 98–99, p. 257–277, DOI: 10.1016/S0168-1923(99)00102-1.
- Motovilov Yu.G., Gelfan A.N. *Modeli formirovaniya stoka v zadachah gidrologii rechnyh bassejnov* [Models of flow formation in the problems of hydrology of river basins], Moscow, Russian Academy of Sciences, 2018, 296 p. (In Russian)
- Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models, pt I, A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 1970, vol. 10, no. 3, p. 282–290.
- Sokolov O.V., Ushakov M.V. [Consideration of climatic changes in forecasting the inflow of water to the Kolyma reservoir in May], *Trudy Glavnoj geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voejkova* [Proceedings of the Main Geophysical Observatory named after A.I. Voeikov], 2012, no. 566, p. 289–297. (In Russian)
- Teplovodoobmen v merzlotnykh landshaftakh Vostochnoj Sibiri i ego faktory* [Heat and water exchange in permafrost landscapes of the Eastern Siberia and its factors], A.G. Georgiadi, A.N. Zolotokrylin, Moscow, Triada Publ., 2007, 576 p. (In Russian)
- Ushakov M.V. Vliyanie Kolymskoj GES i klimaticheskikh izmenenij na gidrologicheskij rezhim r. Kolyma [The influence of the Kolyma HPP and climate changes on the hydrological regime of the Kolyma River], *Vestnik SVNC DVO RAN*, 2013, no. 2, p. 20–24. (In Russian)
- Ushakov M.V., Lebedeva L.S. Klimaticheskie izmeneniya rezhima formirovaniya pritoka vody v Kolymskoe vodoxranilishhe [Climatic changes in the regime of formation of water inflow into the Kolyma reservoir], *Nauchnye vedomosti BelGU, Ser. Estestvennye nauki*, 2016, vol. 25, no. 246, p. 120–27. (In Russian)
- Yang D., Kane D.L. *Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems*, Cham., Springer, 2021, 914 p., DOI: 10.1007/978-3-030-50930-9.
- Web sources*
- AO Ust'-Srednekanskaya GES im. A.F. D'yakova [JSC Ust-Srednekanskaya HPP named after A.F. Dyakov], URL: <http://www.usges.rushydro.ru> (access date 01.07.2023). (In Russian)
- Avtomatizirovannaya informacionnaya sistema gosudarstvennogo monitoringa vodnyh obektov (AIS GMVO) [Automated information system of state monitoring of water bodies (AIS SMWB)], URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (access date 01.07.2023). (In Russian)
- CALM Program Description, URL: <https://www2.gwu.edu/~calm/about/program.html> (access date 01.07.2023).
- GlobSnow, Finnish meteorological institute, URL: <http://www.globsnow.info/> (access date 01.07.2023).
- Nauchno-populyarnaya enciklopediya "Voda Rossii" [Popular Science Encyclopedia "Water of Russia"], URL: https://water-ru.ru/Water_objects/434/Kolyma (access date 01.07.2023). (In Russian)

Received 03.09.2023

Revised 15.12.2023

Accepted 14.02.2024

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 551.583

ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПОВЕРХНОСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ В ХОЛОДНЫЙ ПЕРИОД ГОДА

А.А. Сумкина¹, В.В. Иванов², К.К. Кивва³

^{1,3} *Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Департамент водных биоресурсов и среды их обитания, отдел динамики климата и водных экосистем*

² *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии*

¹ *Ст. специалист; e-mail: sumkinaaleksa@yandex.ru*

² *Глав. науч. сотр., д-р физ.-мат. наук; e-mail: vladimir.ivanov@aari.ru*

³ *Директор департамента, канд. геогр. наук; e-mail: kirill.kivva@gmail.com*

Исследована изменчивость суммарного теплового баланса (ТБ) Баренцева моря за холодный период года. Под холодным периодом подразумевается период выхолаживания поверхности моря (период, когда поток тепла устойчиво направлен в атмосферу). Оценивался вклад двух значимых составляющих теплового баланса (потоков явного и скрытого тепла) в наблюдающееся увеличение теплоотдачи на границе море – атмосфера за холодный период. Были использованы данные о потоках коротковолновой и длинноволновой радиации, явного и скрытого тепла из атмосферного реанализа Европейского центра по среднесрочному прогнозированию погоды ERA5. ТБ поверхности моря рассчитывался как сумма потоков коротковолновой и длинноволновой радиации, явного и скрытого тепла. Суммарный тепловой баланс, а также суммарные потоки явного и скрытого тепла за холодный период рассчитывались посредством суммирования значений между датами начала и окончания периода охлаждения. Результаты выполненных расчетов показали увеличение суммарного ТБ за холодный период года в северной части моря (до 2000 МДж/м² за 40 лет) и уменьшение в южной части моря (до 1000 МДж/м² за 40 лет). В северной части моря доля потоков явного и скрытого тепла снижается до 0,3–0,4. Наблюдаемый тренд ТБ и его турбулентных составляющих с высокой степенью вероятности объясняются возрастанием разности между температурой воздуха и температурой поверхности моря.

Ключевые слова: потоки явного и скрытого тепла, температура поверхности моря, температура воздуха, Арктика

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.10

ВВЕДЕНИЕ

Баренцево море – часть Северо-Европейского бассейна Северного Ледовитого океана, расположенное в западной части евразийского шельфа, характеризуется более теплым климатом по сравнению с другими арктическими морями, что обусловлено адвекцией тепла течениями и особенностями теплообмена с атмосферой [Калавиччи, Башмачников, 2019]. В последние десятилетия в Баренцевом море (БМ) наблюдаются значительные климатические изменения [Иванов и др., 2022; Smedsrud et al., 2013]. Тепловой баланс поверхности моря показывает, какое количество тепла было отдано или получено морем в результате взаимодействия с атмосферой [Гидрометеорология..., 1990; Тепловой баланс..., 1956]. Процесс теплообмена на поверх-

ности моря влияет на многие физические процессы в океане и атмосфере. Например, резкие колебания теплообмена между океаном и атмосферой в период охлаждения способны влиять на формирование опасных гидрометеорологических явлений, в частности на развитие полярных циклонов [Заболотских и др., 2015]. От суммарной теплоотдачи с поверхности моря в атмосферу в холодный период года зависит глубина проникновения конвекции, которая определяет особенности структуры вод и может влиять на «цветение» фитопланктона в весенний период [Кивва и др., 2020; Трофимов и др., 2018]. Ранее было показано, что на севере, северо-востоке и востоке БМ наблюдается статистически значимый отрицательный линейный тренд суммарного теплового баланса (ТБ) поверхности моря за холодный

период года порядка – 1000 (Дж/м²)/40 лет [Сумкина и др., 2022б]. То есть в этих районах в последние годы поверхность моря теряет гораздо больше тепла во время холодного периода, чем в более ранние годы. Однако причины такой закономерности требуют дополнительных исследований.

В арктических морях в связи с относительно малыми значениями радиационного баланса, особенно в период охлаждения, когда коротковолновая радиация отсутствует, турбулентный обмен между поверхностью и атмосферой играет ведущую роль в ТБ поверхности. В БМ в среднем за год более 60% теплоотдачи в атмосферу обеспечивается потоками явного и скрытого тепла [Сизов и др., 2019].

Прямых наблюдений за радиационным и турбулентным теплообменом на границе море – атмосфера для БМ немного. Инструментальные наблюдения выполняются эпизодически во время экспедиций, а регулярные измерения проводятся только в прибрежных зонах на нескольких метеостанциях [Суркова, Романенко, 2021а]. Один из немногочисленных примеров прямых наблюдений за потоками тепла в БМ в недавние годы – исследование атмосферных процессов над акваториями морей российской Арктики в рамках международного проекта NABOS (Nansen and Amundsen Basin Observation System), описанное в работе [Варенцов и др., 2016]. Использовались данные составляющих радиационного баланса, потоков тепла, влаги и импульса из экспедиций НЭС «Академик Федоров» (2013) и НЭС «Академик Трешников» (2015). Результаты показали, что турбулентные потоки тепла были значительно больше в 2015 г., чем в 2013 г. Приповерхностный слой воды в 2015 г. был в среднем на 1°С теплее, чем в 2013 г., что авторы объяснили большей продолжительностью безледного периода, благодаря чему в верхнем слое оказалось аккумулировано больше тепла. Таким образом, в БМ наблюдается значительная межгодовая изменчивость составляющих турбулентного теплообмена на границе море – атмосфера.

Поскольку количественно оценить величины потоков явного и скрытого тепла по данным прямых измерений в БМ затруднительно, ценным источником информации об изменчивости составляющих ТБ служат реанализы, в которых эти параметры оцениваются с использованием методов ассимиляции данных наблюдений (включая спутниковые) и численного моделирования. Например, в исследовании [Суркова, Романенко, 2020] выявлено, что в целом за год над всей акваторией Баренцева моря поток явного тепла направлен в атмосферу, достигает максимума у берегов Скандинавского и Кольского полуостровов, а также у берегов о. Южный архипелага Новая Земля. Это связано с тем, что через дан-

ные акватории проходит продолжение Северо-Атлантического течения (Норвежское, Нордкапское, Мурманское и другие теплые течения), и различия между температурой поверхности океана и приводного слоя атмосферы наибольшие. Наименьший поток явного тепла наблюдается над северными, покрытыми льдом районами моря. Среднегодовой поток скрытого тепла над морем также наибольший над южной, юго-западной и юго-восточной частями Баренцева моря, там, где проходит теплое течение и где большую часть года ледяной покров отсутствует [Суркова, Романенко, 2021б]. На юге поток скрытого тепла достигает 40 Вт/м² за счет частых фазовых переходов, вызванных испарением воды и таянием льдов, приносимых из Карского моря через пролив Карские ворота. Над самым севером Баренцева моря, в особенности в районе архипелага Земля Франца-Иосифа, поток скрытого тепла имеет низкие значения, близкие к нулю (до 10 Вт/м²), так как там даже в летний (теплый) период температура воздуха отрицательная, а испарение с поверхности моря – незначительно [Суркова, Романенко, 2021б].

Данная статья является продолжением исследования, в котором выявлен сдвиг даты начала нагрева в южной и юго-восточной части на более поздние сроки (4–5 дней за 10 лет), и наоборот, сдвиг на более ранние сроки в северной и северо-восточной части моря (4–5 дней за 10 лет). Для дат окончания нагрева наблюдается обратная ситуация, чем для дат начала нагрева. В южной части отмечается сдвиг на более ранние сроки (1–2 дня за 10 лет), в северной – на более поздние сроки на (4–5 дней за 10 лет). Продолжительность холодного периода (ПХП) в БМ в среднем составляет 7–8 месяцев. Вдоль побережья, в районе Мурманского мелководья и Северо-Канинской банки, ПХП составляет 210–230 дней. В районах теплых течений (Западно-Шпицбергенского, Нордкапского) ПХП выше. Коэффициент линейного тренда ПХП в северной части моря отрицательный, порядка –0,2 сут./год, но почти всюду статистически незначимый. В южной и центральной частях моря тренд ПХП положительный, около 0,2–0,3 сут./год, но также статистически незначим на большей части акватории.

Количественные оценки вклада отдельных составляющих в формирование теплообмена на поверхности океана за периоды охлаждения и нагрева важны для уточнения закономерностей формирования верхнего квазиоднородного слоя моря. Основная цель статьи – характеристика изменчивости теплоотдачи и роль составляющих теплового баланса в ней за холодный период года (период выхолаживания поверхности моря). Дополнительно проанализирована изменчивость летнего нагрева поверхности моря, поскольку количество отдаваемого морем

в атмосферу тепла за последующее охлаждение в холодный период и суммарный годовой ТБ, а также его многолетняя изменчивость могут зависеть от летнего нагрева. Оценивается вклад потоков явного и скрытого тепла в наблюдающееся в БМ увеличение суммарной теплоотдачи за холодный период года на границе море – атмосфера. Предпринята попытка выяснить, с какой именно из этих двух составляющих ТБ в большей степени связано наблюдающееся увеличение сезонной теплоотдачи.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Использованы данные потоков коротковолновой и длинноволновой радиации, явного и скрытого тепла, температуры воздуха (2 м), температуры поверхности моря и скорости ветра из атмосферного реанализа Европейского центра по среднесрочному прогнозированию погоды ERA5 (Европейский реанализ, версия 5) с горизонтальным разрешением $0,25 \times 0,25^\circ$ по широте и долготе и шагом по времени 1 час. Составляющие теплового баланса в реанализе рассчитываются по аэродинамическим балк-формулам (упрощенные объемные формулы). Анализ выполнен для интервала с 1979 по 2019 г.

ТБ поверхности моря рассчитан как сумма потоков коротковолновой и длинноволновой радиации, явного и скрытого тепла. Данные были осреднены

посуточно. Тепловой баланс сглажен 30-дневным скользящим средним. Даты перехода ТБ через ноль для каждого периода определены следующим образом: выбраны те даты, после которых продолжительность периода с положительным / отрицательным тепловым балансом была наибольшей. Даты перехода ТБ через ноль приняты за границы теплового и холодного периодов года. Рассчитана сумма ТБ, а также потоки явного и скрытого тепла за теплый и холодный периоды каждого года (ΣP и ΣLE). Сумма ТБ за холодный период имеет отрицательный знак, а ее модуль отражает сезонную теплоотдачу с поверхности моря (выхолаживание поверхности).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Тепловой баланс поверхности моря в теплый и холодный периоды года. Для характеристики пространственной изменчивости нагрева и охлаждения поверхности моря рассчитано среднее значение суммы ТБ за 40 теплых и холодных периодов (рис. 1). В теплый период суммарный ТБ поверхности моря севернее 76° с. ш. в среднем распределен зонально, а южнее 76° с. ш. наблюдается нарушение зональности (секторность), связанное, по всей видимости, с действием течений и близостью материка (см. рис. 1, А).

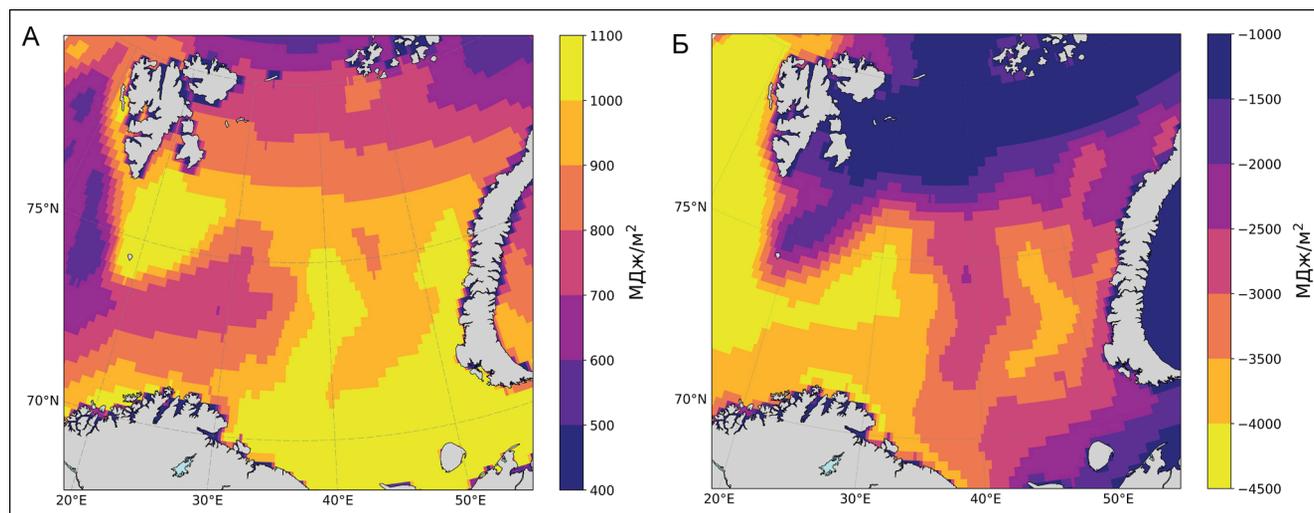


Рис. 1. Средняя сумма теплового баланса поверхности моря за теплый (А) и холодный (Б) периоды 1979–2019 гг.

Fig. 1. Average sum of the sea surface heat balance for the warm (A) and cold (B) periods of year for 1979–2019

Максимальные значения суммы ТБ (1100 МДж/м^2) расположены вдоль пути следования южной ветви Нордкапского течения, в районе Мурманского мелководья, Северо-Канинской и Гусиной банок. Такие же высокие значения наблюдаются в районе Шпицбергенской банки, где протекает холодное Восточ-

но-Медвежинское течение. В северной части моря, где доминирует арктическая холодная водная масса, сумма ТБ поверхности моря за теплый период в среднем составляет от 700 до 800 МДж/м^2 .

В холодный период года на всей акватории моря наблюдается теплоотдача с поверхности. Простран-

ственное распределение суммы ТБ поверхности моря (см. рис. 1, Б) соответствует траектории переноса атлантических вод, включая максимумы над центральной ветвью Нордкапского течения и Западно-Новоземельским течением, а также локальный минимум над Центральной банкой (75° с. ш., 38° в. д.), который связан с формированием в этом районе купола плотных холодных вод в период выхолаживания [Ivanov, Tuzov, 2021]. Средняя сумма ТБ за холодный период уменьшается с юга на север. Максимальная по абсолютной величине средняя сумма ТБ в холодный период наблюдается в проливе Фрама (–4500 МДж/м²). В Баренцевом море максимальная абсолютная величина суммы ТБ наблюдается в районе центральной ветви Нордкапского течения: 72–73° с. ш., 20–30° в. д. (значения в интервале от –4500 до –4000 МДж/м²). Несколько ниже абсолютные значения данного параметра в районе южной ветви Нордкапского течения (от –4000 до –3500 МДж/м²). Высокие по абсолютной величине значения суммы ТБ наблюдаются также вдоль траектории теплого Новоземельского течения (от –4000 до –3000 МДж/м²). Однако в районе Центрального желоба наблюдается заметное понижение средней теплоотдачи в холодный период (сумма ТБ за период до –3000 МДж/м²) в сравнении

с соседними районами. В районе Шпицбергенской банки отмечается высокий градиент средней суммы ТБ и существенно менее высокие значения, чем в соседнем районе между островом Медвежий и мысом Нордкап. В этом районе сумма ТБ за холодный период составляет до –2000 МДж/м². Вероятно, такие отличия связаны с действием холодного Восточно-Шпицбергенского течения. В районе положения полярного фронта (76–77° с. ш., 20–55° в. д.) [Трофимов и др., 2018] наблюдается максимальный градиент суммы теплового баланса за холодный период. На севере Баренцева моря, где последние 40 лет наблюдается сезонный морской лед, отмечается минимальная абсолютная величина суммы ТБ (от –1500 до –1000 МДж/м²).

Максимальная по абсолютной величине теплоотдача наблюдается вдоль западного побережья архипелага Шпицберген (2500–3000 МДж/м²). В районе поступления атлантических вод, между мысом Нордкап и островом Медвежий, теплоотдача с поверхности моря в холодный период составляет в среднем от 1500 до 2500 МДж/м², а в районе Шпицбергенской банки – 1000–1500 МДж/м², в отдельные годы, например в 2012 г., – от 1500 до 2000 МДж/м². Некоторые статистические параметры для характерных районов приведены в таблице.

Таблица

Статистики суммы теплового баланса за холодный период года (теплоотдача с поверхности моря, МДж/м²) в контрольных точках

Координаты	Среднее	СКО	Минимум (год)	Максимум (год)
73° с.ш. 30° в.д.	–3924,5	396,7	–4787,2 (1980)	–3190,4 (1984)
75° с.ш. 40° в.д.	–2601,5	410,7	–3304,7 (1992)	–1501,9 (1981)
76° с.ш. 50° в.д.	–2627,8	654,6	–3626,2 (2001)	–1157,7 (1981)

В целом минимальная теплоотдача с поверхности моря за холодный период наблюдалась в начале 1980-х гг. Максимальные значения выхолаживания наблюдались в 1980, 1992 и 2001 гг.

Коэффициент линейного тренда теплоотдачи с поверхности моря. Для характеристики долгопериодной изменчивости рассчитаны коэффициенты линейного тренда суммы ТБ за теплый и холодный периоды в Баренцевом море за 40 лет (рис. 2).

Коэффициент линейного тренда суммы ТБ за теплый период года отрицательный в южной, юго-западной, центральной части моря (рис. 2, А). Положительный тренд – в северной, северо-западной части моря. Минимальный значимый тренд наблюдается в районе Западного и Центрального желобов, вдоль западного побережья архипелага Шпицберген (до –500 МДж/м² за 40 лет). На всей остальной южной и центральной части акватории линейный тренд

не значим и составляет от –100 до –400 МДж/м² за 40 лет. В проливе между архипелагами Шпицберген и Земля Франца-Иосифа, а также в районе возвышенности Персея линейный тренд не значим и составляет от 0 до 200 МДж/м² за 40 лет. Наиболее высокий значимый положительный линейный тренд суммы ТБ за теплый период наблюдается в районе между архипелагами Земля Франца-Иосифа и Новая Земля (от 200 до 300 МДж/м² за 40 лет).

Выявлено статистически значимое ($p < 0,05$) увеличение теплоотдачи в холодный период года на части акватории Баренцева моря. В северной и восточной частях Баренцева моря преобладают отрицательные статистически значимые величины коэффициента линейного тренда суммы ТБ за холодный период (см. рис. 2, Б). То есть там наблюдается увеличение количества тепла, отдаваемого океаном в атмосферу в холодный период. В южной и юго-за-

падной части преобладают положительные, но, за исключением нескольких относительно небольших участков к востоку от острова Медвежьего, статистически незначимые величины коэффициента линейного тренда суммы ТБ в холодный период. В районе возвышенности Персея, желоба Франц-Виктории, между архипелагами Новая Земля и Земля Франца-Иосифа отмечается тренд на увеличение теплоотдачи на 500–2000 МДж/м² за 40 лет в холодный период. Максимальное увеличение теплоотдачи с поверхности моря выявлено в проливе между архипелагами Новая Земля и Земля Франца-Иосифа. В районе Новоземельской банки тренд увеличения теплоотдачи с поверхности моря составляет 500–1000 МДж/м² за 40 лет. В южной и центральной частях моря отмечается уменьшение теплоотдачи в холодный период за ис-

следуемый ряд лет. В районе Шпицбергенской банки тренд показывает уменьшение теплоотдачи с поверхности моря на величину до 1000 МДж/м² за 40 лет. В районе между островом Медвежьим и мысом Нордкап коэффициент линейного тренда суммы ТБ за холодный период положительный (до 500 МДж/м² за 40 лет), что говорит об уменьшении теплоотдачи за холодный период года.

В районе Мурманского мелководья и Северо-Канинской банки также наблюдаются положительные, но статистически незначимые величины тренда ($p > 0,05$). В районе положения средней за 40 лет кромки льда [Сумкина и др., 2022a] коэффициент линейного тренда теплового баланса в холодный период отрицателен и близок к 0, однако также статистически не значим.

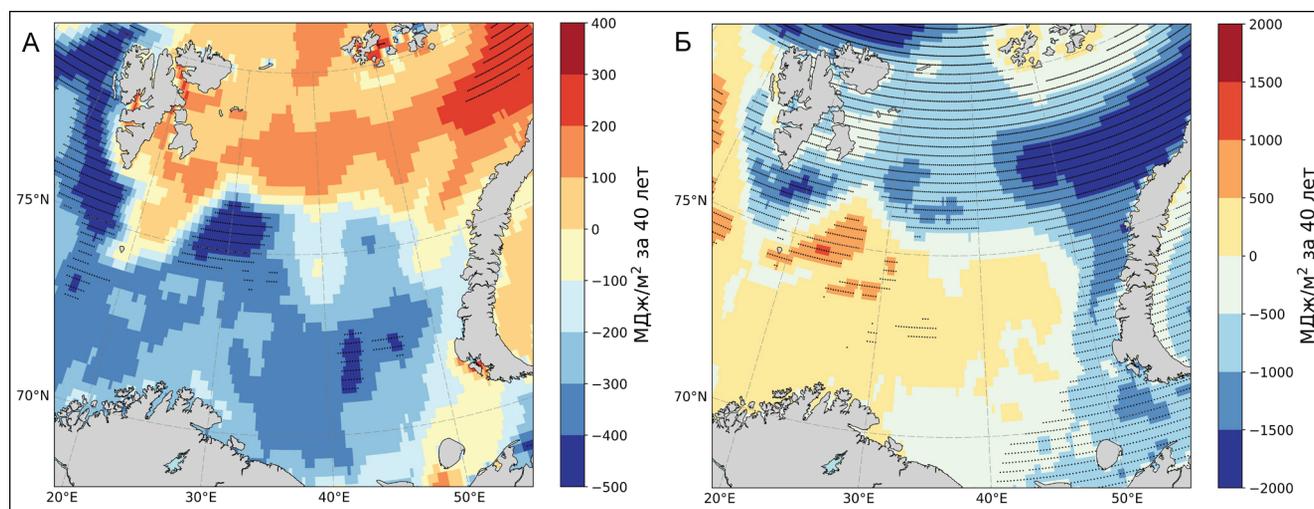


Рис. 2. Коэффициент линейного тренда суммы ТБ поверхности моря за теплый (А) и холодный (Б) периоды 1979–2019 гг. Точками отмечены узлы сетки с $p < 0,05$

Fig. 2. Linear trend of seasonal sum of sea surface heat balance for the warm (A) and cold (B) periods of the year, for time interval from 1979 to 2019. Dots mark grid nodes with $p < 0,05$

В южной, юго-западной и центральной частях моря в теплый период года отмечается уменьшение поступления тепла из атмосферы к поверхности моря, но также уменьшение теплоотдачи в атмосферу в холодный период. В северной и северо-восточной частях моря в теплый период отмечается увеличение поступления тепла из атмосферы к поверхности моря, но также наблюдается увеличение теплоотдачи в атмосферу в холодный период.

Сумма потоков явного и скрытого тепла за холодный период года. На рис. 3 представлен ход суммы теплового баланса, а также сумм потоков скрытого ($\sum LE$) и явного тепла ($\sum P$) за холодный период года в контрольных точках. Наибольшие значения всех этих величин наблюдаются в южной части БМ, где протекает теплое Нордкапское течение (см. рис. 3, А).

Наименьшие значения суммы потоков скрытого и явного тепла в период охлаждения наблюдаются в северной части моря. Согласно [Репина и др., 2011] потоки скрытого и явного тепла минимальны над толстым и в особенности над многолетним льдом, который характерен для северных районов моря (см. рис. 3, В).

Низкие средние за 40 лет значения $\sum P$ в пределах рассматриваемой акватории отмечаются в районе банки Тромсе и разреза мыс Нордкап – остров Медвежий (от –2000 до –1500 МДж/м²), а максимальное – в северной части моря, а также в районе желоба Франц-Виктория (от –500 до 0 МДж/м²). Абсолютный минимум $\sum P$ отмечается вдоль западного побережья архипелага Шпицберген (от –3000 до –2500 МДж/м²). В районе Центральной возвы-

шенности среднее значение $\sum P$ за исследуемый интервал составляет от -1000 до -500 МДж/м². В районе Западного и Центрального желобов – от -1800 до -1600 МДж/м². Вдоль Новоземельской банки и акватории северного побережья архипелага Новой Земли – от -1100 до -600 МДж/м².

Коэффициент линейного тренда суммы потоков явного тепла за холодный период с 1979 по 2019 г. показывает тенденцию на увеличение отдачи тепла морем за счет явного теплообмена в северной и северо-восточной частях моря. В проливе между архипелагами Новая Земля и Земля Франца-Иосифа линейный тренд явного теплообмена составил около 1200 МДж/м² за 40 лет. В районе возвышенности Персея линейный тренд близок к 0. В южной и юго-западной части моря отдача тепла морем в атмосфе-

ру за счет явного теплообмена наоборот уменьшается на величину 500 – 1000 МДж/м² за 40 лет.

Низкие средние значения $\sum LE$ за 40 лет в пределах рассматриваемой акватории отмечаются в южной и юго-западной частях моря (от -2000 до -1500 МДж/м²), а максимальные – в северной части, в районе желоба Франц-Виктория (от -250 до 0 МДж/м²). Абсолютный минимум $\sum LE$ отмечается вдоль границы с Норвежско-Гренландским бассейном (от -3000 до -2500 МДж/м²). В районе Центральной возвышенности среднее значение за исследуемый интервал лет составляет от -1300 до -800 МДж/м². В районе Западного и Центрального желобов – от -1600 до -1300 МДж/м². Вдоль Новоземельской банки и акватории северного побережья архипелага Новой Земли – от -800 до -500 МДж/м².

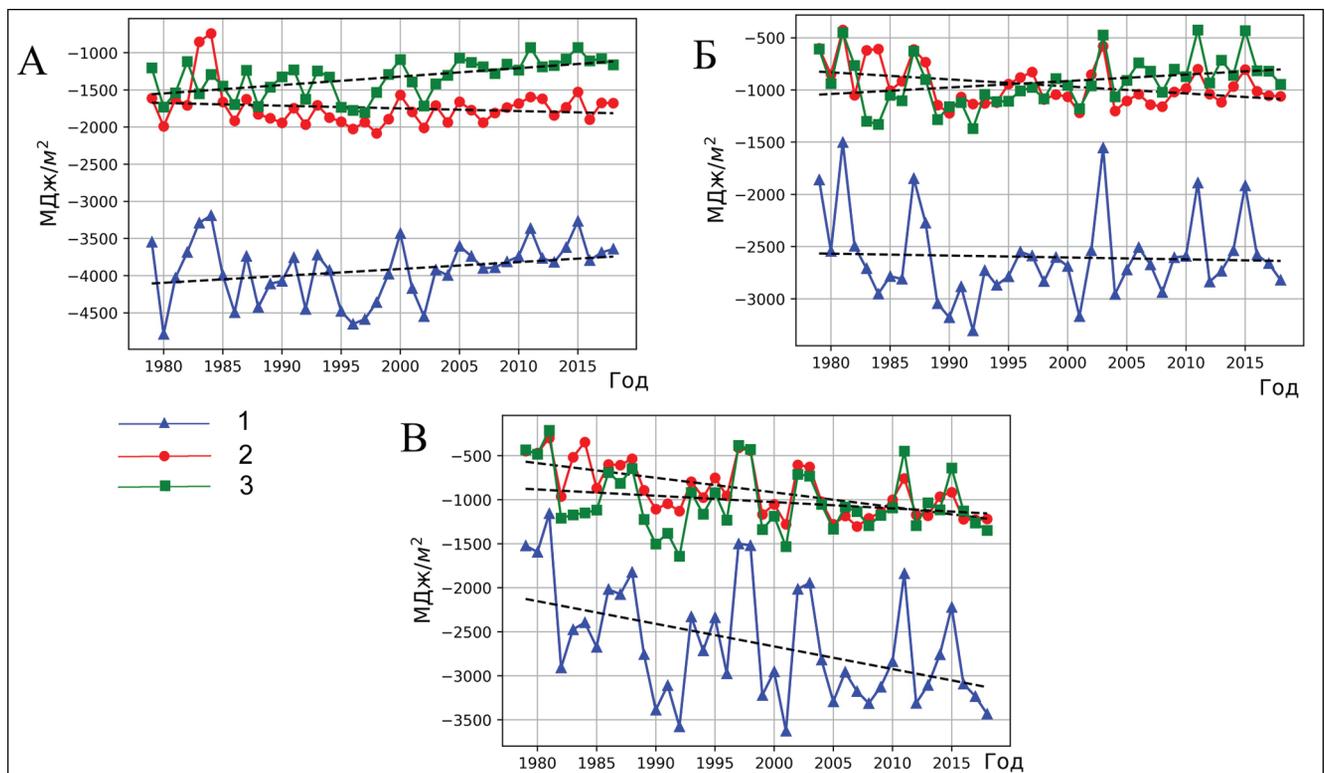


Рис. 3. Суммы теплового баланса (1), потока скрытого тепла (2) и потока явного тепла (3) за холодный период года для контрольных точек: А – 73° с. ш., 30° в. д.; Б – 75° с. ш., 40° в. д.; В – 76° с. ш., 50° в. д.

Fig. 3. Time-series of sum of surface heat balance (1), sum of latent heat flux (2) and sum of sensible heat flux (3) for the cold period of the year for control points: А – 73° N, 30° E; Б – 75° N, 40° E; В – 76° N, 50° E

Коэффициент линейного тренда суммы потока скрытого тепла за холодный период с 1979 по 2019 г. на всей исследуемой акватории за исключением юго-восточного района имеет отрицательные значения. То есть теплоотдача с поверхности моря за счет испарения в целом увеличивается год от года. Максимальный отрицательный линейный тренд $\sum LE$ отмечается в проливе между архипелагами Новая Земля и Земля Франца-Иосифа и составляет от -1000 до

-800 МДж/м² за 40 лет. В районе Центрального желоба линейный тренд $\sum LE$ составляет от -400 до -200 МДж/м² за 40 лет. В районе поступления атлантических вод, между островом Медвежий и мысом Нордкап, линейный тренд $\sum LE$ близок к 0. Только в районе Шпицбергенской банки линейный тренд $\sum LE$ положительный и составляет 200 МДж/м² за 40 лет. В северо-восточной и северной частях моря тренд $\sum LE$ составляет около 300 МДж/м² за 40 лет.

Согласно представленным результатам, теплоотдача с поверхности моря в холодный период года за последние 40 лет значительно увеличилась в северной и уменьшилась в южной части моря. Максимальное увеличение теплоотдачи в холодный период с поверхности моря составляет в среднем 2000 МДж/м^2 за 40 лет и наблюдается в районе действия холодных течений Макарова и Центрального, а также в зоне преобладания арктических водных масс (см. рис. 3В). В этих же районах в теплый период также наблюдается увеличение поступления тепла из атмосферы на $100\text{--}300 \text{ МДж/м}^2$ за 40 лет. Уменьшение теплоотдачи в атмосферу с поверхности моря на величину порядка 500 МДж/м^2 за 40 лет наблюдается в районе Нордкапского течения, где выделяются атлантические водные массы. В этом же районе в теплый период года также наблюдается уменьшение поступления тепла из атмосферы на $100\text{--}300 \text{ МДж/м}^2$ за 40 лет. Разница между суммой теплового баланса за холодный период и суммой за теплый период в среднем по всей акватории составляет $1000\text{--}1500 \text{ МДж/м}^2$. То есть с поверхности Баренцева моря за холодный период отдается тепла в среднем в 1,5–2 раза больше, чем поступает летом. Это означает, что в последние 40 лет возросла роль Баренцева моря как энергоактивной зоны, обеспечивающей перекачку тепла из океана в атмосферу, что противоположно выводу об ослаблении роли Баренцева моря как «климатического холодильника» (cooling machine) [Skagseth et al., 2020]. Подобное расхождение, вероятно, связано с тем, что в процитированной выше статье рассматривался только летне-осенний сезон, в который, как показано в данной статье, наблюдается увеличение поступление тепла из атмосферы в океан.

Установлено, что значительный вклад в изменчивость теплоотдачи в холодный период года вносит турбулентный теплообмен. Доля $\sum P$ от интегральной теплоотдачи в холодный период в районе Центральной возвышенности составляет 0,3–0,4, а в районе Шпицбергенской банки и в проливе между архипелагами Земля Франца-Иосифа и Шпицберген – 0,1–0,2. По всей акватории Баренцева моря наблюдается положительный линейный тренд доли $\sum P$ в интегральной теплоотдаче. Максимальный линейный тренд этой доли наблюдается в северо-восточной части моря и составляет 0,32 за 40 лет. Возможное объяснение выявленной закономерности заключается в устойчивом отступании границы зимнего ледяного покрова к северу в этой части моря, что ведет к повышению температуры в Западно-Новоземельском течении и за счет этого к возрастанию теплоотдачи в холодный период в этом районе [Lind et al., 2018]. За десятилетие (1998–2008) сокращение годовой площади морского льда составило

$218 \times 10^3 \text{ км}^2$, или близко к 50% [Arthun et al., 2012]. С 1979 г., когда началось непрерывное спутниковое зондирование ледяного покрова, площадь арктического морского льда в сентябре (месяц климатологического минимума площади морского льда) сокращалась примерно на 11% за десятилетие, а в начале XXI в. темпы сокращения ускорились [Семенов и др., 2017]. Косвенно этот тезис подтверждается тем, что в районах, где заметных изменений ледовых условий не произошло, возрастание вклада $\sum P$ в интегральную теплоотдачу в разы меньше. Например, над Центральной возвышенностью доля $\sum P$ в интегральной теплоотдаче увеличилась на 0,16 за 40 лет, а в южной и юго-западной частях моря – всего на 0,08. Тренды доли $\sum LE$ в интегральной теплоотдаче также согласуются со сформулированным выше объяснением: в северной части моря наблюдается положительный линейный тренд доли $\sum LE$, а в центральной и южной – отрицательный. При этом максимальный положительный тренд доли $\sum LE$ в интегральной теплоотдаче наблюдается там же, где наблюдается максимальный положительный тренд доли $\sum P$ – в северо-восточной части моря, где величина этого тренда составляет 0,6 за 40 лет, тогда как над Шпицбергенской банкой и в южной-юго-западной частях моря этот тренд отрицателен и составляет $-0,4$ и $-0,03$ за 40 лет соответственно.

Расчеты показали, что линейный тренд доли турбулентного теплообмена ($\sum P + \sum LE$) в общем теплообмене за холодный период года на акватории Баренцева моря положительный в северной и северо-восточной частях моря. В южной, юго-восточной и центральной частях моря линейный тренд близок к 0.

Для выявления причин межгодовой изменчивости выхолаживания поверхности моря выполнен анализ тенденций в сумме величин отдельных составляющих теплового баланса за период охлаждения. Анализ показал, что в северной и северо-восточной частях моря отдача тепла за счет явного теплообмена увеличивается (коэффициент линейного тренда суммы потока явного тепла за период охлаждения поверхности составил $-500\text{--}1500 \text{ МДж/м}^2$ за 40 лет). В южной и юго-западной частях моря наблюдается обратная тенденция: отдача тепла в период охлаждения поверхности постепенно уменьшается (коэффициент линейного тренда суммы потока явного тепла за период охлаждения положительный, $500\text{--}1000 \text{ МДж/м}^2$ за 40 лет). При этом теплоотдача за счет потока скрытого тепла почти на всей акватории моря увеличивается (коэффициент линейного тренда суммы потока скрытого тепла за период охлаждения на большей части акватории составляет $-200\text{--}800 \text{ МДж/м}^2$ за 40 лет). То есть на севере и северо-востоке моря тенденции этих двух составля-

ющих имеют одинаковый знак, а в южной и юго-западной части моря они разнонаправленны, но преобладает рост теплоотдачи за счет явного потока тепла.

Величины явного и скрытого турбулентного теплообмена зависят от разности температуры поверхности моря и приземной температуры воздуха, а также от скорости ветра. С целью оценки того, какой из этих параметров внес наибольший вклад в наблюдаемые тренды потоков тепла, была проанализирована их изменчивость на исследуемом временном интервале. Для выявления роли каждого из

этих параметров выбраны три контрольные точки (см. рис. 3) в северо-восточной, центральной и юго-западной частях моря (76° с. ш., 50° в. д.; 75° с. ш., 40° в. д.; 73° с. ш., 30° в. д.). Временная изменчивость аномалий разности приземной температуры воздуха (ПТВ) и температуры поверхности моря (ТПМ) с удаленной средней (за 40 лет) сезонной изменчивостью, сглаженная годовым скользящим средним представлена на рисунке 4. На рисунке 5 представлены временные ряды модуля скорости ветра для этих же контрольных точек.

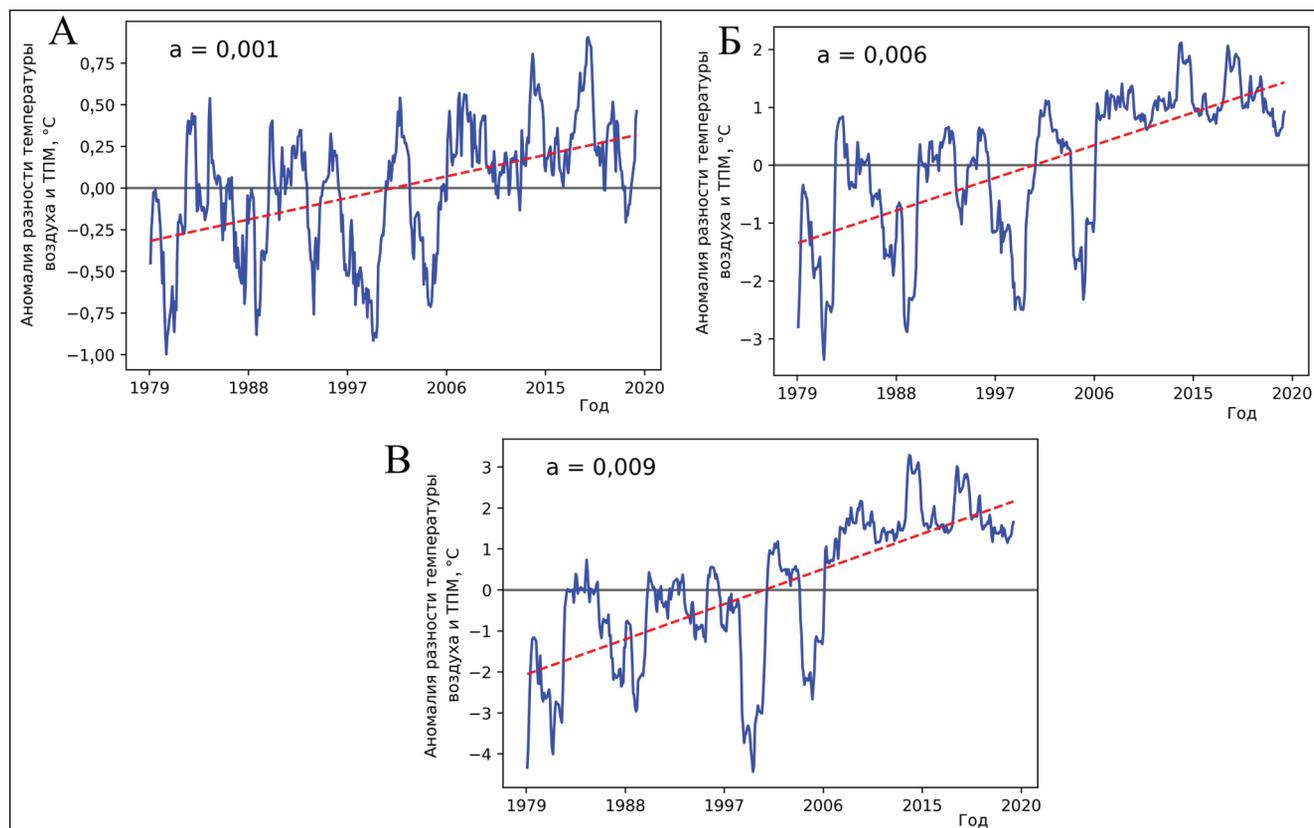


Рис. 4. Аномалии разности между температурой воздуха на 2 м и температурой поверхности моря для контрольных точек: А – 73° с. ш., 30° в. д.; Б – 75° с. ш., 40° в. д.; В – 76° с. ш., 50° в. д.

Fig. 4. Anomalies of the difference between air temperature and sea surface temperature for control points: А – 73°N , 30°E ; Б – 75°N , 40°E ; В – 76°N , 50°E

Как следует из приведенных графиков, разность аномалий ТПМ и ПТВ во всех контрольных точках имеет положительный тренд ($0,001$ – $0,009^\circ\text{C}$ за год), который обусловлен в большей степени ростом ПТВ (коэффициент линейного тренда аномалии ПТВ составляет от $0,005^\circ\text{C}$ за год в точке А до $0,012^\circ\text{C}$ за год в точке В). В контрольных точках в центральной, юго-западной, северо-восточной частях БМ коэффициент линейного тренда аномалии ТПМ составляет $0,003^\circ\text{C}/\text{год}$.

Наиболее значимое увеличение разности между ПТВ и ТПМ наблюдается в северо-восточной

части моря (на $0,009^\circ\text{C}$ за год), что позволяет обоснованно связать указанный тренд с аналогичным трендом ТБ (см. рис. 3). При этом аномалия скорости ветра во всех трех контрольных точках хоть и подвержена существенной межгодовой изменчивости, характеризуется близким к нулю коэффициентом линейного тренда (см. рис. 5). Этот результат хорошо согласуется с работой [Суркова, Крылов, 2016]. В исследовании отмечается отсутствие многолетнего выраженного тренда экстремальных скоростей ветра над Баренцевым морем с 1981 по 2010 г., хотя для 1990-х гг. отмечается

увеличение значений скорости и рост повторяемости процессов меридионального типа. Это позволяет сделать заключение, что изменчивость скорости ветра практически не повлияла на выявленное возрастание теплоотдачи вследствие изменений турбулентного теплообмена между океа-

ном и атмосферой. Таким образом, можно сделать вывод, что тенденции теплоотдачи за счет явного потока тепла связаны не с изменением скорости ветра, а с изменением разности температур воды и воздуха, и, главным образом, с ростом температуры воды.

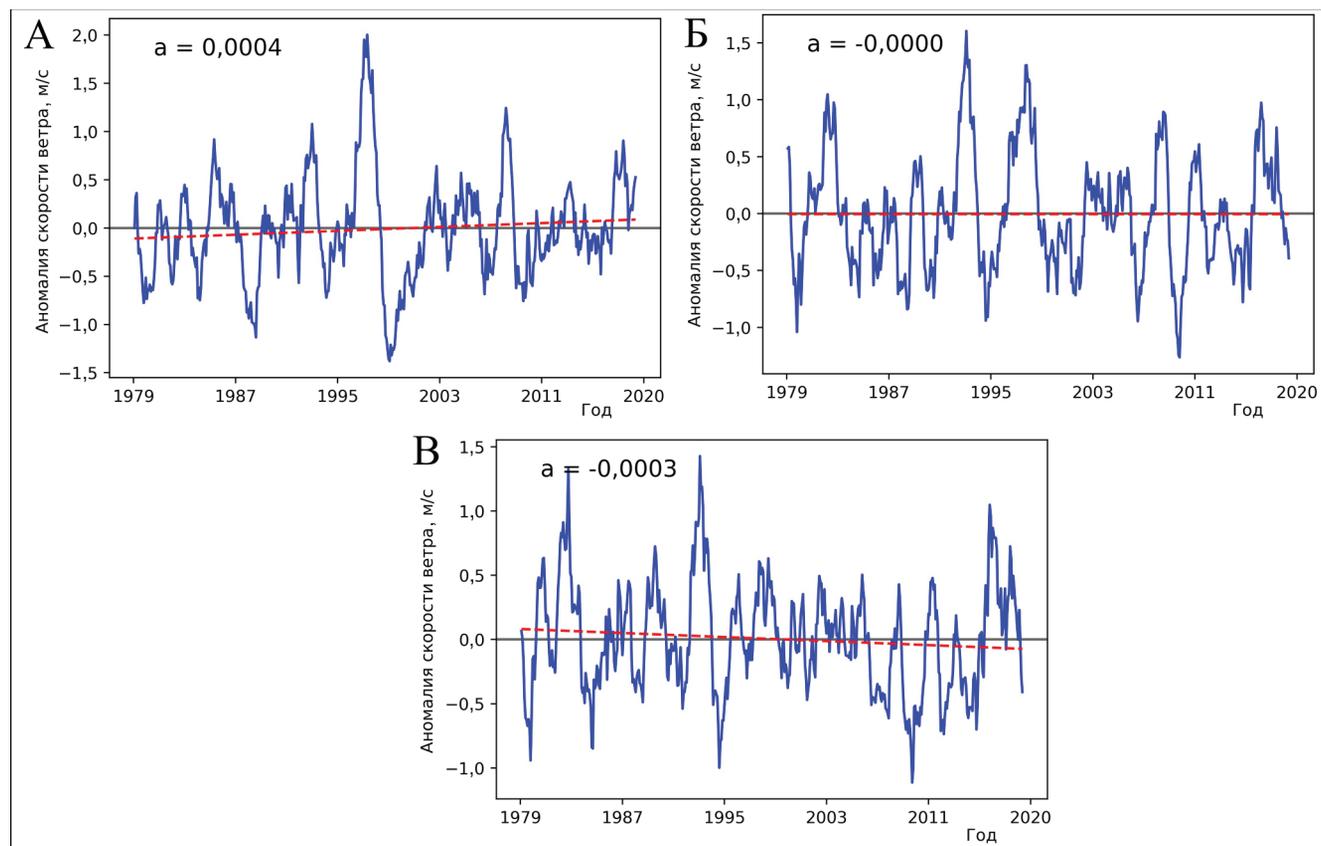


Рис. 5. Аномалии скорости ветра для контрольных точек:
А – 73° с. ш., 30° в. д.; Б – 75° с. ш., 40° в. д.; В – 76° с. ш., 50° в. д.

Fig. 5. Wind speed anomalies for control points 73° N 30° E (A), 75° N 40° E (B), and 76° N 50° E (B)

ВЫВОДЫ

В последние 40 лет возросла роль Баренцева моря как энергоактивной зоны, обеспечивающей перекачку тепла из океана в атмосферу. Увеличение теплопотерь с поверхности моря наблюдается в холодный период. Тогда как в южной, юго-западной и центральной частях моря в теплый период года отмечается уменьшение поступления тепла из атмосферы к поверхности.

Пространственное распределение линейного тренда теплоотдачи за холодный период года по

акватории Баренцева моря неравномерно: наибольшее увеличение теплоотдачи наблюдается в северо-восточной части моря, где произошло значительное сокращение площади зимнего ледяного покрова, тогда как для южной части отмечены слабые тренды противоположного знака.

Выявленные изменения с высокой степенью вероятности объясняются возрастанием разности между ПТВ и ТПМ, обеспечивающим наблюдаемый тренд ТБ и его турбулентных составляющих.

Благодарность. Исследование выполнено в рамках научного проекта РНФ № 19-17-00110-П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Варенцов М.И., Репина И.А., Артамонов А.Ю. и др. Экспериментальные исследования энергообмена и динамики атмосферного пограничного слоя в Арктике в летний период // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2016. Т. 361. С. 95–127.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 1: Баренцево море. Вып. 1: Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 280 с.
- Заболотских Е.В., Гурвич И.А., Шапрон Б. Новые районы распространения полярных циклонов в Арктике как результат сокращения площади ледового покрова // Исследование земли из космоса. 2015. № 2. С. 64–77.
- Иванов В.В., Архипкин В.С., Лемешко Е.М. и др. Изменение гидрологических условий в Баренцевом море как индикатор климатических трендов в евразийской Арктике в XXI веке // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2022. № 1. С. 13–25.
- Калавиччи К.А., Башмачников И.Л. К механизму положительной обратной связи долгосрочной изменчивости конвергенции океанических и атмосферных потоков тепла и площади ледяного покрова в Баренцевом море // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 171–181.
- Кивва К.К., Селиванова Ю.В., Писарева М.Н., Сумкина А.А. Роль физических процессов в формировании весеннего «цветения» фитопланктона в Беринговом море // Труды ВНИРО. 2020. Т. 181. С. 206–222. DOI: 10.36038/2307-3497-2020-181-206-222.
- Репина И.А., Артамонов А.Ю., Смирнов А.С., Чечин Д.Г. Исследование взаимодействия океана и атмосферы в полярных районах в рамках международного полярного года // Метеорологические и геофизические исследования. Сер. Вклад России в Международный полярный год 2007/08. М.; СПб.: Paulsen AARI, 2011. С. 236–250.
- Семенов В.А., Мартин Т., Беренс Л.К. и др. Изменения площади арктических морских льдов в ансамблях климатических моделей СМIP3 и СМIP5 // Лед и Снег. 2017. Т. 57. № 1. С. 77–107.
- Сизов А.А., Михайлова Н.В., Баянкина Т.М. Режимы крупномасштабного взаимодействия атмосферы и океана в Норвежском и Баренцевом морях // Доклады Академии наук. 2019. Т. 484. № 5. С. 615–618.
- Сумкина А.А., Кивва К.К., Иванов В.В. Анализ изменений параметров зимнего теплового баланса Баренцева моря / Современные проблемы и перспективы развития рыбохозяйственного комплекса: материалы X Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, Москва, 10–11 ноября 2022 года. Федеральное агентство по рыболовству, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии». М.: Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии. 2022а. С. 397–399.
- Сумкина А.А., Кивва К.К., Иванов В.В., Смирнов А.В. Сезонное очищение ото льда Баренцева моря и его зависимость от адвекции тепла Атлантическими водами // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022б. № 15(1). С. 82–97. DOI: 10.48612/frg/1ktr-xbuk-6grz.
- Суркова Г.В., Крылов А.А. Синоптические ситуации, способствующие формированию экстремальных значений скорости ветра в Баренцевом море // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2016. № 6. С. 18–25.
- Суркова Г.В., Романенко В.А. Изменение климата и теплообмен между атмосферой и океаном в Арктике на примере Баренцева и Карского морей // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 3. С. 280–292.
- Суркова Г.В., Романенко В.А. Сезонные и многолетние изменения турбулентных потоков тепла между морем и атмосферой в западном секторе Российской Арктики // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021б. № 4. С. 74–82.
- Суркова Г.В., Романенко В.А. Современная изменчивость энергообмена с атмосферой в Баренцевом море // Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики. 2020. С. 217–219.
- Тепловой баланс земной поверхности / под ред. М.И. Будыко. Л.: Гидрометеоиздат, 1956. 256 с.
- Трофимов А.Г., Карсаков А.Л., Ившин В.А. Изменения климата в Баренцевом море на протяжении последнего полувека // Труды ВНИРО. 2018. Т. 173. С. 79–91.
- Årthun M., Eldevik T., Smedsrud L. H. et al. Quantifying the influence of Atlantic heat on Barents Sea ice variability and retreat, *Journal of Climate*, 2012, vol. 25, no. 13, p. 4736–4743, DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00466.1.
- Ivanov V.V., Tuzov F.K. Formation of dense water dome over the Central Bank under conditions of reduced ice cover in the Barents Sea, *Deep Sea Research, pt 1, Oceanographic Research Papers*, 2021, vol. 175, p. 103590.
- Lind S., Ingvaldsen R.B., Furevik T. Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import, *Nature Climate Change*, 2018, vol. 8, no. 7, p. 634–639.
- Skagseth Ø., Eldevik T., Årthun M. et al. Reduced efficiency of the Barents Sea cooling machine, *Nat. Clim. Chang.*, 2020, vol. 10, p. 661–666, DOI: 10.1038/s41558-020-0772-6.
- Smedsrud L.H., Esau I., Ingvaldsen R.B. et al. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system. *Reviews of Geophysics*, 2013, vol. 51(3), p. 415–449, DOI: 10.1002/rog.20017.

Поступила в редакцию 06.04.2023

После доработки 16.10.2023

Принята к публикации 14.02.2024

HEAT BUDGET OF THE BARENTS SEA SURFACE IN WINTER

A.A. Sumkina¹, V.V. Ivanov², K.K. Kivva³^{1,3} Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography,
Department of Climate and Aquatic Ecosystem Dynamics² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology¹ Senior specialist, email: sumkinaaleksa@yandex.ru² Senior Scientific Researcher, D.Sc. in Physics and Mathematics; email: vladimir.ivanov@aari.ru³ Director of the Department, Ph.D. in Geography; email: kirill.kivva@gmail.com

Variability of the total heat balance (HB) of the Barents Sea during the cold period of the year has been studied. The cold period is that of cooling of the sea surface when the heat flux is permanently oriented towards the atmosphere. The contribution of two major components of the HB, i. e. sensible and latent heat fluxes, to the observed increase of the total winter heat transfer at the sea-atmosphere interface has been estimated. Data on short-wave and long-wave radiation fluxes, and sensible and latent heat values were obtained from the atmospheric reanalysis of the European Center for Medium-term Weather Forecasting ERA5. HB of the sea surface was calculated as a sum of short-wave and long-wave radiation fluxes and those of sensible and latent heat. The total HB, as well as the total flux of sensible and latent heat for the cold period were calculated by summing up the corresponding values between the start and end dates of the cooling season. Calculations demonstrated an increase in the sum of HB over the cold season for the northern part of the Barents Sea (up to 2000 MJ/m² over 40 years), and a decrease in the southern part of the sea (up to 1000 MJ/m² over 40 years). In the northern part of the sea, the contribution of sensible and latent heat fluxes decreases to 0,3–0,4. The observed trend of sum of HB over the cold season and its turbulent components could with high probability be explained by increasing difference between air temperature and sea surface temperature.

Keywords: sensible and latent heat fluxes, sea surface temperature, air temperature, Arctic

Acknowledgments. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project 19-17-00110-P).

REFERENCES

- Årthun M., Eldevik T., Smedsrud L. H. et al. Quantifying the influence of Atlantic heat on Barents Sea ice variability and retreat, *Journal of Climate*, 2012, vol. 25, no. 13, p. 4736–4743.
- Gidrometeorologiya i gidrokimiya morei SSSR, t. 1, Barentsevo more, vyp. 1, Gidrometeorologicheskie usloviya* [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. vol. 1, Barents Sea, iss. 1, Hydrometeorological conditions], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990, 280 p. (In Russian)
- Ivanov V.V., Tuzov F.K. Formation of dense water dome over the Central Bank under conditions of reduced ice cover in the Barents Sea, *Deep Sea Research, pt I, Oceanographic Research Papers*, 2021, vol. 175, p. 103590.
- Ivanov V.V., Arkhipkin V.S., Lemeshko E.M. *u op.* Izmenenie gidrologicheskikh uslovii v Barentsevom more kak indikator klimaticheskikh trendov v evraziiskoi Arktike v XXI veke [Changes in hydrological conditions in the Barents Sea as an indicator of climatic trends in the Eurasian Arctic in the 21st century], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2022, no. 1, p. 13–25. (In Russian)
- Kalavichchi K.A., Bashmachnikov I.L. K mekhanizmu polozhitel'noi obratnoi svyazi dolgosrochnoi izmenchivosti konvergentsii okeanicheskikh i atmosferykh potokov tepla i ploshchadi ledyanogo pokrova v Barentsevom more [On the mechanism of positive feedback of long-term variability of convergence of oceanic and atmospheric heat fluxes and ice cover area in the Barents Sea], *Izvestiya RAN, Fizika atmosfery i okeana*, 2019, vol. 55, no. 6, p. 171–181. (in Russian)
- Kivva K.K., Selivanova Yu.V., Pisareva M.N., Sumkina A.A. [The role of physical processes in the formation of phytoplankton spring “bloom” in the Bering Sea], *Trudy VNIRO* [Proceedings of VNIRO], 2020, vol. 181, p. 206–222. (in Russian)
- Lind S., Ingvaldsen R.B., Furevik T. Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import, *Nature Climate Change*, 2018, vol. 8, no. 7, p. 634–639.
- Mikhailova N.V., Yurovsky A.V. Analysis of Principal Components of the Sea Ice Concentration Fields in the Barents Sea, *Physical Oceanography*, 2017, vol. 194, no. 2, p. 11–18.
- Repina I.A., Artamonov A.Yu., Smirnov A.S., Chechin D.G. [Study of the ocean-atmosphere interaction in Polar regions within the framework of the International Polar Year], *Meteorologicheskie i geofizicheskie issledovaniya, Ser. Vklad Rossii v Mezhdunarodnyi polyarnyi god 2007/08* [Meteorological and geophysical studies, Ser. Contribution of Russia to the International Polar Year], Moscow, Saint Petersburg, Paulsen AARI Publ., 2011, p. 236–250. (in Russian)
- Semenov V.A., Martin T., Behrens L.K. et al. Izmeneniye ploshchadi arkticheskikh morskikh ldov v ansamblyah klimaticheskikh modelej CMIP3 i CMIP5 [Arctic Sea ice area changes in CMIP3 and CMIP5 climate models' ensembles], *Led i Sneg*, 2017, 57 (1), p. 77–107. (in Russian)
- Sizov A.A., Mikhailova N.V., Bayankina T.M. Large-Scale Atmospheric-Oceanic Interaction Regimes in the Norwegian and Barents Seas, *Doklady Earth Sciences*, 2019, vol. 484, no. 2, p. 203–206.

- Skagseth Ø., Eldevik T., Årthun M. et al. Reduced efficiency of the Barents Sea cooling machine, *Nat. Clim. Chang.*, 2020, vol. 10, p. 661–666, DOI: 10.1038/s41558-020-0772-6.
- Smedsrud L.H., Esau I., Ingvaldsen R.B. et al. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system, *Reviews of Geophysics*, 2013, vol. 51(3), p. 415–449, DOI: 10.1002/rog.20017.
- Sumkina A.A., Kivva K.K., Ivanov V.V. [Analysis of changes in the parameters of the winter heat balance of the Barents Sea], *Sovremennye problemy i perspektivy razvitiya rybnokhozyaistvennogo kompleksa: materialy X Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov, Moskva, 10–11 noyabrya 2022 goda. Federal'noe agentstvo po rybolovstvu, FGBNU "Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut rybnogo khozyaistva i okeanografii"*, Moskva, *Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut rybnogo khozyaistva i okeanografii* [Modern problems and prospects for the development of the fishery complex: materials of the X International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Specialists, Moscow, November 10–11, 2022. Federal Fisheries Agency, Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography, Moscow, All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography Publ.], 2022a, p. 397–399. (In Russian)
- Sumkina A.A., Kivva K.K., Ivanov V.V., Smirnov A.V. Sezonnoe ochishchenie oto l'da Barentseva morya i ego zavisimost' ot adveksii tepla Atlanticheskimi vodami [Seasonal ice removal in the Barents Sea and its dependence on heat advection by Atlantic waters], *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, 2022b, vol. 15(1), p. 82–97, URL: <https://doi.org/10.48612/fpg/1krp-xbuk-6gpz>. (In Russian)
- Surkova G.V., Krylov A.A. Sinopticheskiye situatsii, sposobstvuyushchiye formirovaniyu ekstremal'nykh znacheniy skorosti vetra v Barentsevom more [Synoptic patterns of extreme wind speed in the Barents Sea], *Vestn. Mosk. Unta, Ser. 5, Geogr.*, 2016, no. 6, p. 18–25. (In Russian)
- Surkova G.V., Romanenko V.A. [Modern variability of energy exchange with the atmosphere in the Barents Sea], *Kompleksnye issledovaniya prirodnoi sredy Arktiki i Antarktiki* [Complex studies of the natural environment in Arctic and Antarctic], 2020, p. 217–219. (In Russian)
- Surkova G.V., Romanenko V.A. Izmenenie klimata i teploobmen mezhdou atmosferoi i okeanom v Arktike na primere Barentseva i Karskogo morei [Climate change and heat exchange between atmosphere and ocean in the Arctic based on data from the Barents and Kara Sea], *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2021, vol. 67, no. 3, p. 280–292. (In Russian)
- Surkova G.V., Romanenko V.A. Sezonnye i mnogoletnie izmeneniya turbulentnykh potokov tepla mezhdou morem i atmosferoi v zapadnom sektore Rossiiskoi Arktiki [Seasonal and long-term changes of turbulent heat fluxes between sea and atmosphere in western sector of the Russian Arctic], *Vestn. Mosk. Unta, Ser. 5, Geogr.*, 2021, no. 4, p. 74–82. (In Russian)
- Teplovoi balans zemnoi poverkhnosti* [Thermal balance of the earth's surface], M.I. Budyko (ed.), Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1956, 256 p. (In Russian)
- Trofimov A.G., Karsakov A.L., Ivshin V.A. [Climate change in the Barents Sea over the past half century], *Trudy VNIRO* [Proceedings of VNIRO], 2018, vol. 173, p. 79–91. (In Russian)
- Varentsov M.I., Repina I.A., Artamonov A.Yu. et al. [Experimental studies of summer energy exchange and dynamics of the atmospheric boundary layer in the Arctic], *Trudy gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra RF* [Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the RF], 2016, no. 361, p. 95–127. (In Russian)
- Zabolotskikh E.V., Gurvich I.A., Shapron B. Novye raiony rasprostraneniya polyarnykh tsiklonov v Arktike kak rezul'tat sokrashcheniya ploshchadi ledovogo pokrova [New areas of distribution of polar cyclones in the Arctic as a result of the reduction of the ice cover area], *Issledovanie zemli iz kosmosa*, 2015, no. 2, p. 64–77. (In Russian)

Received 06.04.2023

Revised 15.10.2023

Accepted 14.02.2024

УДК: 556.537

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЧЕТКОВИДНЫХ РУСЛАХ СТЕПНЫХ РЕК ХОПЕРСКО-БУЗУЛУКСКОЙ РАВНИНЫ

А.М. Тарбеева¹, И.В. Крыленко², В.В. Сурков³, Н.М. Михайлова⁴

¹⁻⁴ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, НИЛ эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева*

¹ *Науч. сопр., канд. геогр. наук; e-mail: amtarbeeva@yandex.ru*

² *Науч. сопр.; e-mail: i-krylenko@yandex.ru*

³ *Ст. науч. сопр., канд. геогр. наук; e-mail: vita.surkov@yandex.ru*

⁴ *Ст. науч. сопр., канд. геогр. наук; e-mail: nmmikhailova@yandex.ru*

Четковидные (четкообразные или бочажинные) русла, характеризующиеся чередованием озеровидных расширений и узких протоков, широко распространены на малых реках степной зоны России. Расширения русел – четки или бочаги глубиной до 5–6 м, имеют большое значение для сельского хозяйства, обеспечивая водопой в засушливые периоды года, когда сток малых рек прекращается. Однако механизмы формирования специфической формы русел таких рек до сих пор остаются дискуссионными: ее объясняют неравномерным заилением, образованием водоворотов, разгрузкой подземных вод, карстовыми процессами или реликтовым термокарстом. Целью исследования являлась оценка роли водного потока в образовании и поддержании четковидной формы русел рек. В задачи входило описание гидрологического режима рек Кардаил и Купава, определение гидродинамики потока в расширениях и сужениях русла, установление особенностей эрозионно-аккумулятивных процессов и транспорта наносов, а также выявление элементов строения русла и поймы, не соответствующих современным условиям водности. Для стока воды исследуемых рек характерно снижение расходов половодья в долгосрочном плане, о чем свидетельствует редкое затопление высокой поймы, низкие темпы динамики берегов, а также несоответствие размеров излучин ширине русла. Сток наносов исследуемых рек мал, в 2023 г. он оценивается в 6,05 т/км², что связано с малым поступлением наносов с водосбора и низкими темпами размыва дна и берегов, сложенных глинистыми отложениями. Современная динамика водного потока не способствует углублению и расширению четок: поток достигает максимальных скоростей в сужениях русла (1–1,3 м/с), а в расширениях русла скорости потока падают до 0,3 м/с, и, несмотря на наличие водоворотов, происходит аккумуляция наносов. Значительная часть расширений русла расположена на месте бывших плесов древнего извилистого русла, унаследованного современным водотоком, а на бывших перекатах русло сузилось и сформировалась низкая пойма. Глубокие расширения русла сохранились благодаря малому стоку наносов и их тонкому составу, препятствующему быстрому оседанию из взвеси. Проведенные исследования не позволяют исключить других факторов образования исходных глубоких плесов, в том числе криогенных.

Ключевые слова: бочаги, малые реки, заиление, взвешенные наносы, скоростное поле потока

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.11

ВВЕДЕНИЕ

Четковидные (четкообразные или бочажинные) русла, характеризующиеся чередованием озеровидных расширений (четок или бочагов) и узких протоков, широко распространены на малых реках в степной зоне Евразии [Тарбеева и др., 2016; Рябуха, Поляков, 2020]. Озеровидные расширения русел таких рек имеют большое значение для скотоводства и выживания диких животных и птиц, обеспечивая водой даже в самые засушливые периоды года, когда сток малых рек прекращается и сужения русел обсыхают. Однако до сих пор дискуссионным остается вопрос о происхождении и причинах устойчивости четковидной формы русел степных рек, так как специальные гидрологические исследования

на них не проводились, особенности их гидродинамики, также как и процессы осадконакопления и транспорта наносов, в четковидных руслах не исследовались.

Чаще всего формирование четковидных русел в степях считают одной из стадий агрогенного заиления рек, происходящего на фоне снижения их водности, при котором сужения русла образуются при зарастании и заилении перекатов, а озеровидные расширения русел (четки или бочаги) сохраняются на месте бывших плесов [Иванова и др., 1996; Чернов, 1988; Чалов, 2011]. Аналогичные процессы отмечены в Австралии при естественном снижении водности рек на фоне климатических изменений [Williams, Fryirs, 2020]. Но описаны и другие ме-

ханизмы образования расширений русла, такие как образование водоворотных зон [Чалов и др., 2018], разгрузка в русле подземных вод [Кичигин, 1992], суффозионно-карстовые процессы [Тарбеева и др., 2016]. В том числе существует версия о реликтовой термокарстовой природе четковидных русел степи, где перигляциальные условия наблюдались в позднем неоплейстоцене [Рябуха, Поляков, 2020].

Целью исследования являлась оценка современных гидрологических условий степных рек Кардаил и Купава для выявления роли водного потока в образовании и поддержании четковидной формы русла. В задачи исследования входило установление гидрологического режима исследуемых рек, определение гидродинамических параметров потока в расширениях и сужениях русла, характеристика эрозионно-аккумулятивных процессов и транспорта наносов, а также выявление элементов строения русла, несоответствующих современным условиям водности.

Установление генезиса четковидных русел малых степных рек помогло бы глубже понять историю развития их долин, оценить роль сельскохозяйственного освоения и изменения климата в формировании русел, разработать мероприятия по их сохранению.

Природные условия территории и их изменения. Исследования проводились на территории Новониколаевского района Волгоградской области. Исследуемые малые реки Кардаил и Купава относятся к бассейну р. Бузулук (левый приток Хопра, бассейн Дона). Река Кардаил впадает в р. Бузулук справа, в его среднем течении. Длина Кардаила составляет 128 км, площадь бассейна 1920 км². Река Купава является левым притоком р. Кардаил, впадающим в него в среднем течении, в 77 км выше устья. Длина р. Купавы составляет 39 км, площадь бассейна – 380 км². Реки текут в пределах Хоперско-Бузулукской равнины, которая является частью Окско-Донской низменности, покрывавшейся донским ледником, а затем освоенной долинной сетью. Рельеф равнины пологоволнистый, абсолютные отметки водоразделов 150–175 м. Рыхлые неоген-четвертичные отложения до глубины первых сотен метров представлены преимущественно глинами и песками, карстующиеся породы залегают глубоко или отсутствуют [Государственная геологическая карта..., 2009]. Реки Кардаил и Купава имеют извилистые русла, осложненные хорошо выраженными четковидными расширениями, встречающимися и на других реках Хоперско-Бузулукской равнины. Четковидное строение имеют также некоторые старицы этих рек, приуроченные к высокой пойме и первой надпойменной террасе, наиболее протяженная из них наблюдается в нижнем течении р. Кардаил у п. Киквидзе.

В бассейне среднего Дона, в том числе в долине Бузулука, широко распространены следы мощного стока в конце позднего неоплейстоцена, выраженные в виде унаследованных макроизлучин, больших палеорусел, систем крупных грив и меандровых цирков, развитых на уровне высокой поймы и низких террас [Панин и др., 2013]. Годовой слой речного стока в поздневалдайское время в 2–4 раза превышал современный, что связывают с большими влагозапасами в снеге в условиях длительной зимы и меньшей потерей стока на фильтрацию в условиях распространения многолетней мерзлоты. Наличием большого стока в поздневалдайское время объясняется чрезмерная по отношению к размерам современных рек ширина пойм.

Современные климатические условия территории, определяющие формирование стока, имеют следующие характеристики. Среднегодовая (1991–2020 гг.) температура воздуха по м.с. Урюпинск, расположенной в 60 км к ЮЗ от участка исследований, составляет +7,6°C, средняя температура июля +21,9°C, средняя температура января –6,6°C, среднегодовое количество осадков – 423 мм. Зима малоснежная, с частыми оттепелями. Среднее многолетнее максимальное за год суточное количество дождевых осадков составляет 31 мм, абсолютный максимум – 63 мм (август 2019 г.) [Погода и Климат, 2023]. Климатические изменения последних десятилетий проявились в основном в потеплении в зимний период. Статистически значимого изменения слоя осадков не произошло, но уменьшилась доля твердых осадков и возросла доля экстремальных дождей [Основные гидрологические характеристики..., 2020].

Исследуемые реки характеризуются выраженным весенним половодьем, которое является основным руслоформирующим событием. Наинизшие уровни воды наблюдаются в августе, в некоторые годы реки пересыхают. На р. Кардаил (г.п. хут. Андреевский, площадь водосбора 1310 км²) с марта по май в среднем проходит 86,7% годового стока воды, с июня по ноябрь – 6,8%, а с декабря по февраль – 6,5% [Основные гидрологические характеристики..., 2020].

Со второй половины 1970-х годов в бассейне Дона произошли существенные изменения водного режима рек: объемы годового и весеннего стока сократились, при этом объемы меженного стока выросли [Основные гидрологические характеристики..., 2020]. Эти изменения неоднородны по бассейну Дона. Они имеют, прежде всего, климатические причины (сокращение снегозапасов, уменьшение глубины промерзания почвы и др.), но усугубляются усилением антропогенной нагрузки: строительством прудов и водохранилищ,

изменением характера земле- и водопользования [Варенцова и др., 2021]. По данным наблюдений на р. Кардаил (г.п. хут. Андреевский), за период 1978–2017 гг., по отношению к периоду 1956–1977 гг., слой стока половодья снизился на 8% от годового, а максимальный срочный расход половодья – на 31% [Основные гидрологические характеристики..., 2020]. При этом снижение весеннего стока в бассейне Хопра, в т. ч. в бассейне Кардаила, началось позже, а его величина была существенно меньше, чем в западной и южной частях бассейна Дона [Варенцова и др., 2021].

Бассейн р. Кардаил относится к зоне типичных степей, почвы представлены черноземами обыкновенными, выщелоченными и южными [Основные гидрологические характеристики..., 2020]. Земледельческое освоение среднего Дона началось во второй половине XVII в., а максимум поступления наносов бассейнового происхождения в русла малых рек пришелся на последнюю треть XIX в. [Голосов, 2006]. В настоящее время распаивается около 80% территории Новониколаевского района [Лобанова, 2014]. Однако Хоперско-Бузулукская низменность характеризуется невысокими значениями смыва с пашни (менее 1 т/га в год) в связи

с малыми уклонами территории и низким эрозионным потенциалом осадков [Белоцерковский и др., 1983]. В последние годы поступление наносов сокращается из-за снижения темпов овражной эрозии и увеличения протяженности суходольной сети, задерживающей сток наносов [Голосов, 2006]. Наличие русловых прудов и широкие нераспахиваемые поверхности поймы и низких террас, используемые как пастбища, также задерживают сток наносов с обрабатываемых полей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые наблюдения. Для получения данных о современном гидрологическом режиме, гидродинамике потоков и морфологическом строении русел четковидных рек в 2022–2023 гг. были проведены детальные полевые наблюдения на двух ключевых участках: река Кардаил выше впадения левого притока Купавы вблизи хут. Верхнекардаильского (площадь водосбора в створе временного гидрологического поста 572 км²) и река Купава в 1,5 км выше устья (площадь водосбора в створе временного гидрологического поста 373 км²) (рис. 1). Протяженность ключевого участка р. Кардаил составляет 3 км, р. Купавы – 1,5 км.

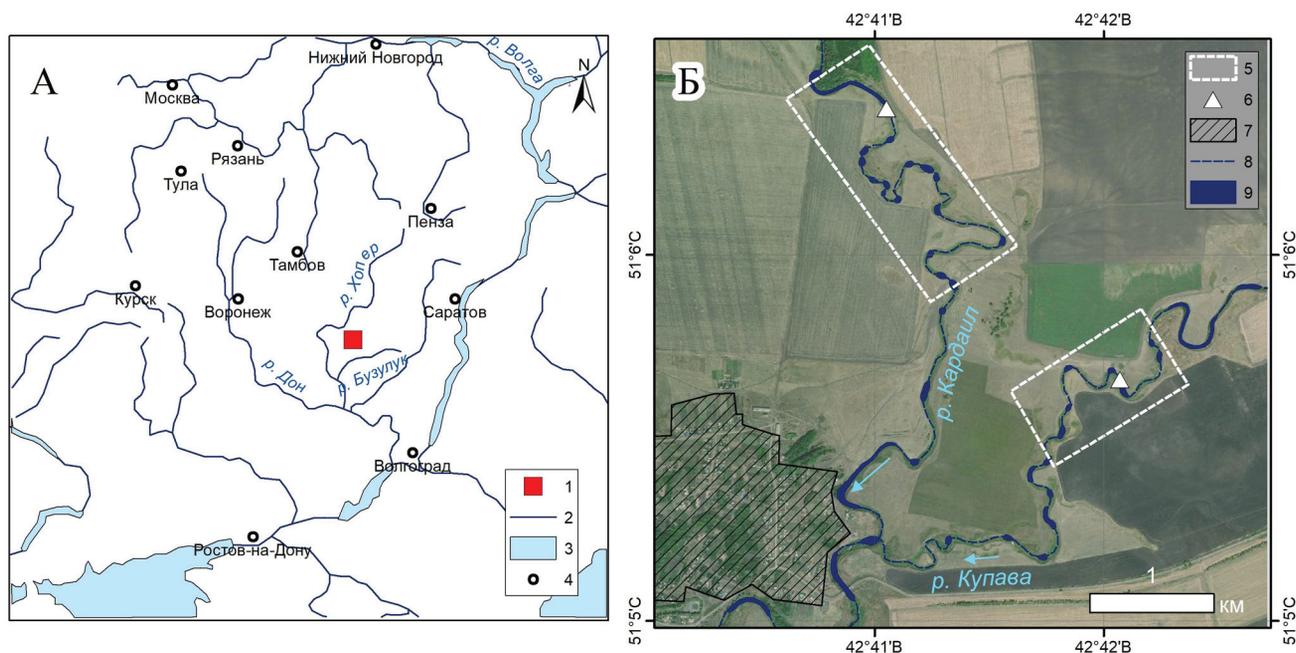


Рис. 1. Район исследований:

А – обзорная схема (1 – положение участка работ; 2 – реки; 3 – водоемы; 4 – города); Б – расположение ключевых участков рек Кардаил и Купава на космическом снимке ESRI (5 – ключевые участки работ; 6 – временные гидрологические посты; 7 – хут. Верхнекардаильский; 8 – сужения русла; 9 – расширения русла)

Fig. 1. Study area:

А – overview scheme: 1 – research area; 2 – rivers; 3 – reservoirs; 4 – cities; Б – location of key sections of the Kardail and Kupava rivers on the ESRI satellite image: 5 – key sites; 6 – temporary gauging stations; 7 – Verkhnekardail'sky settl.; 8 – narrowings of the channel; 9 – channel widenings

На каждом из ключевых участков была проведена аэрофотосъемка русла и прилегающей поймы, получены ортофотопланы и цифровые модели рельефа, по которым определялись морфометрические характеристики русла и поймы. Одновременно при помощи эхолота *Lowrance LMS-525C DF* были проведены промеры глубин на всем протяжении ключевых участков.

На каждой из рек измерялись уровни и расходы воды, определялось положение отметок уровня воды и меток высоких вод относительно временного репера с условной отметкой высот. Также определялись уклоны водной поверхности, форма поперечного сечения русла как в сужениях, так и в расширениях. С конца февраля по конец августа 2023 г. при помощи барометрических самописцев *Keller DCX-22* на р. Купаве проводились ежечасные измерения уровней воды. На период половодья на р. Кардаил была установлена автоматическая фотокамера с интервалом съемки один раз в три часа, что позволило проследить ледовые явления, сход снега и другие характеристики.

Расходы воды во время половодья измерялись при помощи акустического доплеровского измерителя скоростей течения воды (*Acoustic Doppler Current Profiler*) модели *Sontek RiverSurveyor M9*. В межень – при помощи поплавков или гидрологической вертушки ГР-55. На спаде половодья 2023 г. при помощи акустического доплеровского измерителя скоростей течения воды исследовалось скоростное поле потока в четковидных расширениях русла. Поверхностные скорости течения, которые попадают в «мертвую зону» прибора – до 0,5 м от поверхности, определялись поплавками.

Для оценки заиления русла определялся сток и состав взвешенных наносов, оценивалось распределение в русле донных отложений. Для определения стока наносов одновременно с измерением расходов воды на временных гидрологических постах (в сужениях русла) отбирались пробы воды на мутность. Пробы воды отбирались со стрежня потока вблизи его поверхности. Пробы донных отложений отбирались в расширениях и в сужениях русла.

Обработка материалов. Морфометрические характеристики русел рек Кардаил и Купава определялись для оценки соответствия формы русел современной водности потока, а также для выявления отличий морфологии четковидных русел от аллювиальных русел, не имеющих четковидного строения.

Так как доступные космические снимки и топографические карты не обладают необходимой детальностью для исследования небольших по размерам русел, морфометрические характеристики русла и высотные отметки уровней поймы определялись на основе полевых материалов: построен-

ных по результатам аэрофотосъемки ортофотопланов и цифровых моделей рельефа, батиметрических схем ключевых участков русел, поперечных профилей, проложенных через характерные участки русла и поймы путем нивелирования.

Определялись следующие морфометрические параметры русла: ширина русла в бровках низкой поймы, ширина русла в бровках высокой поймы, шаг излучин, ширина и длина расширений (четок), длина сужений, глубина в расширениях и сужениях русла при межennom уровне воды. Ширина русла определялась на крыльях излучин, где ее значения минимальны и статистически наименее переменны [Сидорчук, Панин, 2017]. Ширина русла в бровках низкой поймы ($B_{\text{нп}}$) измерялась по границе незадернованной части русла и растительности на низкой пойме (тростника). Ширина русла в бровках высокой поймы ($B_{\text{вп}}$), измерялась в тех же створах, но по бровкам высокой поймы.

Шаг излучин (L) или половина длины волны излучины, определялся как расстояние между точками изменения знака кривизны центральной линии русла. Длина четки определялась как ее максимальная протяженность, ширина четок определялась как максимальная ширина русла в бровках низкой поймы в расширении русла.

Ширина русла и размеры излучин имеют связь с расходами воды, поэтому морфометрические характеристики русел используются для палеогидрологических реконструкций [Сидорчук, Панин, 2017]. На свободно меандрирующих реках среднестатистическое значение соотношения шага излучины (L) к ширине русла (B) определяется расстоянием между соседними перекатами и в среднем составляет от 5 до 7 [Leopold, Wolman, 1960; Чалов, 2011]. Соотношения $L/B_{\text{нп}}$ и $L/B_{\text{вп}}$ использовались для оценки соответствия размера излучин современной водности потока. Существенное превышение этого значения ($L/B > 10$) является одним из признаков снижения водности рек, применяемым в палеогидрологии [Панин и др., 2013; Сидорчук, Панин, 2017].

Ежедневные расходы воды р. Купавы вычислялись на основе данных барометрического самописца уровней по связи измеренных расходов и уровней воды. Максимальные расходы воды рассчитывались на основе измеренной площади поперечного сечения русла, ограниченного метками уровней высоких вод, и средней скорости потока, определенной по формуле Шези.

Для интерпретации данных о водном режиме реки в период полевых наблюдений анализировались данные метеостанции Урюпинск [Расписание погоды..., 2023], расположенной в 60 км к ЮЗ от ключевых участков. Данные о температуре воздуха и количестве осадков были приведены к среднесу-

точным значениям. Также использовались сведения о наличии и мощности снежного покрова и характере осадков (твердой или жидкой фазе).

Данные о стоке взвешенных наносов были получены на основе связи измеренных значений мутности и расходов воды на реках Кардаил и Купава и носят оценочный характер. Из-за небольшого количества имеющихся измерений, была построена общая для двух рек связь мутности с расходом воды. На основе этой связи по данным о ежечасных расходах воды были рассчитаны соответствующие значения мутности и расхода взвешенных наносов, а затем определен сток наносов за весь период наблюдений.

Содержание взвешенных частиц в воде определялось весовым методом путем фильтрования проб воды через мембранные фильтры с порами 45 мкм.

Для установления источников поступления наносов, определения возможности размыва русла и аккумуляции наносов проводился гранулометрический анализ взвешенных частиц, осевших на фильтрах, а также донных отложений при помощи лазерного гранулометра *Fritsch Analysette 22 MicroTec plus* (расчет размеров зерен осуществлялся по модели Франгофера, пробоподготовка проводилась пирофосфатом натрия, каждый образец измерялся трижды). Также проводилось определение объемной массы размываемых отложений с исходной влажностью путем деления массы образца на его объем. По измеренным характеристикам отложений на основе таблиц для глинистых грунтов [Мирицхулава, 1988, с. 183] оценивались неразмывающие скорости потока, которые сопоставлялись с измеренными скоростями в разных частях русла.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Морфология русла и поймы. Реки Кардаил и Купава на исследованных участках имеют извилистые русла с чередованием свободных и вынужденных излучин, осложненных четковидными расширениями (см. рис. 1, Б). Уклоны русел по длине участков изменяются от 0,1‰ (в четковидных расширениях – плесах) до 1,25‰ (в сужениях русла). У подножия склонов долины протягивается полого наклонная в сторону русла поверхность первой надпойменной террасы высотой 5,5–6 м над меженным урезом и шириной 200–300 м. Терраса часто не имеет выраженного тылового шва, осложнена отдельными замкнутыми западинами, обычно распаивается. На отметках 4,5–5 м над меженным урезом расположена субгоризонтальная поверхность высокой поймы, имеющая четкие бровки и осложненная хорошо выраженными старицами, часто имеющими четковидную форму. Высокая пойма преимущественно

луговая, используется как пастбище. Ее ширина в пределах участков исследований достигает 300–400 м. Уровни средней поймы варьируют по высоте от 1,5 до 3 м, имеют ступенчатый или наклонный характер и образуют фрагменты шириной до 40–50 м преимущественно в шпорах излучин. Низкая пойма высотой около 1 м протягивается узкой (до 10–15 м) полосой вдоль сужений русла и занята, в основном, густыми зарослями тростника (рис. 2). Берега рек на ключевых участках наблюдений устойчивые, суглинистые. Уступы высокой и средней поймы заняты луговой степной растительностью.



Рис. 2. Уровни поймы и первая надпойменная терраса (НПТ) на ключевом участке р. Кардаил (снимок сделан на спаде половодья 05.05.2022, низкая пойма частично затоплена)

Fig. 2. Floodplain levels and the terrace 1 in the key section of the Kardail River (photo taken at the flood recession on 05.05.2022, the low-level floodplain is partly flooded)

Морфометрические параметры русла Купавы имеют меньшие значения, чем на Кардаиле, что соответствует разнице в площадях водосбора (табл. 1). Большие излучины русла с шагом 100–160 м прослеживаются в бровках высокой поймы. Излучины меньшего размера, шагом 40–70 м наблюдаются преимущественно на Кардаиле (см. рис. 2), их шпоры образованы средней поймой. Поэтому шаг излучин Кардаила имеет больший разброс значений, чем на Купаве. При этом на Купаве наблюдается больший разброс морфометрических характеристик четковидных расширений русла.

Отношение шага излучин к ширине русла в бровках низкой поймы ($L/B_{\text{нп}}$) на Купаве изменяется от 14 до 40, что свидетельствует о несоответствии современной водности потока параметрам излучин русла ($L/B > 10$). На Кардаиле выделяются излучины меньшего размера, поэтому среднее значение этого соотношения меньше. Соотношение шага излучин к ширине русла в бровках высокой поймы ($L/B_{\text{вп}}$) составляет 1,5–3,7, что близко к среднестатистическому соотношению (от 5 до 7) и может указывать

на единовременное формирование поверхности высокой поймы и излучин русла.

Большинство крупных четковидных расширений приурочены к вершинам излучин, их расположение соответствует расположению плесов в извилистом русле. Но отдельные четки наблюдаются и на крыльях излучин, а также в старицах на поверхности поймы (рис. 3, А). Максимальные глубины русла, достигающие 4–6 м, наблюдаются в наиболее крупных четках и в большинстве случаев смещены к их верхнему по течению

краю. Четки имеют крутые подводные склоны и уплощенное дно. Поперечный профиль через расширения русла близок к симметричному, но в четках, расположенных в вершинах излучин, наиболее крутой склон часто приурочен к выпуклому берегу (рис. 3, В), что несвойственно профилю извилистого русла, где в вершине излучины у выпуклого берега чаще всего наблюдается отмель. Надводные аккумулятивные формы в расширениях русла, в том числе в вершинах излучин, отсутствуют.

Таблица 1

Морфометрические характеристики русел рек Кардаил и Купава на ключевых участках

Характеристика русла	Кардаил	Купава
Ширина русла в сужениях ($B_{\text{сп}}$), м	8	1,5–2
Ширина русла в расширениях (четках), м	19 (16–23)	15 (8–32)
Длина расширений (четок), м	38 (24–65)	34 (8–62)
Длина сужений русла, м	11–32	1–23
Глубина воды в межень в расширениях (четках), м	2–5	2,5–7
Глубина воды в межень в сужениях, м	0,2–1	0–0,5
Шаг излучин русла (L), м	37–160	72–129
Ширина русла в бровках высокой поймы ($B_{\text{вп}}$), м	25–50	31–36
$L/B_{\text{вп}}$	1,1–3,3	2,7–3,7
$L/B_{\text{сп}}$	4–19	14–40

Гидрологические и метеорологические условия 2023 г. Зимой 2022–2023 гг. реки Кардаил и Купава не замерзли, сток рек не прекращался. Наибольшая мощность льда на Кардаиле достигала 40–50 см, средняя составляла около 20 см, местами отмечались полыньи.

Основная волна половодья на Купаве продолжалась с 28 февраля по 18 марта 2023 г. (19 дней), и имела два пика, связанных с выпадением осадков (рис. 4). Наиболее высокий пик половодья с максимальным расходом воды 55,3 м³/с наблюдался 10 марта. На пике половодья уровни воды на Кардаиле и Купаве поднимались на 4–4,3 м выше меженных, но вода не доходила до бровок высокой поймы (рис. 5, А, Б). При этом нарушения дернового покрова наблюдались только на участках повреждения ледоходом (см. рис. 5, В). Следы размыва в виде оголенных корней тростника были отмечены также на уступах низкой поймы (см. рис. 5, Г). Максимальные уровни воды 2023 г. на Кардаиле были лишь немного ниже уровней рекордного за последние 16 лет половодья 2018 г., а на Купаве предполагаемые метки высоких вод 2018 г. в 2023 г. были затоплены.

Спад половодья был постепенным и продолжался до 19 июня. На спаде половодья и в последующую

летнюю межень наблюдались небольшие паводки, когда вода достигала бровок низкой поймы (1 м). С середины по конец августа на Купаве поверхностный сток воды отсутствовал, сужение русла у временного гидрологического поста обсохло, местами в нем сохранялись отдельные мелкие лужи со стоячей водой. На Кардаиле сток воды не прерывался, меженные расходы составляли около 50 л/с (табл. 2).

Сток воды р. Купавы за период с 24 февраля по 25 августа 2023 г. оценивается примерно в 18,7 млн м³, что соответствует слою стока 50 мм или 3,4 л/(с·км²). При этом за 20 суток основной волны половодья, с 28 февраля по 19 марта, прошло 87,7% от общего стока воды рассматриваемого периода. Еще 12,1% стока прошло на растянутом спаде половодья с 20 марта по 19 июня.

Скорости течения и скоростное поле потока. В сужениях русла в половодье происходит затопление низкой поймы, занятой густыми стеблями отмершего тростника, резко снижающего скорости течения. Несмотря на затопление низкой поймы, подавляющая часть стока проходит в пределах узкой (2–3 м) полосы над руслом. Измеренные на спаде половодья поверхностные скорости потока в сужениях русла Купавы достигали 1–1,3 м/с.

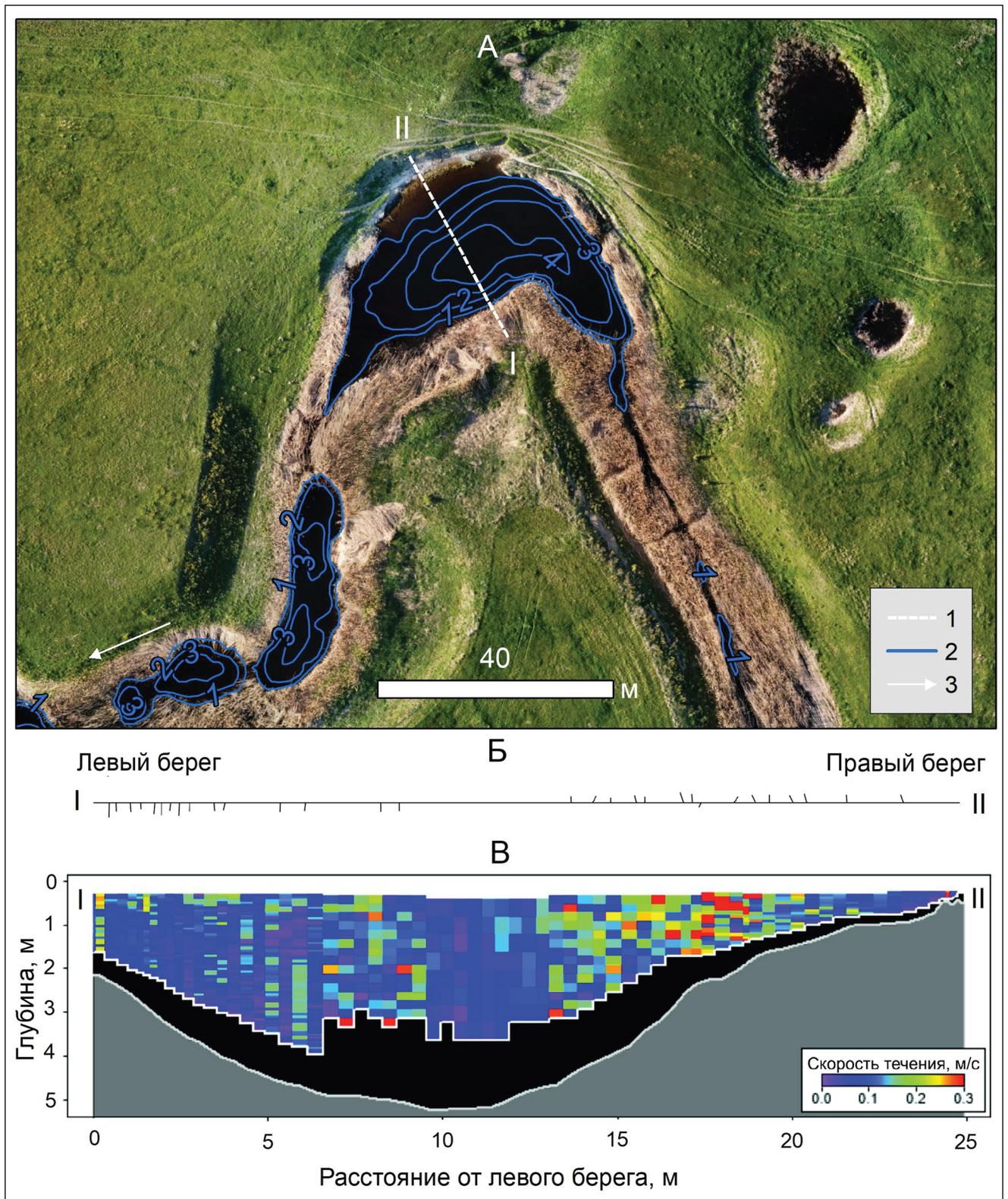


Рис. 3. Морфология русла и распределение скоростей течения в четковидном расширении русла р. Купавы: А – ортофотоплан (1 – линия профиля; 2 – изобаты, м; 3 – направление потока); Б – схема направлений течения по профилю I–II (штрихи ориентированы по направлению течения); В – распределение скоростей течения в расширении русла по профилю I–II. Черным цветом показана зона экстраполяции значений скорости, серым цветом – дно реки

Fig. 3. Morphology of the channel and distribution of flow velocities in the channel extension of the Kupava River: А – orthophotomap: 1 – profile line; 2 – isobaths, m; 3 – flow direction; Б – diagram of flow directions along profile I–II (the lines are oriented in the direction of flow); В – distribution of flow velocities in the channel extension along the profile I–II, the zone of extrapolation of speed values is shown in black, the river channel bottom is shown in grey

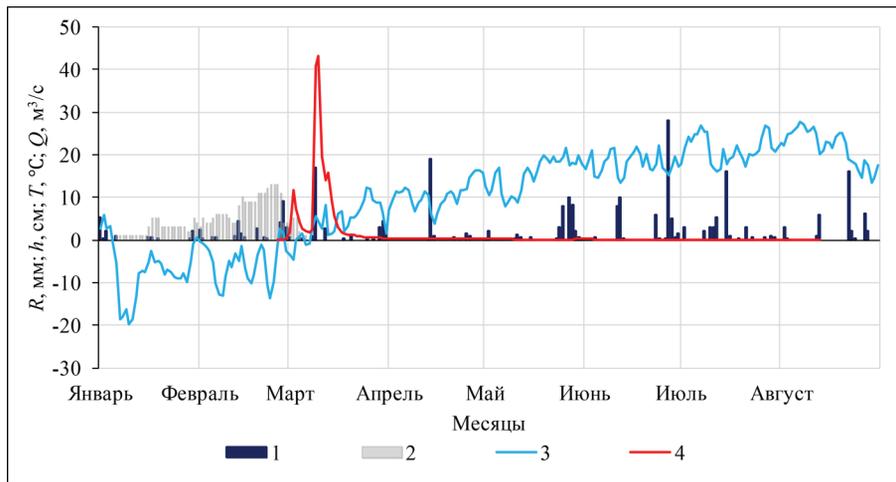


Рис. 4. Гидрограф р. Купавы и изменение метеорологических параметров по мс Урюпинск в 2023 г. Вертикальная шкала единая для всех показателей: 1 – суточная сумма осадков R , мм; 2 – высота снежного покрова h , см; 3 – среднесуточная температура воздуха T , °C; 4 – среднесуточные расходы воды Q , м³/с

Fig. 4. Hydrograph of the Kupava River and 2023 meteorological parameters at the Uryupinsk weather station (vertical scale is the same for all indicators): 1 – daily precipitation R , mm; 2 – snow depth h , cm; 3 – average daily air temperature T , °C; 4 – average daily water discharge Q , m³/s

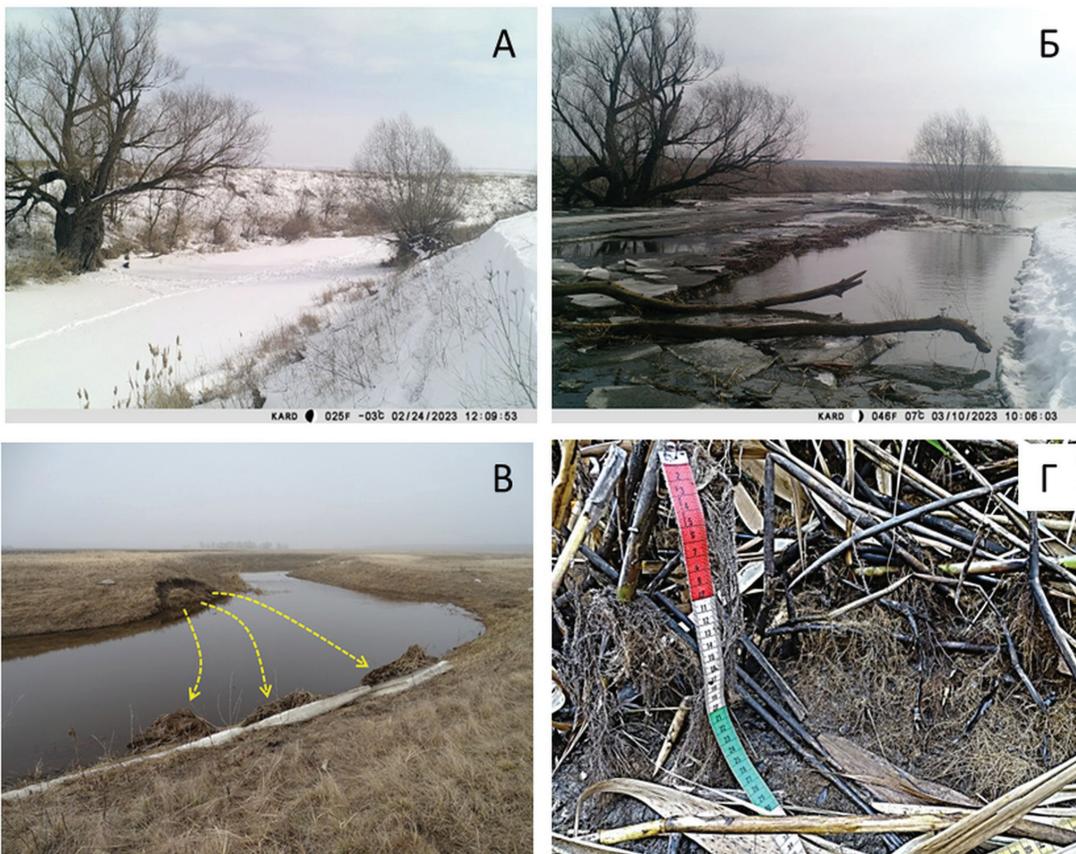


Рис. 5. Кардаил и Купавы в разные фазы водного режима:

А – р. Кардаил 24 февраля 2023 г. в зимнюю межень (снимок с фотоловушка); Б – р. Кардаил 10 марта 2023 г. прохождение пика половодья (снимок с фотоловушка); В – участок разрушения берега льдом на р. Купавы, 18 марта 2023 г.; Г – отмытые корни тростника в обсохшем русле Купавы 25 августа 2023 г.

Fig. 5. Different phases of water regime for the Kardail and Kupava rivers:

А – Kardail River during winter low water (February 24, photo from a time lapse camera); Б – Kardail River near the peak of the flood (March 10, photo from a time lapse camera); В – destruction of the bank by ice on the Kupava River, March 18, 2023; Г – washed reed roots in the dried bed of the Kupava River, August 25, 2023

Таблица 2
Измеренные уровни воды (H), расходы воды (Q) и содержание взвешенных веществ (SSC) в воде на реках Кардаил и Купава

Дата	Q , м ³ /с	H , м	SSC , мг/л
Река Кардаил			
03.05.2022	—*	100,06	—
04.05.2022	0,577	100,04	—
16.03.2023	6,1	100,81	34,9
18.03.2023	4,21	100,54	23,6
23.02.2023	—	—	—
24.08.2023	0,054	99,61	5,4
Река Купава			
06.05.2022	0,393	113,34	—
17.03.2023	1,74	113,76	12,8
18.03.2023	1,66	113,70	9,9
24.02.2023	0,0098	112,72	—
25.08.2023	0	112,53	—

Примечание. * – нет данных.

При выходе потока в расширение русла (четку) его скорости резко снижаются. В детально исследованном расширении русла Купавы образовывалась водоворотная зона: вдоль вогнутого берега направление течения соответствовало общему направлению течения реки, вдоль выпуклого – формировалось противотечение (рис. 3, Б). Скорости течения при этом не превышали 0,3 м/с и достигали максимальных значений в верхней по течению части четки, где расположена ее наиболее глубокая часть. В средней по течению части четки средняя по створу измерений скорость течения составила 0,12 м/с. При этом по центру русла скорости течения снижались до нулевых (см. рис. 3, В), а ближе к выпуклому левому берегу формировалось водоворотная зона со скоростями противотечений до 0,1 м/с.

Мутность воды, сток наносов, донные отложения. Максимальная измеренная мутность воды наблюдалась на Кардаиле на спаде половодья и составила 35 мг/л (см. табл. 2). На Купаве максимальная мутность воды на пике половодья оценивается в 55 мг/л. В межень мутность воды на Кардаиле составляла около 5 мг/л, р. Купава в летнюю межень пересыхала, сток наносов отсутствовал.

Сток взвешенных наносов р. Купавы за период наблюдений (с 24 февраля по 23 августа 2023 г.) составил 2221 т, или 6,05 т/км², из которых за период основной волны половодья (с 28 февраля по 19 марта 2023 г.) прошло более 99%. Таким образом, этот объем стока взвешенных наносов можно принять за годовой.

Взвешенные наносы р. Кардаил в половодье состоят из частиц менее 0,1 мм. Распределение гранулометрического состава частиц взвеси имеет два пика: в области значений 0,01–0,05 и 0,001–0,005 мм (рис. 6, А).

В сужениях русла р. Кардаил влекомые наносы отсутствуют, на дне вскрываются плотные сизо-серые глины с включением карбонатных конкреций длиной до 5 см. Кровля этих глин прослеживается в уступе низкой поймы на высоте 0,3 м над межнным урезом. Распределение гранулометрического состава образца этих глин идентично составу взвешенных наносов (см. рис. 6, Б). Содержание частиц менее 0,005 мм составляет 43% и частиц 0,005–0,05 мм – 56%, объемная масса образца естественной влажности – 2,02 т/м³. Ориентировочные неразмывающие придонные скорости потока для таких глин по [Мирицхулава, 1988, с. 183] составляют 0,45 м/с.

На Купаве в обсохших во время межени сужениях русла влекомые наносы также отсутствуют. В уступах низкой поймы Кардаила и Купавы вскрываются тяжелые буровато-серые суглинки с прослоями растительного детрита, образовавшиеся, вероятно, путем отложения наилка и ежегодного отмирания тростника.

В расширениях русла со дна ведром для отбора наносов в конце половодья зачерпывается полужидкий ил темно-серый и темно-коричневый с ракушками. Распределение гранулометрического состава частиц донных отложений в расширениях русел Кардаила и Купавы идентично и напоминает распределение грансостава глин в сужении русла, но со срезанным пиком в области более мелкой фракции (0,001–0,005 мм) (см. рис. 6, В, Г).

Половодье 2023 г. на р. Кардаил (г.п. хут. Андреевский) было вторым по величине максимальных расходов и уровней воды за последние 16 лет, уступив только половодью 2018 г. [Автоматизированная..., 2023; Уровень воды..., 2023]. Результаты натурных наблюдений 2022–2023 гг. показали, что современный водный поток не способен производить существенных деформаций русла, высокие берега которого заросли степной растительностью с плотной дерниной. Редкие следы размыва в виде оголенных корней тростника присутствуют на уступах низкой поймы в сужениях русла, в то время как уступы высокой поймы практически не имеют следов эрозии за исключением небольших локальных участков повреждения дернового покрова ледоходом и выпасом скота. Высокое половодье 2023 г. с довольно мощным ледоходом не сопровождалось нарушением дернового покрова береговых откосов, за исключением единичных фрагментов длиной до 3–5 м, также не отмечено формирование аккумулятивных форм, т. е. русло является очень устойчивым.

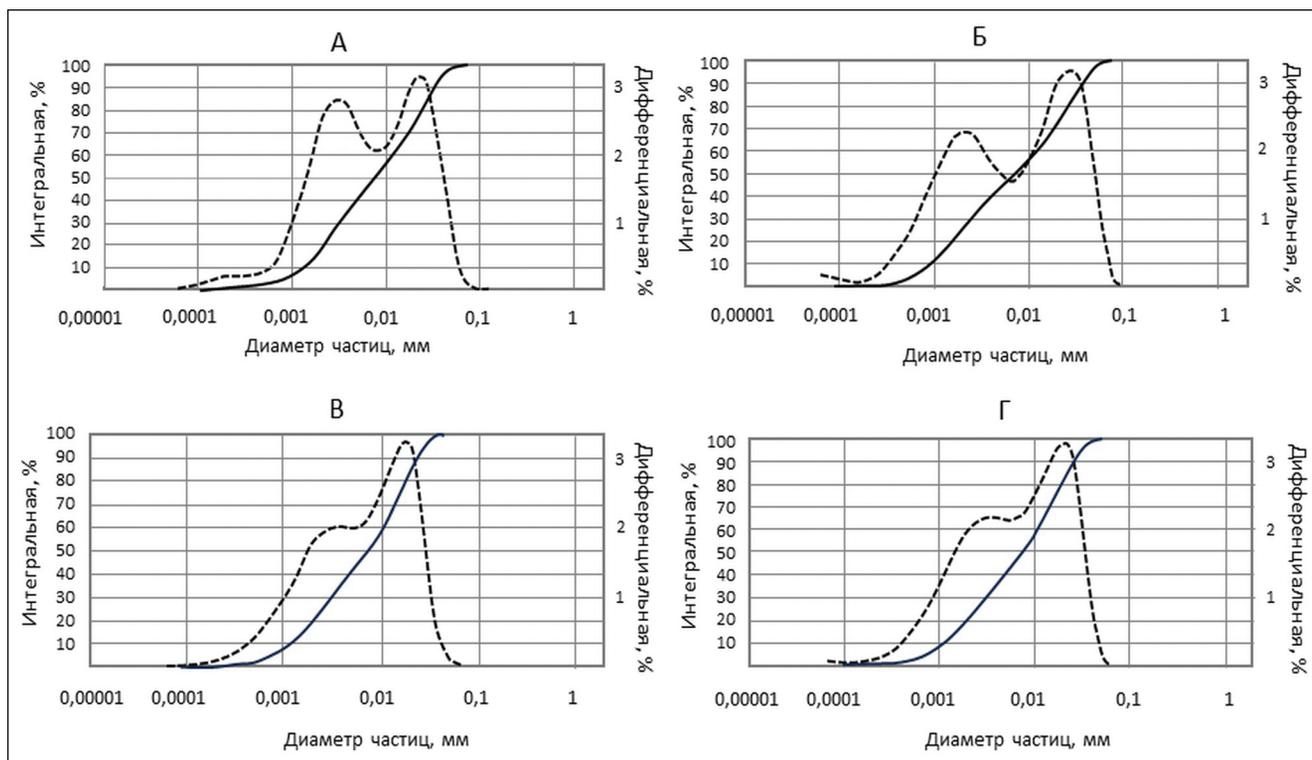


Рис. 6. Гранулометрический состав русловых отложений и взвешенных частиц в воде, выраженные в % объема: А – взвешенные частицы в воде р. Кардаил в конце половодья (17.03.2023); Б – выходы глин на дне в сужении русла реки Кардаил; В – донные илистые отложения в расширении русла р. Кардаил; Г – донные илистые отложения в расширении русла р. Купавы. Сплошная линия – кумулятивная кривая (левая шкала); пунктирная линия – распределение по размерам частиц (правая шкала)

Fig. 6. Grain-size composition of channel sediments and suspended particles in water, presented in % volume: А – suspended particles in the water of the Kardail River at the end of spring flood (March 17, 2023); Б – clay outcrops in the narrowing of the Kardail River channel; В – deposits in the channel extension of the Kardail River; Г – deposits in the channel extension of the Kupava River. Solid line – cumulative curve (left scale); dashed line – distribution by particle size (right scale)

Вероятно, малая интенсивность размыва дна и берегов также объясняется плотными глинистыми отложениями, в которых формируются русла исследованных рек. Неразмывающие придонные скорости потока (0,45 м/с и выше) достигаются только в короткий период половодья в сужениях русла, где поток концентрируется. Здесь вследствие высоких скоростей потока аккумуляция наносов отсутствует и преобладает тенденция к медленному врезанию. На низкой пойме, внутри окаймляющих русло тростниковых зарослей, скорости потока резко падают, и, напротив, идет медленное накопление наносов и растительного детрита (отмершего тростника), за счет чего она растет в высоту.

Тонкий состав размываемых пород приводит к тому, что все наносы переходят во взвешенное состояние, это подтверждается схожестью кривых распределения грансостава размываемых вмещающих глин и взвеси в воде, а также отсутствием аккумулятивных форм. В расширениях русел скорости потока резко снижаются, наиболее крупные частицы взвеси (0,01–0,05 мм) оседают. Оседание из взвеси более крупных частиц выражается в пре-

обладании пылеватых фракций в грансоставе донных отложений в расширениях в отличие от двухмодального распределения взвешенных наносов (см. рис. 6). Свежеотложенные частицы алеврита в расширениях русел легко взмучиваются потоком повторно, так как размывающие скорости свежеотложенного наилка существенно ниже, чем плотных глин [Мирцхулава, 1988]. Тонкие частицы долго не оседают, и большая их часть выносится потоком вниз по течению. Поэтому заиление глубоких расширений русла в современных условиях происходит крайне медленно. Рельеф дна в расширениях русла, в том числе расположение наибольших глубин в верхней по течению части четки, наличие локальных повышений дна, являются следствием перераспределения водным потоком осевшего в них наилка. Придонных скоростей, не превышающих 0,3 м/с, недостаточно для размыва коренных глин, но достаточно для перемещения свежеотложенного и слабо уплотненного ила.

Невысокие темпы размыва берегов подтверждаются относительно низкими значениями мутности воды и малым стоком наносов. Модуль стока взве-

шенных наносов р. Купавы в многоводном 2023 г. составил $6,05 \text{ т/км}^2$, что является весьма небольшой величиной для освоенной степи Русской равнины, где в среднем для рек с площадями водосбора менее 1000 км^2 он оценивается в 30 т/км^2 в год [Голосов, 2006]. При этом основным источником взвешенных наносов рек является русловая эрозия. Смыв с пашни в пределах Хоперско-Бузулукской равнины не превышает 1 т/га (100 т/км^2) [Белоцерковский и др., 1983], большая часть этих наносов не доходит до рек в связи с наличием широкой плоской нераспахиваемой поверхности высокой поймы, а в последние годы – еще и со снижением поверхностного стока в период половодья [Долгов и др., 2020]. В связи с этим заиления русла практически не происходит.

Незатапливаемая поверхность высокой поймы и несоответствие ширины современного русла шагу излучин $L/B = 15 \div 40$, где B – ширина русла, L – шаг излучин, при нормальных значениях $L/B = 5 \div 7$ [Чалов, 2011], свидетельствуют о существенно меньшей величине современного максимального стока воды, по сравнению с руслоформирующими максимальными расходами воды в период образования излучин. Низкая пойма, протягивающаяся вдоль современного русла, вероятно, образовалась в пределах русла прежнего более многоводного водотока, сформировавшего излучины и высокие уровни поймы. При уменьшении стока воды, мощности потока малых рек оказалось недостаточно для формирования современных излучин меньшего размера, и он унаследовал древние большие излучины, уменьшив ширину русла на их крыльях. При этом меньшая по размерам р. Купава полностью сохранила плавные очертания больших излучин, а более многоводный Кардаил на некоторых участках сформировал вторичные изгибы русла, маркируемые средней поймой, в результате чего размеры и форма его излучин имеют большое разнообразие.

Расположение наиболее крупных четок соответствует расположению плесов древнего меандрирующего русла, поэтому четковидные расширения русла вполне могут являться его реликтами. В то же время на некоторых отрезках рек количество четок, превышает нормальную ($5\text{--}7$ ширины русла) частоту расположения плесов. Это, а также

наличие четковидных стариц на высокой пойме может свидетельствовать и о других сценариях формирования озеровидных расширений русла, в том числе криогенных. Однозначно можно лишь утверждать, что образование расширений русел рек Кардаил и Купава не связано с карстовыми процессами, так как карстующиеся породы в их бассейнах отсутствуют.

Анализ географического распространения озеровидных расширений русла в комплексе с детальными геолого-геоморфологическими обследованиями поймы позволят уточнить генезис и возраст четковидных русел.

ВЫВОДЫ

Современный максимальный сток воды малых степных рек Кардаил и Купава существенно ниже максимального (руслоформирующего) стока в период образования излучин этих рек. Об этом свидетельствует несоответствие размеров речных излучин современной ширине русла.

В настоящее время в условиях снижения поверхностного водного стока и уменьшения руслоформирующих максимальных расходов воды русла исследуемых рек очень устойчивы. Высокая пойма затапливается крайне редко, существенная береговая эрозия и горизонтальные русловые деформации отсутствуют, сток наносов низкий и имеет преимущественно русловую генезис.

Значительная часть четковидных расширений по расположению соответствует бывшим плесовым участкам древнего извилистого русла, унаследованного современным водным потоком. Вероятнее всего, большинство четок являются длительно сохраняющимися фрагментами глубоких плесов, тогда как разрастание тростника на бывших перекатных участках приводит к формированию низкой поймы и образованию сужений русла. Однако нельзя исключить других, в том числе криогенных, факторов образования древних глубоких плесов.

Сохранению четковидной формы русла способствуют глинистый состав пород, низкие темпы эрозии и аккумуляции, а также небольшой сток наносов, препятствующий заполнению глубоких озеровидных расширений.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00008, <https://rscf.ru/project/23-27-00008>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белоцерковский М.Ю., Докудовская О.Г., Кирюхина З.П. и др. Количественная оценка эрозионноопасных земель бассейна Дона // Эрозия почв и русловые процессы. 1983. Вып. 9. С. 23–41.
- Варенцова Н.А., Гречушников М.Г., Повалишников Е.С. и др. Влияние климатических и антропогенных факторов на весенний сток в бассейне Дона // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 5. С. 91–108.

- Голосов В.Н. Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных равнин. М.: ГЕОС, 2006. 296 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Центрально-Европейская. Лист М-38. Волгоград. Объяснительная записка. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2009. 399 с.
- Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А. Ландшафтно-гидрологические изменения в бассейне Дона // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 674–685.
- Иванова Н.Н., Голосов В.Н., Панин А.В. Земледельческое освоение территории и отмирание рек Европейской части России // Геоморфология. 1996. № 4. С. 53–60.
- Кичигин А.Н. Причины деградации русел малых рек Волгоградской области // Геоморфология. 1992. № 1. С. 56–62.
- Мирихулава Ц.Е. Основы физики и механики эрозии русел. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 304 с.
- Основные гидрологические характеристики водных объектов бассейна реки Дон: научно-прикладной справочник / под ред. В.Ю. Георгиевского. СПб.: Свое издательство, 2020. 262 с.
- Панин А.В., Сидорчук А.Ю., Власов М.В. Мощный поздневалдайский речной сток в бассейне Дона // Известия РАН. Серия географическая. 2013. № 1. С. 118–129.
- Рябуха А.Г., Поляков Д.Г. Особенности распространения, морфологическое строение и механизмы формирования четковидных русел малых рек степной зоны Оренбургской области // Успехи современного естествознания. 2020. № 4. С. 146–150.
- Сидорчук А.Ю., Панин А.В. Геоморфологические подходы к оценке величины речного стока в геологическом прошлом (ст. 1. Морфометрические зависимости) // Геоморфология. 2017. № 1. С. 55–65.
- Тарбеева А.М., Крыленко И.В., Сурков В.В. Озеровидные расширения русел рек степной зоны и возможные причины их формирования (бассейн р. Урал в районе г. Орска) // Геоморфология. 2016. № 1. С. 73–81.
- Чалов Р.С., Ботавин Д.В., Варенов А.Л., Завадский А.С., Тарбеева А.М. Формирование русел малых рек Приволжской возвышенности в условиях многовекового сельскохозяйственного освоения // География и природные ресурсы. 2018. № 3. С. 86–94.
- Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 2: Морфодинамика речных русел. М.: КРАСАНД, 2011. 960 с.
- Чернов А.В. Современное развитие малых рек центральных районов европейской части СССР // Малые реки Центра Русской равнины, их использование и охрана. М.: МО ГО СССР, 1988. С. 17–25.
- Leopold L.B., Wolman M.G. River meanders, *Bulletin of the geological society of America*, 1960, vol. 71, p. 769–794.
- Williams R.T., Fryirs K.A. The morphology and geomorphic evolution of a large chain-of-ponds river system, *Earth Surf. Process. Landforms*, 2020, vol. 45, p. 1732–1748, DOI: 10.1002/esp.4842.
- Электронные ресурсы*
- Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения 11.10.2023).
- Лобанова Н.А. Особенности сельскохозяйственного районирования Волгоградской области // Электронный научно-образовательный журнал ВГСПУ «Грани познания». 2014. № 4(31). URL: www.grani.vspu.ru (дата обращения 30.09.2023).
- Погода и климат. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/34240.htm> (дата обращения 30.09.2023).
- Расписание погоды Rp5.ru. Архив погоды в Урюпинске. URL: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Урюпинске (дата обращения 15.09.2023).
- Уровень воды в реке Кардаил (х. Андреевский). Архивные данные. URL: <https://allrivers.info/gauge/kardail-h-andreevskiy/waterlevel> (дата обращения 01.04.2023).

Поступила в редакцию 27.11.2023

После доработки 25.01.2024

Принята к публикации 14.02.2024

MODERN PROCESSES IN THE BEADED CHANNELS OF STEPPE RIVERS OF THE KHOPER-BUZULUK PLAIN

A.M. Tarbeeva¹, I.V. Krylenko², V.V. Surkov³, N.M. Mikhailova⁴

¹⁻⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes

¹ Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: amtarbeeva@yandex.ru

² Scientific Researcher; e-mail: i-krylenko@yandex.ru

³ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: vita.surkov@yandex.ru

⁴ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: nmmikhailova@yandex.ru

Beaded-shaped channels (or chain-of-ponds), characterized by alternating lake-like extensions and narrow runs, are widespread on small rivers of the steppe zone of Russia. Extensions of channels – beads (pools or ponds), with a depth of up to 5–6 m, are of great importance for cattle breeding, providing a watering place during the dry periods of the year, when the flow of small rivers stops. However, the mechanisms of their specific channel shape formation are still debatable: it is explained by uneven siltation of channels, formation of whirlpools, groundwater discharge, karst processes or relict thermokarst. The aim of the study was to assess

the role of water flow in the formation and support of the beaded shape of river channels. The tasks were to reveal the hydrological regime of the Kardail and Kupava rivers, determine the hydrodynamics of the flow in beads and runs, describe the characteristics of erosion and accumulation processes and the sediment transport, as well as to identify relict elements of the channel and floodplain structure that do not correspond to modern water state. Water flow of the studied rivers shows a long-term decrease in snowmelt flood, as evidenced by the rare flooding of the high-level floodplain, low rates of bank dynamics, and the discrepancy between the size of meanders and the width of the channel. The annual sediment load of the studied beaded rivers is low, estimated at 6,05 t/km² in 2023. The reason is a low supply of sediments from the catchment area and low rates of erosion of channel bed and banks built of clay and silt. The present-day dynamics of water flow do not help the deepening and expansion of the beads. The flow reaches maximum speed (up to 1–1,3 m/s) in channel runs, while in channel extensions flow speeds drop to 0–0,3 m/s, supporting the sediment accumulation, despite the presence of whirlpools. A significant part of channel extensions is located on sites of former pools of the ancient meandering channel, inherited by the modern watercourse. On the former riffles the channel narrowed and a low-level floodplain was formed. Deep channel extensions were preserved due to the low sediment load and its fine composition, which prevents its rapid settling from the suspension. The results of the study suggest possible contribution of other factors to the formation of original deep pools, including the cryogenic ones.

Keywords: ponds, small rivers, siltation, suspended sediments, flow field

Acknowledgments. The work was financially supported by the Russian Science Foundation (project 23-27-00008, <https://rscf.ru/en/project/23-27-00008/>).

REFERENCES

- Belotserkovskii M.Yu., Dokudovskaya O.G., Kiryukhina Z.P., Larionov G.A., Mirgorodskaya N.N. Kolichestvennaya otsenka erozionnoopasnykh zemel' basseina Dona [Quantitative assessment of erosion-prone lands of the Don River basin], *Eroziya pochv i ruslovye protsessy*, 1983, iss. 9, p. 23–41. (In Russian)
- Chalov R.S., Botavin D.V., Varenov A.L., Zavadskii A.S., Tarbeeva A.M. Formirovanie rusel malykh rek Privolzhskoi vozvyshennosti v usloviyakh mnogovekovogo sel'skokhozyaistvennogo osvoeniya [Formation of small river channels of the Volga Upland under the centuries-long agricultural development], *Geografiya i prirodnye resursy*, 2018, no. 3, p. 86–94. (In Russian)
- Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika, t. 2, Morfodinamika rechnykh rusel* [Riverbed science: theory, geography, practice, vol. 2, Morphodynamics of river channels], Moscow, KRASAND Publ., 2011, 960 p. (In Russian)
- Chernov A.V. [Modern development of small rivers of the central regions of the European part of the USSR], *Malye reki Tsentral'noy Russkoi ravniny, ikh ispol'zovanie i okhrana* [Small rivers of the central Russian Plain, their usage and protection], Moscow, MO GO SSSR Publ., 1988, p. 17–25. (In Russian)
- Dolgov S.V., Koronkevich N.I., Barabanova E.A. Landscape-hydrological changes in the Don River basin, *Water Resources*, 2020, vol. 47, no. 6, p. 934–944.
- Goloso V.N. *Eroziionno-akkumulyativnye protsessy v rechnykh basseynakh osvoennykh ravnin* [Erosion and deposition processes in the river basins of cultivated plains], Moscow, GEOS Publ., 2006, 296 p. (In Russian)
- Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii 1:1 000 000 (tret'e pokolenie), *Seriya Tsentral'no-Evropayskaya, List M-38, Volgograd, Ob'yasnitel'naya zapiska* [State Geological Map of the Russian Federation 1:1 000 000 (third generation), Central European Series, Sheet M-38, Volgograd, Explanatory note], St. Petersburg, Cartography of VSEGEI, 2009, 399 p. (In Russian)
- Ivanova N.N., Goloso V.N., Panin A.V. Zemledeitel'skoe osvoenie territorii otmiranie rek Evropeiskoi chasti Rossii [Agricultural cultivation and small rivers degradation in European Russia], *Geomorfologiya*, 1996, no. 4, p. 53–60. (In Russian)
- Kichigin A.N. Prichiny degradatsii rusel malykh rek Vologodskoi oblasti [Causes of degradation of the channels of small rivers of the Vologda region], *Geomorfologiya*, 1992, no. 1, p. 56–62. (In Russian)
- Leopold L.B., Wolman M.G. River meanders *Bulletin of the geological society of America*, 1960, vol. 71, p. 769–794.
- Mirtskhoulava Ts.E. *Osnovy fiziki i mekhaniki erozii rusel* [Principles of Physics and Mechanics of Channel Erosion], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1988, 304 p. (In Russian)
- Osnovnye gidrologicheskie kharakteristiki vodnykh ob'ektov basseina reki Don: nauchno-prikladnoi spravochnik* [Basic hydrological characteristics of water bodies of the Don River basin: scientific and applied reference book], V.Y. Georgievsky (ed.), St. Petersburg, Svoe izdatel'stvo Publ., 2020, 262 p. (In Russian)
- Panin A.V., Sidorchuk A.Yu., Vlasov M.V. Moshchnyi pozdnevaldaiskii rechnoi stok v basseine Dona [High Late Valdai (Vistulian) Runoff in the Don River Basin], *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk, Seriya geograficheskaya*, 2013, no. 1, p. 118–129. (In Russian)
- Ryabukha A.G., Polyakov D.G. Osobennosti rasprostraneniya, morfologicheskoe stroenie i mekhanizmy formirovaniya chetkovidnykh rusel malykh rek stepnoi zony Orenburgskoi oblasti [Distribution, morphological structure and mechanisms of formation of bead-shaped channels of small rivers in the steppe zone of the Orenburg region], *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2020, no. 4, p. 146–150. (In Russian)
- Sidorchuk A.Yu., Panin A.V. Geomorfologicheskie podkhody k otsenke velichiny rechnogo stoka v geologicheskoy proshlom (st. 1, Morfometricheskoye zavisimosti) [Geomorphologic approach to river runoff evaluation in the geological past (paper 1, Regime Equations)], *Geomorfologiya*, 2017, no. 1, p. 55–65. (In Russian)
- Tarbeeva A.M., Krylenko I.V., Surkov V.V. Ozerovidnyye rasshireniya rusel rek stepnoi zony i vozmozhnye prichiny

- ikh formirovaniya (bassin r. Ural v raione g. Orska) [Lake-like extensions of the riverbeds in the steppe zone and possible causes of their formation (case study of the Ural River basin near the city of Orsk)], *Geomorfologiya*, 2016, no. 1, p. 73–81. (In Russian)
- Varentsova N.A., Grechushnikova M.G., Povalishnikova E.S., Kireeva M.B., Kharlamov M.A., Frolova N.L. Vliyaniye klimaticheskikh i antropogennykh faktorov na vesennii stok v basseine Dona [Assessment of climatic and anthropogenic impact on spring runoff in the Don River basin], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geog.*, 2021, no. 5, p. 91–108. (In Russian)
- Williams R.T., Fryirs K.A. The morphology and geomorphic evolution of a large chain-of-ponds river system, *Earth Surface Processes and Landforms*, 2020, vol. 45, p. 1732–1748, DOI: 10.1002/esp.4842.
- Web sources*
- Avtomatizirovannaya informatsionnaya Sistema gosudarstvennogo monitoringa vodnykh ob'ektov (AIS GMVO) [Automated information system of state monitoring of water bodies (AIS GMVO)], URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (access date 11.10.2023). (In Russian)
- Lobanova N.A. Features of agricultural zoning of the Volga Region, *Elektronnyi nauchno-obrazovatel'nyi zhurnal VGSPU "Grani poznaniya"* [Electronic scientific and educational journal of VGSPU "Facets of cognition"], 2014, no. 4(31), URL: [www.grani.vspu.ru http://www.pogodaiklimat.ru/history/34240.htm](http://www.pogodaiklimat.ru/history/34240.htm) (access date 30.09.2023). (In Russian)
- Pogoda i klimat [Weather and climate], URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/34240.htm> (access date 30.09.2023). (In Russian)
- Raspisanie pogody. Arkhiv pogody v Uryupinske [Reliable Prognosis. Weather archive in Uryupinsk], URL: https://rp5.ru/Arkhiv_pogody_v_Uryupinske (access date 15.09.2023). (In Russian)
- Uroven' vody v reke Kardail (kh. Andreevskii), Arkhivnye dannye [Water level in the Kardail River (Andreevsky settl), Archived data], URL: <https://allrivers.info/gauge/kardail-h-andreevskiy/waterlevel> (access date 01.04.2023). (In Russian)

Received 27.11.2023

Revised 25.01.2024

Accepted 14.02.2024

УДК 621.1(282.247.418)

ВОЛГО-КАСПИЙСКИЙ КАНАЛ В XVIII В.: ИСТОРИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ СУДОХОДНОГО МАРШРУТА

С.А. Котеньков¹, Р.Р. Макшаев², Д.М. Лобачева³, Е.Ю. Матлахова⁴

¹ Институт океанологии имени П.П. Шишова РАН

²⁻⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет

¹ Ст. науч. сотр., канд. ист. наук; e-mail: s_kotenkov@mail.ru

² НИЛ новейших отложений и палеогеографии плейстоцена, ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: radikm1986@mail.ru

³ Кафедра геоморфологии и палеогеографии, асп.; e-mail: lob.dascha@yandex.ru

⁴ Кафедра геоморфологии и палеогеографии, ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: matlakhova_k@mail.ru

В работе дается анализ гидрологического режима Волжской дельты, обусловленного взаимодействием реки и замкнутого бассейна Каспийского моря. Рассматривается его связь с колебаниями уровня Каспийского моря в районе устьев Волги на примере функционирования Яркового устья – места выхода староволжского фарватера в Каспийское море в XVIII в. На основе анализа документов, записок российских, европейских мореплавателей, карт и лоций XVIII–XIX вв., в которых представлены как сохранившиеся, так и вышедшие из употребления топонимы островов, мелей, проток Волжской дельты, установлено местонахождение устья. Рассмотрены вопросы истории исследования устья, картографирования, условий судоходства и причины прекращения его использования.

Выявлено влияние трансгрессивно-регрессивного режима Каспийского моря в перестройке гидрологической сети в низовьях дельты р. Волги для XVIII–XIX вв. Реконструированы маршруты судоходного Волго-Каспийского канала для исследуемого этапа времени. Установлены этапы смещения основного русла Волги в западном направлении. Рассмотрена неоднородность продвижения надводной части дельты Волги при понижении уровня моря для западной и восточной частей.

Ключевые слова: проблемы судоходства, уровни моря, мели устьевого взморья, обмеление фарватера

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.12

ВВЕДЕНИЕ

Волго-Каспийский морской судоходный канал представляет собой проход из Волги по дельтовым протокам в Каспийское море. В зоне устья фарватер проложен через мели устьевого взморья, представляющие серьезные проблемы для судоходства. Но поддержание этого, на первый взгляд, короткого промежутка реки (188 км) в надлежащем состоянии имеет для России важное значение как «проводника» торговых и культурных связей со странами Азии и Ближнего Востока. Со времени выхода Московского царства на берега Каспия (XVI в.) и освоения дельты мореплаватели использовали судоходный маршрут по Старой Волге. Современный Волго-Каспийский морской судоходный канал, проходящий по Волжской протоке Бахтемир, имеет лишь 200-летнюю историю.

Обмеление Волго-Каспийского канала создает препятствия для прохода по нему крупногабаритных торговых и пассажирских судов. Только в 2023 г. дважды суда сели на мель на Главном банке – протоке Бахтемир – Волго-Каспийский морской судоходный канал [В Волго-Каспийском..., 2023]. Банк – это участок крупного дельтового водо-

тока на его выходе на устьевое взморье, имеет русловое продолжение на взморье с глубинами до 1 м; некоторые углубляются искусственно [Локтионова и др., 2014].

Аналогичная ситуация с обмелением главного волжского фарватера происходила на протяжении всей истории его использования. Еще в середине XIX в. И.Н. Березин и К.П. Победоносцев высказывались о важности для России функционирования Каспийского трансграничного маршрута. Местом строительства морского судоходного канала было выбрано Камызякское направление [Победоносцев, Бабст, 1864]. В настоящее время Главный банк проходит по Волжской протоке Бахтемир. После открытия судоходства по Бахтемировскому направлению (нач. XIX в.) уже через 30 лет его русло обмелело, создав трудности для прохождения судов. В это время на расстоянии 80 верст (~85 км) от Астрахани до взморья располагалось пять участков обширных мелей, среди которых Ракушинская отмель имела глубины до 4,5 футов (1,35 м¹). Суда загружались и разгружались в открытом море с большими издерж-

¹ Здесь и далее по тексту перевод футов в метры выполнен авторами работы.

ками и опасностями, что сильно отражалось на торговле [Березин, 1850; Пельциг, 1863].

Указанные проблемы с судоходством на Волго-Каспийском канале существовали издревле, когда Главный банк проходил по рекам Болде, Бузану и Старой Волге [Бухарицин, Котеньков, 2022; Бухарицин и др., 2023]. В конце XVIII в. из-за обмеления перестал функционировать фарватер, проходивший по р. Старая Волга, по которому в течение 200 лет осуществлялось судоходство [Бухарицин, Котеньков, 2022].

Историографы в области изучения и картографии Каспийского моря [Соколов, 1852, 1855; Багров, 1912; Штейнберг, 1949; Берг, 1949; Греков, 1960; Княжецкая, 1964] основное внимание уделяли Каспийскому морю, игнорируя вопросы истории изучения Волжского устья. Весьма скудные сведения о начале исследований по Яровскому устью приведены Г.Ф. Миллером [Описание..., 1763]. Е.В. Гусарова приводила неизвестные и неопубликованные ранее чертежи Яровского устья и Каспийского моря [Гусарова, 2009]. М.Ф. Розен в своей работе кратко рассмотрел вопросы местоположения Яровского устья и Четырехбугорного рейда, истории их гидрографии и картографии и причин его обмеления, привел серию редких карт XVIII–XIX вв. [Розен, 1929]. Работа М.Ф. Розена имеет, на наш взгляд, ряд неточностей, вызванных отсутствием на то время обобщающих работ по изучению колебаний уровня Каспия и гидрологии дельты Волги. К тому же автор лишь бегло упомянул интересные записи английских авторов, путешествовавших по Каспию в XVIII в., сосредоточившись на данных, приводимых П.С. Палласом (1773), исследовавшим устье Урала и участки взморья Казахского сектора Каспия [Розен, 1929].

Настоящая работа посвящена исследованию Главного банка по Старой Волге и ее протокам – староволжскому направлению. Ее задачи – установление связи функционирования Яровского устья (месте выхода староволжского фарватера в Каспийское море в XVIII в.) как одного из элементов гидрологической системы дельты с колебаниями уровня моря; определение его точного местоположения, условий судоходства в староволжском направлении и историко-географическая реконструкция судоходного фарватера XVIII в. от г. Астрахани до указанного устья.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленных задач были использованы литературные материалы, документы, записки российских, европейских мореплавателей, карты и лоции XVIII–XIX вв., в которых представлены как сохранившиеся, так и вышедшие из употребления топонимы островов, мелей, проток

Волжской дельты. В работе также использовался опыт отечественных и зарубежных исследователей по реконструкциям палеогидрологических событий и их влияния на развитие рек и каналов. Так, Т. Беллотти с соавторами реконструировали диахронические изменения ландшафта равнины дельты Тибра (Италия) за последние 3000 лет с учетом природных (климат, повышение уровня моря, тектоника) и антропогенных (земледелие и животноводство, мелиорация, строительство портов, каналов и предприятий) воздействий [Bellotti et al., 2018]. М. Словик, проводивший изыскания в среднем течении реки Одра (западная Польша), где был проложен искусственный канал Северная Одра, установил, что до начала гидротехнических работ русло реки представляло собой крупную меандрирующую структуру [Słowik, 2013]. П. Мозци с соавторами посвятили работу исследованиям палеогидрографической и геоморфологической эволюции аллювиальной равнины вокруг г. Падуи (Италия) в течение последних тысячелетий и влиянию рек на становление ранних поселений на современной городской территории [Mozzi et al., 2010]. А. Лардж и Г. Петс на основе исторических документов и картографических материалов составили геоморфологическую реконструкцию развития реки Трент в Великобритании, позволившую установить характер участка реки в XVII–XVIII вв. (до зарегулирования ее русла) и выявить 28 старых русел [Large, Petts, 1996].

Работы ряда российских исследователей были посвящены реконструкции водных магистралей в эпоху Средневековья (IX–XIV вв.) для Волго-Каспийского и Балтийско-Каспийского торговых путей [Дубов, 1989; Джексон и др., 2007; Смокотина, 2012]. А.В. Постников [2019] провел исследования по истории создания четырех основных водных систем (Вышневолоцкой, Тихвинской, Мариинской, Северо-Двинской), соединявших в XVIII–XIX столетиях бассейны Каспийского и Балтийского морей.

На основе проанализированных материалов по истории Волжской дельты для XVIII–XIX вв. удалось установить период функционирования Яровского устья и реконструировать судоходный маршрут по Староволжскому фарватеру.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Устьевое взморье – это часть прибрежной зоны приемного водоема, прилегающая к дельте реки [Михайлов, 1997]. Для устьевой области Волги характерно наличие очень мелководного и широкого устьевого взморья. Эта особенность унаследована от более ранних (позднеплейстоценовых – голоценовых) этапов дельтообразования Волги [Михайлов, Исупова, 2014].

В районе устьевого взморья Волги начинаются серьезные препятствия для судоходства. Его гидрологический режим в XVIII в. мало чем отличался от современного, где широкая зона мелей, соединяющаяся с морским краем дельты, тянется до свала глубин отмелой зоны, распространяясь на десятки километров. Многие исследователи считают, что нарастание Волжской дельты идет главным образом за счет увеличения речных наносов, приносимых как Волгой, так и вследствие колебаний уровня моря [Валединский, Аполлов, 1928; Краснова, 1951; Колебания уровня..., 1956; Байдин, 1962; Леонтьев и др., 1977; Русаков, 1990; Нижняя Волга..., 2002; Иванов и др., 2006; Коротаев, 2011; Михайлов, Исупова, 2014].

К началу XVIII в. для устьевой части Волги имелись лишь карты А. Олеария [Olearius, 1647], Я. Стрейса [Straussens, 1678] и Э. Кемпфера (1692) [Гусарова, 2009], на которых точное обозначение границ Волжских мелей отсутствовало. По сообщениям голландского путешественника К. де Бруина (1703), при выходе из устья в море участки песчаных мелей помечались «воткнутыми древесными ветками» [Россия..., 1989].

Российский император предпринял серьезные усилия по составлению описаний и карт не только берегов Каспийского моря, но и самого сложного участка судоходного канала – устьевого взморья. По мнению М.Ф. Розена [1929], карта Яркового устья и Четырехбугорного рейда была составлена сподвижником Петра I Ф.И. Соймоновым в 1722 г.

В Петровский период для восточной части Каспия были составлены карты А.И. Кожина (1718) и В.А. Урусова (1718), по данным А. Бековича-Черкасского [Берг, 1949]. Карты Волжского устья тех лет не сохранились, но известно, что через него проходили флотилии трех экспедиций А. Бековича-Черкасского 1715–1717 гг. [Княжецкая, 1964]. В экспедиции 1716 г. было собрано от 69 до 100 парусных судов [Штейнберг, 1949], это была самая крупная флотилия, когда-либо проходившая по Волго-Каспийскому пути.

Впервые в источниках Ярковокское устье упомянуто Дж. Беллем в августе 1716 г. на пути из Астрахани в Персию [Белль, 1896]. Остров Ярки на протоке в устье Волги изображен на карте Нижней Волги Э. Кемпфера (1692), который посетил Астрахань в 1683 г. [Гусарова, 2009]. Дж. Белль в 1716 г. указывал, что «на расстоянии от устья до трех песчаных насыпей, называемых Четыре Бугра, от шести (1,8 м) до семи (2,1 м) футов глубины, что делает этот проход чрезвычайно опасным во время непогоды» [Белевы путешествия..., 1776].

В период подготовки к Персидскому походу по указанию Петра I в 1719 г. К.П. Ван-Верден,

Ф.И. Соймонов и В.А. Урусов произвели съемку побережья Каспийского моря. Лейтенанты Дорошенко и Золотарев, по сообщению Г.Ф. Миллера, исследовали водный путь от устья Волги до устья р. Терека [Описание..., 1763]. По окончании экспедиции Ф.И. Соймонов лично передал государю первые карты и журналы исследованных районов [Соколов, 1852].

В 1720 г. в Санкт-Петербурге была издана карта Каспийского моря от устья Яркового до залива Астрабадского, где впервые были изображены два Волжских устья: Ярковокское (Embouchure d Yargof) и Уваринское (Embouchure d Ouvarin) (рис. 1).

Эта карта имеет ряд неточностей. Остров Четырехбугорный изображен на одной линии с Ярковокским устьем, что привело Л.С. Берга [1949] к ошибочному выводу о том, что это устье находилось в районе указанного острова. В действительности, остров Четыре Бугра расположен ниже по течению, к ЮЮВ от указанного устья. Уваринское устье изображено в восточной части дельты, что также неверно, так как протока Увара расположена в центральной ее части.

Для оценки точности сведений о Волжском устье, собранных исследователями, нами был реконструирован путь флотилии Петра I (более 400 судов) во время Персидского похода в июле 1722 г. по маршруту от г. Астрахани к о. Четыре Бугра (рис. 2, А). В качестве источников использовались записки участников похода Ф.И. Соймонова [Описание..., 1763], Дж. Белля [Белль, 1896] и Походный журнал 1722 г. [1855]. Подавляющее большинство судов являлись плоскодонными кораблями и имели осадку 5–6 футов (1,5–1,8 м) [Бороздин, 1853]. Весь груз с данных судов перегружался на грузовые суда, которые заранее отправили к о. Четыре Бугра. 18 июля 1722 г. флотилия взяла старт от Астрахани и дошла до Иванчуга [Описание..., 1763; Походный..., 1855], т. е. свернула в протоку Старая Волга. В записках Г.Ф. Миллера и в Походном журнале 1822 г. [1855] отмечено, что утром флотилия прошла последний учуг Дворцовый и прибыла к Ярковокскому устью. Последний дворцовый учуг – Урустопа – располагался ниже по течению от Иванчуга на протоке Уруслово плесо (современная река Ямная и Старая Волга), путь к которой проходил по Старой Волге, через протоку Сомовка (сохранила свое название). Место для ночлега в Ярковокском устье было выбрано не случайно, здесь глубины составляли 8–9 футов (2,4–2,7 м) [Описание..., 1763]. В Походном журнале 1822 г. указано, что суда, миновав устье, только к вечеру из-за зоны мелей прибыли к о. Четыре Бугра.

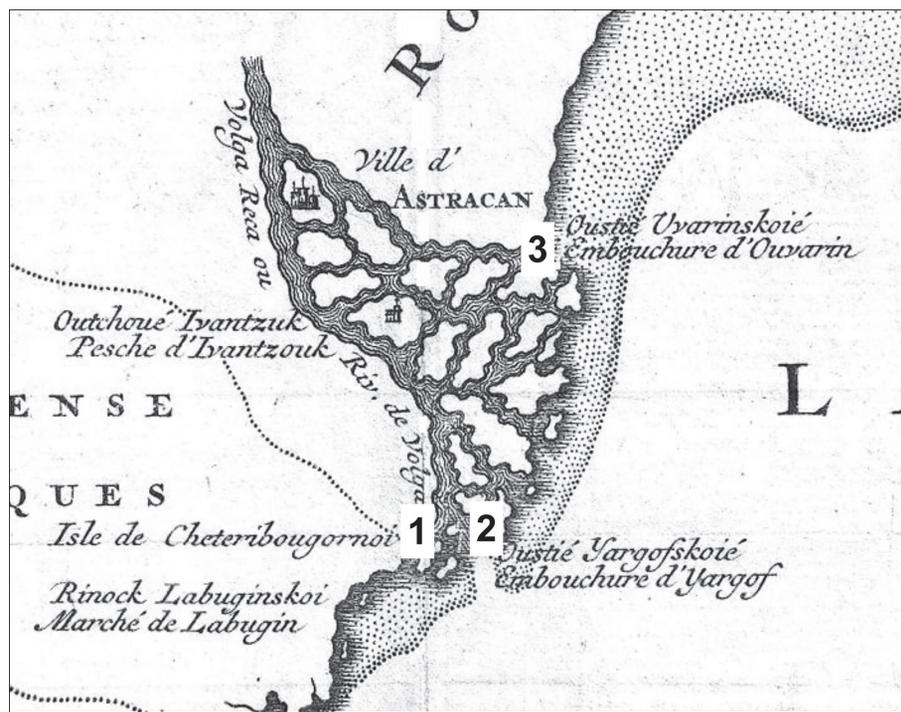


Рис. 1. Фрагмент «Картины плоской моря Каспийского от устья Яркового до залива Астрабацкого», 1720 г.:
1 – остров Четырехбугорный; 2 – Ярковокское устье; 3 – Уваринское устье

Fig. 1. Fragment “Pictures of the flat Caspian Sea from the mouth of the Yarkovsky to the Gulf of Astrabatsky”, 1720:
1 – Chetyrech bugorny Island; 2 – Yarkovskoe mouth; 3 – Uvarinskoye mouth

Приведенные источники позволяют предположить, что у мореплавателей к началу Персидского похода (июль 1722 г.) уже имелись описания и карта главного староволжского фарватера, позволившие пройти маршрут по рекам Волга, Старая Волга, Сомовка, Уруслово плесо (Ямная) и мели устьевого взморья к о. Четыре Бугра. Весь маршрут занял двое с половиной суток, что не удавалось ранее ни одному судну. Остались невыясненными местоположение устья и маршрут судов через мели к указанному острову.

Воспользуемся приводимыми в работе М.Ф. Розена [1929] картами из атласа Ф.И. Соймонова (рис. 3). К сожалению, на изображенной на этом рисунке карте «от устья Яркового до островов Туманных и Четырех Бугров» указаны только промеры глубин, но отсутствуют ориентиры – географические названия.

Ф.И. Соймонов так описывает Ярковокское устье: «Ярки есть крутой берег при устье главнейшего рукава реки Волги, и по этой причине Ярковокским устьем называемый» [Описание..., 1763].

В соответствии с картой Ф.И. Соймонова (рис. 4) Ярковокский остров и одноименное устье расположены на реке Яровейке ниже по течению от острова Седлистова (современное с. Седлостое) и Житного бугра (современное с. Житное), располагавшихся на р. Волга. Изображенный на карте участок р. Волги в XVII–XIX вв. именовался

Урусловым плесом (современная р. Ямная и Старая Волга). К. де Бруин в 1703 г. упоминает Ярковокский остров [Россия..., 1989]. Следующая группа островов-бугров расположена ниже по течению в окрестностях с. Мумра, как раз на левом берегу протоки Бакланья.

По мнению М.Ф. Розена [1929], Ярковокский бугор – это бугор, на котором расположено с. Мумра, а реки Яровейки уже не существует. Мы не можем с этим согласиться. На карте Каспийского моря А.Е. Колодкина [Атлас..., 1826] изображены остров Мумра и расположенный рядом с ним байк (отмель) Ярковокской – бывший бугор Ярковокский, превратившийся в байк-отмель из-за поднятия уровня моря (рис. 4). Река Яровейка, являвшаяся продолжением протоки Бакланья, стала именоваться «фарватер Бакланий», поскольку река Яровейка в 1820-х гг. была затоплена морем (см. рис. 4). Напомним, что в 1720-х гг. уровень моря составлял –25,7 м абс., а через 100 лет, во время замеров глубин А.Е. Колодкиным (1809–1817), уровень поднялся до –24,0 м абс. [Варущенко и др., 1987].

По нашему мнению, о. Ярковокский сохранился до сих пор – это бэровский бугор, расположенный к югу от современного села Мумра, а река Яровейка – это сохранившаяся современная протока Бакланенок и ее продолжение – река Бакланья (см. рис. 2, Б).

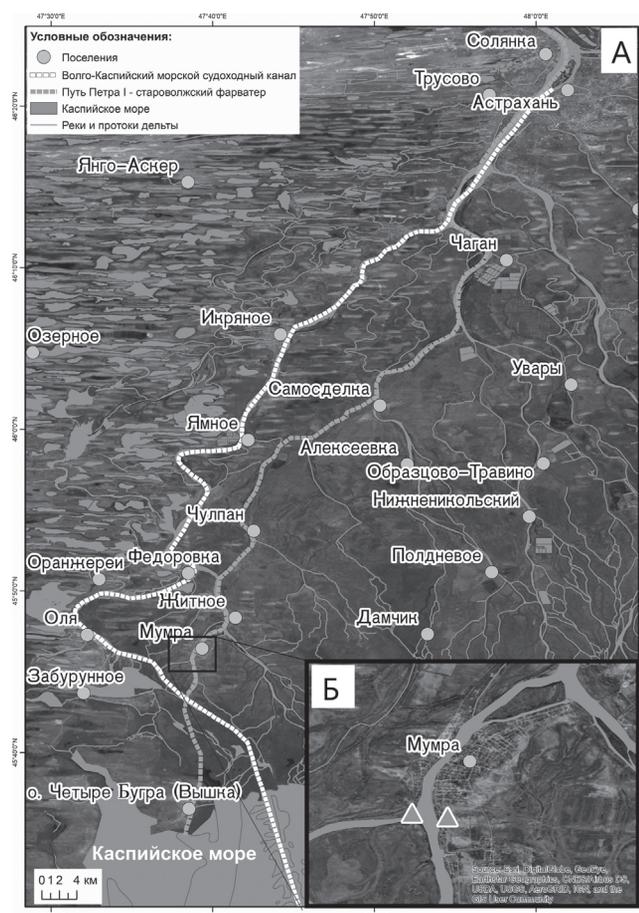


Рис. 2. Современная карта дельты Волги с обозначениями маршрута флотилии Петра I (1722 г.), Яркковского устья и Яркковского острова: А – маршрут флотилии Петра I на участке Астрахань – о. Четыре Бугра в июле 1722 г. по староволжскому фарватеру и расположение Волго-Каспийского морского судоходного канала в дельте р. Волги на современном этапе; Б – расположение Яркковского устья и Бугра Яркковский (Ярки)

Fig. 2. Modern map of the Volga Delta with markings of the route of Peter the Great's flotilla (1722), Yarkovsky mouth and Yarkovsky island: A – the route of the flotilla of Peter I on the site Astrakhan – island Chetyre Bugra in July 1722 along the “Old Volga” fairway and location of the Volga-Caspian sea canal in the Volga river delta at the present stage; B – location of Yarkovsky mouth and Yarkovsky hill hock (Yarki)

Следуя материалам Ф.И. Соимонова (1853) и опубликованной Е.В. Гусаровой [2009] карте, проследим фарватер судового хода от Яркковского устья до о. Четыре Бугра (рис. 5). Ф.И. Соимонов так описал направление реки Яркковской в море, по которому следовало держаться маршрута и соответствующих глубин: «Устье Волги реки протока Яркковская протекает в море Каспийское через румб ZW между банками, держась глубин 8–10 фут (2,4–3 м) и плыть к острову Малая Туманная Лопатина (современный остров Туманка Поперечный) и затем до острова Четырехбугорного и далее в море между кос (мелей) Каклуской и Малиновой» (местонахождение неизвестно) [Соимонов, 1783].

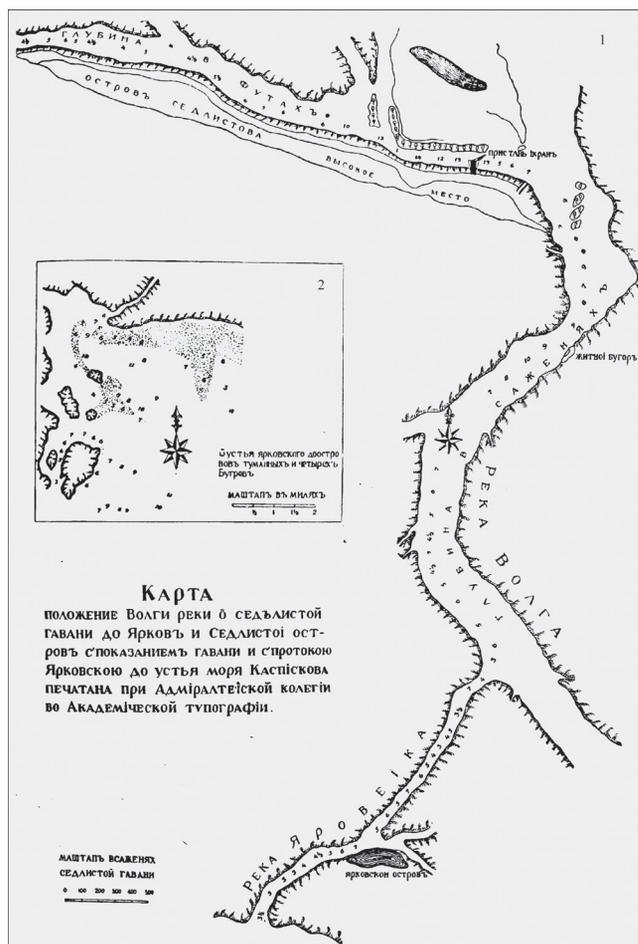


Рис. 3. Карты из Атласа Ф.И. Соимонова [Розен, 1929]: 1 – «Положение Волги реки от Седлистой гавани до Ярк и Седлистой остров с показанием гавани и с протокою Яркковскою до устья моря Каспийского»; 2 – «От устья Яркковского до островов Туманных и Четырех Бугров»

Fig. 3. Maps from the atlas of F.I. Soimonov [Rozen, 1929]: 1 – “The position of the Volga River from Sedlistaya Harbor to Yarkov and Sedlistaya Island with an indication of the harbor and with the Yarkovskaya channel to the mouth of the Caspian Sea”; 2 – “From the mouth of the Yarkovsky to the Tumannyi and Chetyre bugra islands”

Остается уточнить расстояние от устья до о. Четыре Бугра. В источниках указаны противоречивые данные: К. де Бруин приводит цифру 6 верст [Россия..., 1989], Д. Белль – 60 верст [Белевы путешествия..., 1776]. По карте А.Е. Колодкина (1826) промер от данного острова до о. Четыре Бугра имеет расстояние 16–18 верст. К 1726 г. остров Яркковский становится гаванью для швартовки судов [Описание..., 1763]. В документах 1731–1733 гг. этот остров именуется Яркковским портом, где располагались провиантские склады и госпиталь [Западный Прикаспий..., 2020].

Согласно Лоции Каспийского моря Т. Вудруфа (1740–1743), ее автор называет Яркковский фарватер

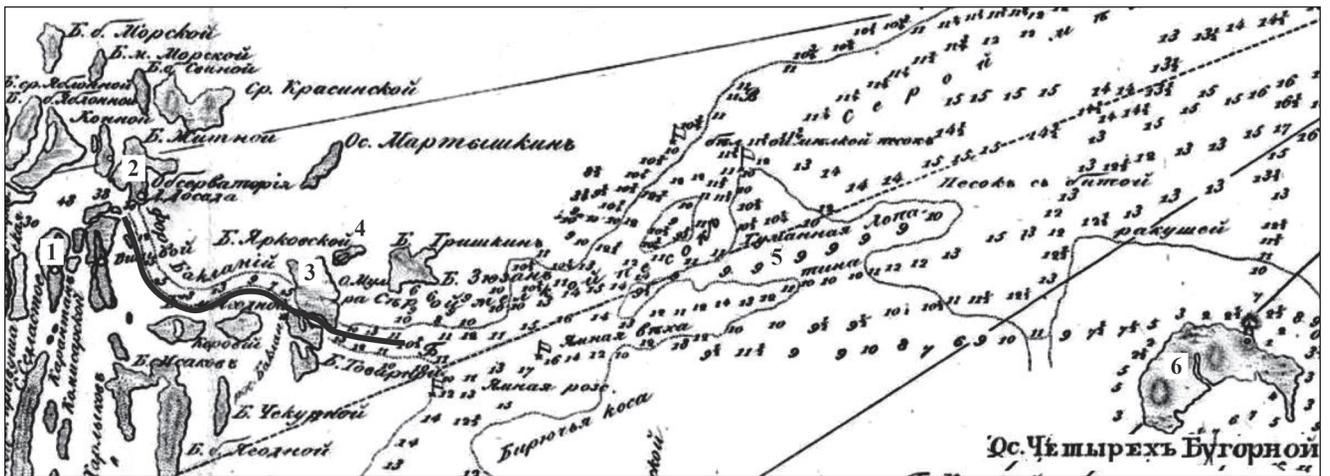


Рис. 4. Фрагмент атласа Каспийского моря [Атлас..., 1826]:

1 – село Седлистое; 2 – село Досада (Житное); 3 – остров Мумра; 4 – байк Яркковский; 5 – мель Туманная Лопатина; 6 – о. Четырех Бугорной; черной линией выделен фарватер Бакланий

Fig. 4. Fragment of the Caspian Sea Atlas [Атлас..., 1826]:

1 – the village of Sedlistoe; 2 – the village of Dosada (Zhitnoye); 3 – the island of Mumra; 4 – the Yarkovsky bay; 5 – the shallow Tumannaya Lopatina; 6 – the island of Chetyrech bugornoy; black line indicates the Baklany fairway



Рис. 5. Федор Соимонов. Частная карточка с карты Северного Каспия. Показан о. Четыре Бугра, 1726 г.

Фотокопия с карты из «коллекции Делиля» – собрания русских карт, тайно вывезенных во Францию и хранящихся в Национальной библиотеке в Париже. Отдел картографии БАН. Петербург. Надписи на карте переведены с французского на русский язык С.А. Котеньковым

Fig. 5. Fedor Soymonov. Private card from the map of the Northern Caspian. The Chetyre Bugra island is shown, 1726.

A photocopy of a map from the "Delille collection" – a collection of Russian maps smuggled to France and stored in the National Library in Paris. Department of Cartography BAN. Petersburg. The inscriptions on the map were translated from French into Russian by S.A. Kotenkov

«очень хорошим» [Люция Каспийского моря..., 1852] с глубинами 7,5 футов (2,25 м), а при нагонных ЮВ ветрах до 9–10 футов (2,7–3 м). Но уже к 1740 г. остров Ярковоказ оказался затопленным, а все постройки с его территории перенесли на острова Седлистый и Краса (с. *Краса*), расположенные севернее. Но Ярковоказ устье по-прежнему, как отмечает Т. Вудруф, «служило местом, откуда суда считают свой отходный путь и к которому держаться, возвращаясь с моря» [Люция Каспийского моря..., 1852]. Это означает, что в этот период уровень Каспийского моря начал повышаться. Записи Д. Хенвея подтверждают эти данные: «В 1556 г. на 9 лиг на юг и юго-восток от Четырех Бугров глубина 5 футов, в 1722 г. – 6 футов, а в 1740-е гг. – 12 футов. Вода в продолжение тридцати лет возвысилась значительно и затопила Русский берег почти на 20 верст, между Астраханью и устьем Волги» [Соколов, 1855]. В своей лоции Т. Вудруф отметил, что «для плавания через Ярковоказ байк, продвигаясь к о. Четыре Бугра, нужно миновать камыши» [Люция Каспийского моря..., 1852]. В Астрабаде, за пятьдесят лет до этого (кон. XVII в.), «по заливу могли переходить ослы, а ныне там 2 сажени глубины» [Соколов, 1855]. И.Я. Лерх в 1734 г. приводит данные, что «нижняя стена в г. Баку стоит в воде» [Филиппов, 1890], а в 1714 г. она «находилась при море, где было сухое место». Высокий уровень моря сохранялся вплоть до начала XIX в. [Колебания уровня..., 1956].

В 1814–1817 гг. началось падение уровня моря [Колебания уровня..., 1956]. А.П. Соколов, используя сообщения авторов XVIII в. и карты XVIII и XIX вв., сопоставил глубины у островов в разных частях моря за период с 1719 по 1814 г. Им отмечено, что между 1719–1730 гг. эти острова были «над водой», в 1743 – «под водой», а в 1809–1814 гг. – снова «над водой» [Филиппов, 1890]. Данные факты подтверждаются исследованиями [Варущенко и др., 1987], установившими, что в период с 1740-х гг. и до середины 1810-х гг. уровень моря сохранялся на отметках от –23,8 до –23,3 м абс.

Соответственно и глубины исследованного нами фарватера в этот период не изменялись. Т. Вудруф сообщал, что в 1740-х гг. возле Ярковоказ байка глубина составляет 8 футов [Соколов, 1855]. Но с середины 1810-х гг. Каспий испытывал уже регрессивную стадию, и его уровень в 1820-х гг. опустился на 1 м до отметки –25,0 м абс. [Варущенко и др., 1987]. На составленной карте западной части дельты Волги (рис. 6), отображены границы морского края дельты в 1720-х гг. (–25,7 м абс.), период подъема уровня моря с 1740-х гг. по начало XIX в. (–23,5 м абс.), период снижения уровня моря в 1830-х гг. до –25,7 м абс.

Мы не можем согласиться с Л.С. Бергом [1949], который, сославшись на статью М.Ф. Розена [1929], сделал вывод, что последний раз Ярковоказ устье было упомянуто в 1745 г. в описи Безобразова, а в 1766 г. устья уже не было. Приводимые в статье М.Ф. Розена карты (черт. 4, 5) схематичны, по большей части содержат промеры глубин. И на них попросту отсутствует ряд островов, существовавших на период составления этих карт.

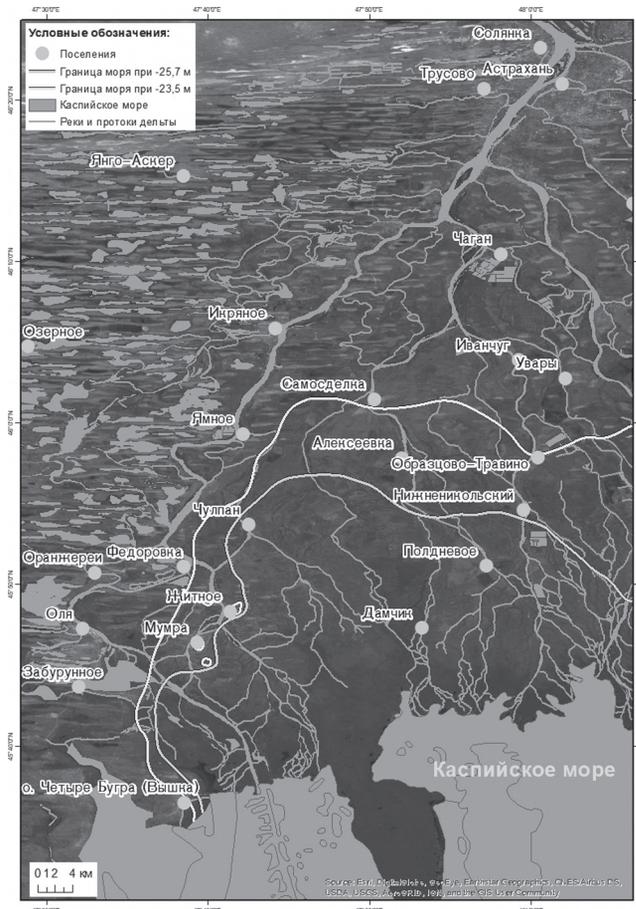


Рис. 6. Границы морского края дельты Волги в период с 1720-х по 1830-х гг.

Fig. 6. Borders of the sea edge of the Volga delta in the period in the 20s. 18th century – 30s. 19th century

Данное устье изображено на карте А.И. Нагаева, составленной им в 1765 г., где указаны глубины 9 футов (2,7 м) [Нагаев, 1796]. Историк М.Д. Чулков [1785] упоминает в Ярковоказ устье глубины фарватера 8–9 футов (2,4–3 м). И хотя река Яровейка в этом «Описании» уже отсутствует, в числе основных проток Волжской дельты, впадающих в Каспийское море и выходящих к о. Четыре Бугра, указана протока Бакланья [Хозяйственное описание..., 1806].

Можно сделать вывод, что за период высокого уровня моря, длившегося в течение 70 лет, русло

Яровейки было частично занесено, на что могли повлиять не только морские и речные наносы, но и затопление межбугровых понижений. На прилегающих бэровских буграх развивались абразионные и склоновые процессы, которые способствовали поступлению материала в русло. В свою очередь, это способствовало обмелению протоков и, вероятно, Бакланьего фарватера.

Немаловажна роль подводной и надводной растительности в процессе обмеления устьевого участка староволжского фарватера. Мы ранее ссылались на записи современников, указывавших, что в связи с подъемом уровня моря участки устьевого взморья стали «болотистыми» [Соколов, 1855] и «заросли камышом» [Люция Каспийского моря..., 1852]. Растительный покров, с одной стороны, играет роль фильтра, задерживая наносы, а с другой, увеличивает интенсивность их осаждения. Растения, обволакиваясь мутью, образуют подводную мель, где еще больше задерживаются наносы и семена растений, которые, прорастая, повторяют этот круговорот. Через несколько лет, разрастаясь, уровень мели повышается и наконец выдвигается на поверхность воды [Валединский, Аполлов, 1928]. При трансгрессии моря затопляется пространство вокруг мелей, увеличиваются глубины, несколько облегчая судоходство. Но при этом увеличивается процесс осадконакопления, заболоченность зоны мелей приводит к увеличению растительного покрова, усиливая данный процесс. В результате, после наступления регрессивной стадии на осушенной территории наблюдается обмеление устьев рек, русловых протоков и возрастание поверхности мелей на староволжском фарватере. Для дельты р. Волги, и в частности для ее морского края, характерно наличие густого тростникового пояса, затрудняющего установить положение береговой линии [Нижняя Волга..., 2002].

В начале XIX в. были проведены первые промеры фарватера на Бахтемировском направлении. В 1818 г. судоходным фарватером был официально назначен Бахтемир по маршруту: из Бахтемира по Петухову плесу в Старую Волгу, далее в Маракушу и через Княжью Россыпь современным путем в море [Валединский, Аполлов, 1928]. В настоящее время указанные протоки Петухов плес

и Маракуша входят в русло Бахтемира, а Старая Волга – это река Ямная.

ВЫВОДЫ

Приведенные данные позволяют подтвердить определяющую роль трансгрессивно-регрессивного режима Каспийского моря в перестройке гидрологической сети в низовьях Староволжского судоходного фарватера и функционировании Яркового устья в XVIII в.

В трансгрессивный период (1740-е – 1810-е), устьевое взморье в западной части дельты (нижнее течение староволжского фарватера и Бахтемира) оказалось затопленным. После понижения уровня с 1840-х гг. Яркового устья и Бакланий фарватер обмелели, но иная ситуация наблюдается в нижнем течении реки Бахтемир.

Для периода XVIII–XIX вв. фиксируется смещение основного русла в западном направлении от Старой Волги до Бахтемира. Установлена неоднородность продвижения надводной части дельты при понижении уровня моря в западной и восточной частях. Это объясняется занесением рек и водного пространства наносами, а также интенсивным осадконакоплением р. Волги в юго-восточном направлении.

Несмотря на то что ни в одном районе дельты, как на Бахтемировском направлении, не наблюдается такая протяженность уходящих в море отмелей и кос, внешний дельтовый прирост в этом районе оказался незначительным. В свою очередь, Старая Волга разветвляется на десятки отдельных ериков, протекающих между множеством островов и бэровских бугров.

В XIX в. произошел прирост в западной части дельты в нижнем течении протока Старой Волги (Бирюль, Чулпан и др.), где образовался култук Дамчик – неглубокий залив, заросший тростником и лотосом. На участках, примыкающих к подступным ильменям, в районе течения р. Бахтемир, наблюдался незначительный прирост суши [Краснова, 1951]. Крайний западный дельтовый рукав Волги – Бахтемир, выходя первоначально Басаргою близ Шадинского ильменя, смог пробить новую дорогу в море, став новым судоходным фарватером [Валединский, Аполлов, 1928].

Благодарности. Авторы признательны рецензентам и редакторам за конструктивный, критический анализ и ценные замечания. Работа выполнена в рамках государственного задания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (тема № FMWE-2024-0018).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас Каспийского моря, сочиненный при Чертежной Государственного Адмиралтейского Департамента с описи и Адмиралтейских наблюдений, произведенных с 1809 по 1817 год Штурманом 8 класса и Кавалером Колодкиным. СПб.: Морская типография, 1826. 60 с.
- Багров Л.С. Материалы к историческому обзору карт Каспийского моря // Записки по гидрографии. 1912. Вып. XXXV. С. 1–112.
- Байдин С.С. Сток и уровни дельты Волги / Глав. упр. гидрометеорол. службы при Совете министров СССР. Гос. океаногр. ин-т. М.: Гидрометеиздат, 1962. 337 с.
- Белевы путешествия через Россию в разныя Азиатские земли, а именно: в Испаган, в Пекин, в Дербент и Константинополь. Ч. 1. СПб.: Имп. Акад. наук, 1776. 250 с.
- Белль Д. Извлечения из описания путешествия (1716–1722 гг.) // Астраханский сборник, издаваемый Петровским обществом исследователей Астраханского края. 1896. Вып. 1. С. 240–258.
- Берг Л.С. Очерки по истории русских географических открытий / Акад. наук СССР. 2-е изд., испр. и доп. М.; Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1949. 465 с.
- Березин И.Н. Путешествие по востоку. Т. 1. Путешествие по Дагестану и Закавказью. Ч. 1–3. 2-е изд., доп. Казань: Унив. тип., 1850. 473 с.
- Бороздин Н. Астраханский военный порт // Морской сборник. 1853. Т. 16. № 10. С. 219–228.
- Бухарицин П.И., Котеньков С.А. Трудные перекаты Волго-Каспия. Историческая ретроспектива. Часть I (IX–XIX вв.) // Гидрометеорология и экология. 2022. № 67. С. 283–305. DOI: 10.33933/2713-3001-2022-67-283-304.
- Бухарицин П.И., Ушивцев В.Б., Котеньков С.А. Трудные перекаты Волго-Каспия. Историческая ретроспектива. Ч. II (XIX–XXI вв.) // Гидрометеорология и экология. 2023. № 70. С. 82–99. DOI: 10.33933/2713-3001-2023-70-82-99.
- Валединский В.В., Аполлов Б.А. Дельта реки Волги (по данным изысканий 1919–1925 гг.) // Тр. Отдела портов и управления внутр. водных путей. Тифлис, 1928. Т. 1. Вып. 5. 661 с.
- Варущенко С.И., Варущенко А.Н., Клизе Р.К. Изменение режима Каспийского моря и бессточных водоемов в палеовремене. М.: Наука, 1987. 239 с.
- Греков В.И. Очерки из истории русских географических исследований в 1725–1765 гг. / Акад. наук СССР. Ин-т географии. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1960. 425 с.
- Гусарова Е.В. Астраханские находки: История, архитектура, градостроительство Астрахани XVI–XVIII вв. по документам из собраний Петербурга. СПб.: Нестор-История, 2009. 492 с.
- Джаксон Т.Н., Калинина Т.М., Коновалова И.Г., Подосинов А.В. «Русская река»: Речные пути Восточной Европы в античной и средневековой географии. М.: Языки славянских культур: Знак, 2007. 360 с.
- Дубов И.В. Великий Волжский путь. Л.: Издательство Ленинградского университета, 1989. 256 с.
- Западный Прикаспий в составе Российской империи (1722–1735 гг.): 3-12 сборник архивных документов / сост. Е.И. Иноземцева, Ш.А. Магарамов, Н.Д. Чекулаев. Махачкала: МавраевЪ, 2020. 376 с.
- Иванов В.В., Кортаев В.Н., Римский-Корсаков Н.А., Чернов А.В. Атлас русловых деформаций Нижней Волги // Водные ресурсы. 2006. Т. 33. № 5. С. 508–588.
- Княжецкая Е.А. Судьба одной карты: [О географе А.Б. Черкасском] / предисл. д-ра геогр. наук Б.А. Федоровича. М.: Мысль, 1964. 119 с.
- Колебания уровня Каспийского моря // Труды Института океанологии. Т. 15. М.: Издательство Академии наук СССР, 1956. 288 с.
- Кортаев В.Н. Геоморфология дельты Волги и динамика русловых разветвлений // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2011. № 2. С. 103–109.
- Краснова Н.Г. Образование отложений дельты Волги // Геология дельты Волги. Тр. Гос. океанограф. института (ГОИН) / под ред. И.В. Кленовой. 1951. Вып. 18/30. С. 80–148.
- Леонтьев О.К., Маев Е.Г., Рычагов Г.И. Геоморфология берегов и дна Каспийского моря. М.: Изд-во Московского ун-та, 1977. 209 с.
- Локтионова Е.Г., Бармин А.Н., Морозова Л.А., Болонина Г.В., Гурьева М.С. Экологические проблемы рационального водопользования в условиях городской среды. Астрахань: Астраханский ун-т, 2014. 196 с.
- Люция Каспийского моря Вудруфа, 1740–1743 гг. // Записки Гидрографического Департамента Морского министерства. 1852. Ч. X. С. 61–62.
- Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
- Михайлов В.Н., Исупова М.В. Гидрологические, морфологические и экологические следствия аномального сопряжения Волги и Каспийского моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2014. № 1. С. 8–16.
- Нижняя Волга: геоморфология, палеогеография и русловая морфодинамика. М.: ГЕОС. 2002. 240 с.
- Описание Каспийского моря и чиненных на оном российских завоеваний, яко часть истории государя императора Петра Великого / Труды тайного советника, губернатора Сибири и ордена святого Александра кавалера, Федора Ивановича Соймонова, выбранное из журнала его превосходительства, в бытность его службы морским офицером; И с внесением, где потребно было, дополнениями академии наук конференц-секретаря, профессора истории и историографа, Г.Ф. Миллера. СПб.: Изд-во при Императорской Академии наук, 1763. 380 с.
- Пельциг О. Несколько слов о россыпях на устье реки Волга // Морской сборник. 1863. Т. 68. № 10. С. 20–24.
- Победоносцев К., Бабст И. Письма о путешествии государя наследника цесаревича по России от Петербурга до Крыма. М.: Тип. Грачева и К°, 1864. 568 с.
- Постников А.В. История водно-сухопутных транспортных путей Северо-Западной Руси в XVI – начале XX века и создание Беломорско-Балтийского канала. М.: Ленланд, 2019. 246 с.
- Походный журнал 1722 года // Журналы и походные журналы Петра Великого, с 1695 по 1725 гг. СПб., 1855. 207 с.
- Розен М.Ф. Материалы по изучению колебаний уровня Северного Каспия // Известия Центрального Гидрометеорологического бюро. 1929. Вып. VIII.

- Россия XVIII в. глазами иностранцев / Подготовка текста, вступительная статья и комментарии Ю.А. Лимонова. Л.: Лениздат, 1989. 544 с.
- Русаков Г.В. Геоморфологическое районирование дельты Волги. Геоморфология. 1990. № 3. С. 99–106.
- Смокотина Д.В. Балтийско-Каспийский торговый путь в эпоху раннего средневековья (VII–IX вв.): опыт исторической реконструкции: автореферат дис. ... канд. истор. наук. Москва, 2012. 22 с.
- Соймонов Ф.И. Описание Каспийского моря от устья реки Волги, от протока Ярковского, до устья реки Астрабадской, положение западного и восточного берегов, глубины, грунты, и виды знатных гор. СПб.: Тип. Мор. шляхет. кадет. корпуса, 1783. 28 с.
- Соколов А.П. Описи Каспийского моря с начала восемнадцатого века по настоящее время // Записки Гидрографического Департамента Морского министерства. 1852. Ч. X. С. 1–44.
- Соколов А.П. Плавание по Каспийскому морю Генве, Ельтона и Вудруфа, 1742–1744 г. // Морской сборник. 1855. Т. XIX. № 12. Неофиц. отд. С. 268–296.
- Филиппов Н.М. Об изменении уровня Каспийского моря. СПб.: Тип. Акад. наук, 1890. 113 с.
- Хозяйственное описание Астраханской и Кавказской губерний: по гражданскому и естественному их состоянию в отношении к земледелию, промышленности и домоводству, сочиненное по начертанию Императорского Вольного Экономического Общества Высочайше одобренному и тщанием и иждивением оною Общества изданное. СПб.: Печатано в Императорской тип., 1809. 597 с.
- Чулков М.Д. Историческое описание российской коммерции при всех портах и границах: От древних времен до ныне настоящего и всех преимущественных узаконений по оной государя имп. Петра Великого и ныне благополучно царствующей государыни имп. Екатерины Великой. Т. 2. Кн. 1. О торговле через Каспийское море Англичан и других народов. СПб., 1785. 343 с.
- Штейнберг Е.Л. Первые исследователи Каспия (XVIII–XIX вв.). М.: Гос. изд-во геогр. лит., 1949. 76 с.
- Bellotti P., Davoli L., SaDori L. Landscape dia-chronic reconstruction in the Tiber delta during historical time: a holistic approach, *Geogr Fis Dinam Quat (Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria)*, 2018, vol. 41, p. 3–21, DOI: 10.4461/ GFDQ.2018.41.1.
- Large A.R.G., Petts G.E. Historical channel-floodplain dynamics along the River Trent: implications for river rehabilitation, *Applied Geography*, 1996, vol. 16(3), p. 191–209, DOI: 10.1016/0143-6228(96)00004-5.
- Mozzi P., Piovan S., Rossato S., Cucato M., Abba T., Fontana A. Palaeohydrography and early settlements in Padua (Italy), *Il Quaternario. Italian Journal of Quaternary Sciences*, 2010, 23(2Bis), vol. Speciale, p. 387–400.
- Olearius A. Offt beehrte Beschreibung Der Newen Orientalischen Reise So dutch Gelegenheit einer Holsteinischen Legation an den Konig in Persien geschehen... Schleswig, 1647.
- Slowik M. Transformation of a lowland river from a meandering and multi-channel pattern into an artificial canal: retracing a path of river channel changes (the Middle Obra River, W Poland), *Reg. Environ. Change*, 2013, vol. 13, p. 1287–1299, DOI: 10.1007/s10113-013-0453-3.
- Straussens J.J. Sehr schwere wiederwertige und Denckwiirdige Reysen Durch Italien, Griechen-land, Lifland, Moscau, Tartarey, Meden, Persien, Tiirckey, Ost-Indien, Japan und unterschied-liche andere... / Verziehret mit vielen schonen Kupffer-stuecken vom Authore selbst nach dem Leben gezeichnet; Aus dem Hollandschen iibergesetzt von A. Miiller, Amsterdam, 1678.

Электронные ресурсы

В Волго-Каспийском канале сняли с мели теплоход, направлявшийся в Иран. РИА Новости. URL: <https://ria.ru/20230528/teplokhod-1874641556.html> (дата обращения 30.05.2023).

Нагаев А.И. Генеральная карта Каспийского моря: сочиненная по правому компасу при Типографии Морского Шляхетного Кадетского Корпуса в 1793 г. с имеющихся в Адмиралтейской чертежной карт, исправленных бывшим Господином Адмиралом и Кавалером Нагаевым, последовательно многим в разные времена плаваниям и описаниям; которая Государственной Адмиралтейскою Коллегией рассмотрена, и по повелению Ея напечатана при Типографии тогож корпуса в 1796 году. 1:1 260 000, 12,6 км в 1 см. Граф. м-б в верстах, нем. и итал. милях. [СПб.], 1796. 1 к. (1 л.): 1 цв., грав. 101×70 см. URL: <https://kpram.rusneb.ru/kp/item16005> (дата обращения 30.05.2023).

Поступила в редакцию 02.08.2023

После доработки 13.11.2023

Принята к публикации 14.02.2024

VOLGA-CASPIAN CANAL IN THE 18TH CENTURY: HISTORICAL AND GEOGRAPHICAL RECONSTRUCTION OF A SHIPPING ROUTE

S.A. Kotenkov¹, R.R. Makshaev², D.M. Lobacheva³, E.Yu. Matlakhova⁴

¹ Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences

²⁻⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography

¹ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in History; e-mail: s_kotenkov@mail.ru

² Laboratory of Recent Deposits and Pleistocene Paleogeography, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: radikm1986@mail.ru

³ Department of Geomorphology and Paleogeography, post-graduate student; e-mail: lob.dascha@yandex.ru

⁴ Department of Geomorphology and Paleogeography, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: matlakhova_k@mail.ru

The paper analyses the hydrological regime of the Volga River delta, predetermined by the interaction of the river and the Caspian Sea. Its connection with fluctuations of the Caspian Sea level in the area of the Volga River mouths is considered using the example of the functioning of the Yarkovsky mouth where the “Old Volga” fairway entered the Caspian Sea in the 18th century. Documents, notes of Russian and European navigators, maps and sailing directions of the 18–19th centuries, which present both existing and obsolete toponyms of islands, shoals, and channels of the Volga River delta, were analyzed to find the location of the mouth. The history of the mouth investigation and mapping, and its navigation conditions are considered, as well as the reasons for termination of its use.

The influence of transgressive-regressive regime of the Caspian Sea on the restructuring of the hydrological network in the lower reaches of the Volga River delta has been found for the 18–19th centuries. The routes of the shipping Volga-Caspian Canal for the studied period have been reconstructed. The stages of a westward displacement of the main bed of the Volga River have been described. Heterogeneous movement of the surface part of the Volga delta under the decreasing sea level is considered for its western and eastern parts.

Keywords: problems of navigation, sea levels, shoals of the estuarine coast, shallowing of the fairway

Acknowledgments. The authors are grateful to reviewers and editors for their useful critical analysis and valuable comments. The work was carried out within the framework of the state task of the Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (theme no. FMWE-2024-0018).

REFERENCES

- Atlas Kaspijskogo morya sochinennyj pri Chertezhnoj Gosudarstvennogo Admiraltejskogo Departamenta s opisi i Admiraltejskih nablyudenij proizvedennyh s 1809 po 1817 god Shturmanom 8 klassa i Kavalerom Kolodkinym* [Atlas of the Caspian Sea compiled at the Drawing Office of the State Admiralty Department from the inventory and Admiralty observations made from 1809 to 1817 by the 8th class Navigator and Cavalier Kolodkin], St Peterburg, Morskaya tipografiya Publ., 1826, 60 p. (In Russian)
- Bagrov L.S. Materialy k istoricheskomu obzoru kart Kaspijskogo morya [Materials for the historical review of maps of the Caspian Sea], *Zapiski po gidrografii*, 1912, vyp. XXXV, p. 1–112. (In Russian)
- Baidin S.S. *Stok i urovni delty Volgy* [Runoff and levels of the Volga Delta], Glav. upr. gidrometeorol. sluzhby pri Sovete Ministrov SSSR, Gos. okeanogr. in-t, Moscow, Gidrometeoizdat Publ., 1962, 337 p. (In Russian)
- Belevy puteshestviya cherez Rossiyu v raznyya Asiyatskie zemli, a imenno: v Ispagan, v Pekin, v Derbent i Konstantinopol'*, ch. 1 [Beleva travels through Russia to various Asian lands, namely: to Ispagan, to Beijing, to Derbent and Constantinople, pt 1], St Peterburg, Imp. Akad. nauk, 1776, 250 p. (In Russian)
- Bell D. Izvlecheniya iz opisaniya puteshestviya (1716–1722 gg.) [Extracts from the description of the journey (1716–1722)], *Astrahanskij sbornik* [Astrakhan collection of papers] izd. Petrovskim obshchestvom issledovatelej Astrahanskogo kraya, 1896, vyp. 1, p. 240–258. (In Russian)
- Bellotti P., Davoli L., SaDori L. Landscape dia-chronic reconstruction in the Tiber delta during historical time: a holistic approach, *Geogr Fis Dinam Quat (Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria)*, 2018, vol. 41, p. 3–21, DOI 10.4461/GFDQ.2018.41.1.
- Berezin I.N. *Puteshestvie po vostoku, t. 1, Puteshestvie po Dagestanu i Zakavkaz'yu* [Journey through the East, t. 1, Journey through Dagestan and Transcaucasia], ch. 1–3, 2-e izd., dop., Kazan', Kazan. Univ. tip., 1850, 473 p. (In Russian)
- Berg L.S. *Ocherki po istorii russkih geograficheskikh otkrytij* [Essays on the history of Russian geographical discoveries], 2-e izd., ispr. i dop., Moscow, Leningrad, Izd-vo Akad. nauk SSSR, 1949, 465 p. (In Russian)
- Borozdin N. Astrahanskiy voenny port [Astrakhan military port], *Morskoy sbornik*, 1853, vol. 16, no. 10, p. 219–228. (In Russian)
- Buharicin P.I., Kotenkov S.A. Trudnye perekaty Volgo-Kaspiya, Istoricheskaya retrospektiva, ch. I (IX–XIX vv.) [Difficult rifts of the Volga-Caspian. Historical retrospective, pt I (IX–XIX centuries)], *Gidrometeorologiya i ekologiya*, 2022, no. 67, p. 283–305, DOI: 10.33933/2713-3001-2022-67-283-304. (In Russian)

- Buharicin P.I., Ushivcev V.B., Koten'kov S.A. Trudnye perекаты Volgo-Kaspiya. Istoricheskaya retrospektiva, ch. II (XIX–XXI vv.) [Difficult rifts of the Volga-Caspian. Historical retrospective, pt II (XIX–XXI centuries)], *Gidrometeorologiya i ekologiya*, 2023, no. 70, p. 82–99, DOI: 10.33933/2713-3001-2023-70-82-99. (In Russian)
- Chulkov M.D. *Istoricheskoe opisaniye rossijskoj kommercii pri vsekh portah i granicah: Ot drevnih vremyan do nyne nastoyashchago i vsekh preimushchestvennyh zakoneniij po onoj gosudaryu imp. Petra Velikago i nyne blagopoluchno carstvuyushchej gosudaryni imp. Ekateriny Velikiya* [Historical description of Russian commerce at all ports and borders: From ancient times to the present and all the prevailing legalizations on this sovereign Imp. Peter the Great and the now prosperous Her Majesty the Empress Catherine the Great.], t. 2, kn. 1, O torgovle cherez Kaspijskoe more Anglichan i drugih narodov, St Peterburg, 1785, 343 p. (In Russian)
- Dubov I.V. *Velikiy Volzhskiy put* [Great Volga Route], Leningrad, Izdatel'stvo Leningradskogo universiteta, 1989, 256 p. (In Russian)
- Dzhakson T.N., Kalinina T.M., Konovalova I.G., Podosinov A.V. "Russkaja reka": *Rechnye puti Vostochnoj Evropy v antichnoj i srednevekovoj geografii* ["Russian River": River routes of Eastern Europe in ancient and medieval geography], Moscow, Jazyki slavjanskikh kul'tur: Znak Publ., 2007, 360 p. (In Russian)
- Filippov N.M. *Ob izmenenii urovnya Kaspijskogo moray* [On the change in the level of the Caspian Sea], St Peterburg, tip. Akad. Nauk Publ., 1890, 113 p. (In Russian)
- Golikov I.I. *Deyaniya Petra Velikago, mudrago preobrazitelja Rossii: Sobrannyya iz dostovernnyh istochnikov i raspolozhennyya po godam* [The Acts of Peter the Great, the Wise Transformer of Russia: Collected from Reliable Sources and Arranged by Years], Moscow, Univ. tip. N. Novikova Publ., 1788–1789, ch. 6, 1788, 435 p. (In Russian)
- Grekov V.I. *Ocherki iz istorii russkikh geograficheskikh issledovanij v 1725–1765 gg.* [Essays from the history of Russian geographical investigations in 1725–1765], Akad. nauk SSSR, In-t geografii, Moscow, Izd-vo Akad. nauk SSSR, 1960, 425 p. (In Russian)
- Gusarova E.V. *Astrahanskije nahodki: Istorija, arhitektura, gradostroitel'stvo Astrahani XVI–XVIII vv. po dokumentam iz sobranij Peterburga* [Astrakhan finds: History, architecture, urban planning of Astrakhan in the 16th–18th centuries. according to documents from the collections of St. Petersburg], St Peterburg, Nestor-Istorija Publ., 2009, 492 p. (In Russian)
- Hozyajstvennoe opisaniye Astrahanskaj i Kavkazskoj gubernij: po grazhdanskomu i estestvennomu ih sostoyaniyu v otnoshenii k zemledeliju, promyshlennosti i domovodstvu, sochinennoe po nachertaniyu Imperatorskago Vol'nogo Ekonomicheskago Obshchestva Vysochajshe odobrennomu i tshchaniem i izhdiveniem onogo Obshchestva izdannoe* [Economic description of the Astrakhan and Caucasian provinces: according to their civil and natural state in relation to agriculture, industry and household economics, composed according to the outline of the Imperial Free Economic Society, supreme approved and published with the diligence and dependence of this Society], St Peterburg, Pechatano v Imperatorskoj tip., 1809, 597 p. (In Russian)
- Ivanov V.V., Korotaev V.N., Rimskiy-Korsakov N.A., Chernov A.V. Atlas ruslovyh deformatsij Nizhnej Volgi [Atlas of channel deformations of the Lower Volga River], *Vodnie resursy*, vol. 33, no. 5, 2006, p. 508–588. (In Russian)
- Knyazheckaya E.A. *Sud'ba odnoj karty: [O geografе A.B. Cherkasskom]*, predisl. d-ra geogr. nauk B.A. Fedorovicha [The fate of one map: [About the geographer A.B. Cherkassky]], foreword by D.Sc. in Geography B.A. Fedorovich, Moscow, Mysl' Publ., 1964, 119 p. (In Russian)
- Kolebaniya urovnya Kaspijskogo morya* [Fluctuations in the level of the Caspian], Trudy Instituta okeanologii, t. 15, M.M. Arhangel'skij (ed.), Moscow, Izd-vo Akademii nauk SSSR Publ., 1956, 288 p. (In Russian)
- Korotaev V.N. Geomorfologija del'ty Volgi i dinamika ruslovyh razvetvlenij [Geomorphology of the Volga River delta and changes of channel branches], *Vestn. MGU, ser. 5, Geogr.*, 2011, no. 2, p. 103–109. (In Russian)
- Krasnova N.G. [Formation of sediments in the Volga River delta], *Geologiya del'ty Volgi* [Geology of the Volga River delta], I.V. Klenova (ed.), Tr. Gos. Okeanograf. Inta (GOIN), vyp. 18/30, Leningrad, Gidrometizdat Publ., 1951, p. 80–148. (In Russian)
- Large A.R.G., Pett G.E. Historical channel-floodplain dynamics along the River Trent: implications for river rehabilitation, *Applied Geography*, 1996, vol. 16(3), p. 191–209, DOI: 10.1016/0143-6228(96)00004-5.
- Leontiev O.K., Maev E.G., Rychagov G.I. *Geomorfologiya beregov i dna Kaspijskogo morya* [Geomorphology of the shores and bottom of the Caspian Sea], Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta Publ., 1977, 209 p. (In Russian)
- Lociya Kaspijskogo morya Vudrufa, 1740–1743 g.* [Pilot of the Caspian Sea Woodroof, 1740–1743], Zapiski Gidrograficheskogo Departamenta Morskogo ministerstva, 1852, ch. X, p. 61–62. (In Russian)
- Loktionova E.G., Barmin A.N., Morozova L.A., Bolonina G.V., Gur'eva M.S. *Ekologicheskie problemy racionalnogo vodopolzovaniya v usloviyah gorodskoj sredy* [Environmental problems of rational water use in an urban environment], Astrahan, Astrahanskii un-t Publ., 2014, 196 p. (In Russian)
- Mikhailov V.N. *Ustyia rek Rossii i sopredel'nyh stran: proshloe, nastoyashchee i budushchee* [Mouths of rivers in Russia and neighboring countries: past, present and future], Moscow, GEOS Publ., 1997, 413 p. (In Russian)
- Mikhailov V.N., Isupova M.V. Gidrologicheskie, morfoloicheskie i ekologicheskie sledstviya anomal'nogo sopryazheniya Volgi i Kaspijskogo morya [Hydrological, morphological and ecological effects at the Volga River-Caspian Sea connection], *Vestn. Mock. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2014, no. 1. p. 8–16. (In Russian)
- Mozzi P., Piovan S., Rossato S., Cucato M., Abba T., Fontana A. Palaeohydrography and early settlements in Padua (Italy), II Quaternario, *Italian Journal of Quaternary Sciences*, 23(2Bis), 2010, vol. Speciale, p. 387–400.
- Nizhnyaya Volga: geomorfologiya, paleogeografiya i ruslovaya morfodinamika* [Lower Volga River: geomorphology, paleogeography and channel morphodynamics], Moscow, GEOS Publ., 2002, 240 p. (In Russian)
- Olearius A. *Offt beehrte Beschreibung Der Newen Orientalischen Reise So dutch Gelegenheit einer Holsteinischen Legation an den Konig in Persien geschehen...*, Schleswig, 1647.
- Opisaniye Kaspijskogo morya i chinennyh na onom rossijskikh zavoevanij, yako chast' istorii gosudarya imperatora Petra Velikago* [Description of the Caspian Sea and the Russian conquests made on it, as part of the history of the Emperor Peter the Great], Trudami tajnago sovetnika, gu-

- bernatora Sibiri i ordena svyatago Aleksandra kavalera, Fedora Ivanovicha Sojmonova, vybrannoe iz zhurnala ego prevoskhoditel'stva, v bytnost' ego sluzhby morskim oficerom; i s vneseniem, gde potrebno bylo, dopolnieniyami akademii nauk konferenc-sekretarya, professora istorii i istoriografa, G.F. Millera, St Peterburg, Imperatorskaj Akademii nauk Publ., 1763, 380 p. (In Russian)
- Pelcig O. Neskol'ko slov o rossypyah na ust'e reki Volga [A few words about placers at the mouth of the Volga River], *Morskoy sbornik*, 1863, t. 68, no. 10, p. 20–24. (In Russian)
- Pobedonoscev K., Babst I. *Pisma o puteshestvii gosudarya naslednika cesarevicha po Rossii ot Peterburga do Kryma* [Letters about the journey of the sovereign heir to the crown prince in Russia from St. Petersburg to the Crimea], Moscow, tip. Gracheva i K° Publ., 1864, 568 p. (In Russian)
- Pohodnyj zhurnal 1722 goda* [Field journal of 1722], Yurnaly i pohodnye zhurnaly Petra Velikogo, s 1695 po 1725 gg., St Peterburg, 1855, 207 p. (In Russian)
- Postnikov A.V. *Istorija vodno-suhoputnyh transportnyh putej Severo-Zapadnoj Rusi v XVI – nachale XX veka i sozdanie Belomorsko-Baltijskogo kanala* [History of water-land transport routes of North-Western Rus' in the 16th – early 20th centuries and the creation of the White Sea-Baltic Sea Canal], Moscow, Lenland Publ., 2019, 246 p.
- Rossiya XVIII v. glazami inostrancev* [Russia of the 18th century through the eyes of foreigners], Podgotovka teksta, vstupitel'naya stat'ya i kommentarii Yu.A. Limonova, Leningrad, Lenizdat Publ., 1989, 544 p. (In Russian)
- Rozen M.F. Materialy po izucheniyu kolebanij urovnya Severnogo Kaspiya [Materials on the study of level fluctuations of the Northern Caspian], *Izvestiya Central'nogo Gidrometeorologicheskogo byuro*, 1929, vyp. VIII. (In Russian)
- Rusakov G.V. Geomorfologicheskoe rajonirovanie delty Volgi [Geomorphological zoning of the Volga River delta], *Geomorfologia*, 1990, vol. 3, p. 99–106. (In Russian)
- Shtejnberg E.L. *Pervye issledovateli Kaspiya (XVIII–XIX vv.)* [The first explorers of the Caspian Sea (XVIII–XIX centuries)], Moscow, Gos. izd-vo geogr. lit. Publ., 1949, 76 p. (In Russian)
- Słowik M. Transformation of a lowland river from a meandering and multi-channel pattern into an artificial canal: retracing a path of river channel changes (the Middle Obra River, W Poland), *Reg Environ Change*, 2013, vol. 13, p. 1287–1299, DOI 10.1007/s10113-013-0453-3.
- Sojmonov F.I. *Opisanie Kaspijskogo morya ot ust'ya reki Volgi, ot protoka Yarkovskogo, do ust'ya reki Astrabadskoj, polozhenie zapadnogo i vostochnogo beregov, glubiny, grunty, i vidy znatnyh gor* [Description of the Caspian Sea from the mouth of the Volga River, from the Yarkovsky channel, to the mouth of the Astrabad River, the position of the western and eastern shores, depths, soils, and types of noble mountains], St Peterburg, Tip. Mor. shlyahet. kadet. Korpusa Publ., 1783, 28 p. (In Russian)
- Sokolov A.P. *Opisi Kaspijskogo morya s nachala vosemнадцатого века по настoyashchee vremya* [Inventories of the Caspian Sea from the beginning of the eighteenth century to the present], *Zapiski Gidrograficheskogo Departamenta Morskogo ministerstva*, 1852, ch. X, p. 1–44. (In Russian)
- Sokolov A.P. *Plavanie po Kaspijskomu moryu Genve, El'tona i Vudrufa, 1742–1744 g.* [Sailing on the Caspian Sea by Genve, Elton and Woodroof, 1742–1744], *Morskoy sbornik*, 1855, vol. XIX, no. 12, Neofic. otd., p. 268–296. (In Russian)
- Straussens J.J. *Sehr schwere wiederwertige und Denckwürdige Reysen Durch Italien, Griechen-land, Lifland, Moscau, Tartarey, Meden, Persien, Tiirckey, Ost-Indien, Japan und unterschied-liche andere...*, Verziehret mit vielen schonen Kupffer-stiicken vom Authore selbst nach dem Leben gezeichnet; Aus dem Hollandischen iiber-gesetzt von A. Miiller, Amsterdam, 1678.
- Valedinskiy V.V., Apollov B.A. *Del'ta reki Volgi (po dannym izyskanij 1919–1925 gg.)* [Delta of the Volga River (according to survey data from 1919–1925)], Tr. Otdela portov i upravleniya vnutr. vodnyh putey, Tiflis, 1928, vol. 1, vyp. 5, 661 p. (In Russian)
- Varushchenko S.I., Varushchenko A.N., Klige R.K. *Izmeneniye rezhima Kaspiyskogo morya i besstochnykh vodoyemov v paleovremeni* [Changes in the regime of the Caspian Sea and endorheic reservoirs in paleotime], Moscow, Nauka Publ., 1987, 239 p. (In Russian)
- Zapadnyj Prikaspij v sostave Rossijskoj imperii (1722–1735 gg.): Z-12 sbornik arhivnyh dokumentov* [Western Caspian within the Russian Empire (1722–1735): Z-12 collection of archival documents], sost. E.I. Inozemceva, Sh.A. Magaramov, N.D. Chekulaev, Mahachkala, Mavraev Publ., 2020, 376 p. (In Russian)
- Web sources*
- Nagaev A.I. *General'naya karta Kaspijskogo morya: sochinennaya po pravomu kompasu pri Tipografii Morskogo Shlyahetnago Kadetskago Korpusa v 1793 g. s imeyushchihsya v Admiraltejskoj chertezhnoj kart, / ispravlennyh byvshim Gospodinom Admiralom i Cavalerom Nagaevym, posledovatel'no mnogim i raznye vremena plavaniyam i opisaniyam; kotoraya Gosudarstvennoyu Admiraltejskoyu Kollegiej rasmotrena, i po poveleniyu Eya na pechatana pri Tipografii togozh korpusa v 1796 godu* [The general map of the Caspian Sea: composed according to the right compass at the Printing House of the Naval Shlyakhethnago Cadet Corps in 1793 from the drawing maps available in the Admiralty, corrected by the former Mr. Admiral and Cavalier Nagaev, successively to many voyages and descriptions at different times; which was examined by the State Admiralty Board, and by order of Her was not printed at the Printing House of the same building in 1796], [Sankt-Peterburg], Tipografiya Morskogo Shlyahetnago Kadetskago Korpusa, 1796, 1 k. (1 l.), URL: <https://knpam.rusneb.ru/kp/item16005> (access date 30.05.2023). (In Russian)
- V Volgo-Kaspijskom kanale snyali s meli teplohd, napravlyavshiysya v Iran [In the Volga-Caspian Canal, a ship heading to Iran was refloated], URL: <https://ria.ru/20230528/teplohd-1874641556.html> (access date 30.05.2023). (In Russian)

Received 02.08.2023

Revised 13.11.2023

Accepted 14.02.2024

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ СТАТЕЙ К ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. СЕРИЯ 5. ГЕОГРАФИЯ»

Общие требования к статье

Журнал «Вестник Московского университета. Серия 5. География» публикует результаты оригинальных исследований в различных областях географической науки, теоретические, методические и обзорные статьи, представляющие интерес для мирового научного сообщества. Представленные к публикации материалы должны соответствовать формальным требованиям журнала, пройти процедуру слепого рецензирования и получить рекомендацию к публикации на заседании редколлегии журнала. Решение о публикации принимается на основе научной значимости и актуальности представленных материалов. Статьи, отклоненные редакционной коллегией, повторно не принимаются и не рассматриваются.

Объем статьи (текст, таблицы, список литературы, рисунки, перевод на английский) не должен превышать 1 а. л. (40 тыс. печатных знаков, включая пробелы, 5 рисунков), не более 50 тыс. знаков для обзорных статей. Объем кратких сообщений составляет 0,25 а. л. Рекомендуемый список литературы – до 30 наиболее актуальных работ по рассматриваемому вопросу. В обзорных статьях список литературы не должен превышать 60 источников. Для кратких сообщений список литературы может быть до 10 источников. Самоцитирований в списке литературы не должно быть более 10% от общего числа использованных источников.

Статья должна быть четко структурирована и включать рубрики: введение; материалы и методы исследований; результаты исследований и их обсуждение; выводы; список литературы.

Все материалы статьи компонуются **в единый сводный файл в формате Word** и размещаются в нем в следующей последовательности:

1. УДК;
 2. Название статьи;
 3. Инициалы и фамилия автора(ов);
 4. Для каждого автора приводится полное название учреждения, в котором выполнялось исследование, подразделение (кафедра, лаборатория и т. п.), уч. степень, должность, *e-mail*;
 5. Аннотация статьи;
 6. Ключевые слова;
 7. Текст статьи;
 8. Благодарности, в том числе – финансирование;
 9. Список литературы;
 10. Таблицы;
 11. Подрисуночные подписи;
 12. Рисунки;
 13. Перевод на английский язык пунктов 2–6, 8–9,
11. В пункте 4 просьба использовать в переводе официальное наименование организации на английском языке (а не собственный вариант перевода).

Подготовка текста

Текст набирается 12 кеглем через один интервал, поля слева, сверху и снизу – 2 см, справа – 1,5 см. Не допускается использование табулятора или пробелов для обозначения абзаца, ручных переносов в словах, переносов строк клавишей Enter в рамках одного предложения, разрывов страниц и разделов. В тексте статьи возможно использование полужирного шрифта и курсива для смысловых выделений, однако не должно использоваться подчеркивание. Десятичная часть чисел отделяется запятой.

Формулы набираются в редакторе формул в отдельную строку и имеют сквозную нумерацию по всей статье, выровненную по правому краю строки.

Таблицы набираются в Word, не допускается разделение ячеек косой линией. Ручные переносы не допускаются.

Рисунки представляются отдельными файлами, названными по их номерам (например: рис.1.tiff, рис.2.jpg), в графическом формате (eps, tif, jpg) разрешением не менее 300 dpi для полутоновых и 600 dpi для черно-белых изображений и графиков. Для графиков, выполненных в Excel, дополнительно прикладываются соответствующие файлы Excel. Картинки должны быть полностью готовы к изданию. Представление рисунков в виде схем Word или набранного текста с добавлением графических элементов, наложенных сверху, **не допускается**.

Ссылка на источник в тексте документа указывается в квадратных скобках. В тексте ссылки через запятую указывается фамилия автора и год издания. Если ссылок несколько – они отделяются друг от друга точкой с запятой. Ссылка на источник на иностранном языке указывается на языке оригинала. Список русскоязычной литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1–2003, 7.82–2001 и 7.0.5–2008. DOI (при наличии) указывается в конце ссылки. Ссылка на источник на английском языке оформляется единообразно и в русскоязычном, и в переведенном на английский язык списке литературы. **При наличии у русскоязычного издания, которое фигурирует в списке литературы, оригинальной или переводной англоязычной версии в ссылке должна быть указана именно она, а не русскоязычный вариант.**

Более подробные инструкции по подготовке статей для авторов можно найти на сайте журнала <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/index>. Статьи, оформленные не по правилам, будут возвращаться автору на переработку.

Статьи принимаются на географическом факультете в редакции, через сайт журнала и по электронной почте.

Редакция: комната 2108а, тел. +7(495)9392923. Сайт журнала <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/index>. Электронная почта: vestnik_geography@mail.ru.

Плата за публикацию не взимается

У Ч Р Е Д И Т Е Л И :

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;
географический факультет МГУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

С.А. ДОБРОЛЮБОВ, доктор географических наук, профессор, академик РАН (главный редактор)
В.С. ТИКУНОВ, доктор географических наук, профессор (зам. главного редактора)
Е.А. ЕРЕМЕНКО, кандидат географических наук (ответственный секретарь)
А.И. АЛЕКСЕЕВ, доктор географических наук, профессор
С.И. БОЛЫСОВ, доктор географических наук, профессор
А.Н. ГЕННАДИЕВ, доктор географических наук, профессор
К.Н. ДЬЯКОНОВ, доктор географических наук, профессор, член-корреспондент РАН
С.С. ЗИЛИТИНКЕВИЧ, доктор географических наук, профессор (Метеорологический институт Финляндии)
О.Г. ЗОЛИНА, профессор (Университет Ж. Фурье, г. Гренобль, Франция)
В.Ю. ИВАНОВ, профессор (Мичиганский университет, США)
Н.С. КАСИМОВ, доктор географических наук, профессор, академик РАН
А.В. КИСЛОВ, доктор географических наук, профессор
В.А. КОЛОСОВ, доктор географических наук, профессор
К.П. КОЛТЕРМАНН, профессор
М. КОНЕЧНЫ, профессор (Университет г. Брно, Чешская Республика)
С.Б. КРООНЕНБЕРГ, профессор (Технологический университет г. Делфт, Нидерланды)
С.М. МАЛХАЗОВА, доктор географических наук, профессор
Г. МОУРИ, профессор (Университет г. Токио, Япония)
С.А. СОКРАТОВ, кандидат географических наук, PhD
П.Е. ТАРАСОВ, доктор наук, профессор (Берлинский Свободный университет, Германия)
Н.Л. ФРОЛОВА, доктор географических наук, профессор
В.Е. ШУВАЛОВ, кандидат географических наук, доцент
Т.А. ЯНИНА, доктор географических наук, профессор
В.В. ЯНКО-ХОМБАХ, доктор геолого-минералогических наук, профессор (Институт прикладных исследований Авалон, г. Виннипег, Канада)

EDITORIAL BOARD:

S.A. DOBROLUBOV, doctor of science, Academician of the Russian Academy of Sciences, professor (Editor-in-chief)
V.S. TIKUNOV, doctor of science, professor (Deputy Editor-in-chief)
E.A. EREMENKO, candidate of science (Secretary-General)
A.I. ALEKSEEV, doctor of science, professor
S.I. BOLYSOV, doctor of science, professor
A.N. GENNADIYEV, doctor of science, professor
K.N. D'YAKONOV, doctor of science, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, professor
S.S. ZILITINKEVICH, doctor of science, professor (Finnish Meteorological Institute, Finland)
O.G. ZOLINA, professor (Fourier University, Grenoble, France)
V.YU. IVANOV, professor (Michigan University, USA)
N.S. KASIMOV, doctor of science, academician of the Russian Academy of Sciences, professor
A.V. KISLOV, doctor of science, professor
V.A. KOLOSOV, doctor of science, professor
K.P. KOLTERMANN, professor
M. KONECNY, professor (Masaryk University, Faculty of Science, Czech Republic)
S.B. KROONENBERG, professor (Delft University of Technology, Department of Applied Earth Sciences, Netherlands)
S.M. MALKHAZOVA, doctor of science, professor
G. MOURI, professor (University of Tokyo, Japan)
S.A. SOKRATOV, candidate of science, PhD
P.E. TARASOV, professor (Free Berlin University, Germany)
N.L. FROLOVA, doctor of science, professor
V.E. SHUVALOV, candidate of science, associate professor
T.A. YANINA, doctor of science, professor
V.V. YANKO-KHOMBACH, doctor of science, professor (Avalon Institute of Applied Sciences, Winnipeg, Canada)

Номер подготовили члены редколлегии

А.Н. ГЕННАДИЕВ, Н.Л. ФРОЛОВА

Редактор **Е.С. Повалишникова**

Адрес редколлегии:

119992, Москва, Ленинские горы, МГУ,
географический факультет, комн. 2108а. Тел. 7(495) 939-29-23

Журнал зарегистрирован в Министерстве печати и информации РФ.
Свидетельство о регистрации № 1552 от 14 февраля 1991 г.

Подписано в печать 00.00.2016. Формат 60×90/8.
Гарнитура Times New Roman. Бумага офсет. № 1. Офсетная печать. Усл. печ. л.
Уч.-изд. л. 00. Тираж экз. Изд. № 00000. Заказ №

Типография МГУ.
119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 15.