

СОДЕРЖАНИЕ

Теория и методология

- Дьяконов К. Н. Геофизические факторы положения верхней границы леса на экваториально-тропических островах Тихого и Индийского океанов 3

География и экология

- Репкина Т. Ю., Луговой Н. Н., Романенко Ф. А., Лукьянова С. А.
Берега Российской Арктики: виды и хронология антропогенных изменений 10
- Васильев О. Д. Картографирование средообразующих функций лесов и их сравнительный анализ в ландшафтах Московской области 21
- Дрегуло А. М. Влияние климатических факторов на эксплуатацию природно-технических систем обработки отходов водоотведения 32

Динамика природных систем

- Куракова А. А., Чалов Р. С. Морфология русла и размывы берегов Нижней Оби (в пределах ХМАО-Югры) 41
- Голосов В. Н., Кумани М. В., Иванова Н. Н., Беляев В. Р., Шамшурин Е. Н. Заиление малого водохранилища в условиях климатических изменений и урбанизации водосбора (Поповский пруд, г. Курск) 51
- Яицкая Н. А., Магаева А. А. Ледовый режим Северного Каспия 63

Эволюционная география

- Рогов В. В., Стрелецкая И. Д., Таратунина Н. А., Курчатова А. Н., Курбанов Р. Н., Янина Т. А. Позднеплейстоценовый криогенез в Нижнем Поволжье 73

Региональные исследования

- Савоскул М. С. Иммиграция в ФРГ во второй половине XX века 86
- Гаврилов А. А. Некоторые особенности соотношений орографических элементов и гидросети 99
- Даньшина А. В., Иванов В. В., Чанцев В. Ю. Изменения вертикальной устойчивости верхнего слоя моря Лаптевых на фоне сокращения ледяного покрова 110
- Енчилик П. Р., Семенов И. Н., Асеева Е. Н., Самонова О. А., Иовчева А. Д., Терская Е. В. Катенарная биогеохимическая дифференциация в южно-таежных ландшафтах (Центрально-Лесной заповедник, Тверская область) 121

Краткие заметки

- Хусаинова А. С., Замятина Н. Ю. Территориальная этническая эксклюзия в Загребе 134
- Курбанов Р. Н., Семиколенных Д. В., Янина Т. А., Тюнин Н. А., Мюррей Э. С. Новые данные о возрасте карангатской трансгрессии Черного моря 139
- Указатель статей и материалов, опубликованных в журнале в 2020 г. 146

CONTENTS

Theory and methodology

- Dyakonov K.N. Geophysical factors of the upper forest line on the equatorial and tropical islands of the Pacific and Indian oceans 3

Geography and ecology

- Repkina T.Yu., Lugovoi N.N., Romanenko F.A., Lukyanova S.A. Sea coasts of the Russian Arctic: types and chronology of human-induced changes 10
- Vasilyev O.D. Mapping of environment-forming functions of forests and their comparative analysis in the landscapes of the Moscow region 21
- Dregulo A.M. Influence of climatic factors on the operation of natural-technical systems for sewage sludge treatment 32

Dynamics of natural systems

- Kurakova A.A., Chalov R.S. Channel morphology and bank erosion in the lower reaches of the Ob River (within the KhMAO-Yugra autonomous district) 41
- Golosov V.N., Kumani M.V., Ivanova N.N., Belyaev V.R., Shamshurina E.N. Siltation of a small reservoir under climatic changes and urbanization of its water catchment basin (the Popovsky pond, Kursk) 51
- Yaitskaya N.A., Magaeva A.A. Ice regime of the Northern Caspian 63

Evolutionary geography

- Rogov V.V., Streletskaia I.D., Taratunina N.A., Kurchatova A.N., Kurbanov R.N., Yanina T.A. Late Pleistocene cryogenesis in the Lower Volga River region 73

Regional studies

- Savoskul M.S. Migration in Germany in the second half of the 20th century 86
- Gavrilov A.A. Some features of correlation between orographic elements and drainage network 99
- Danshina A.V., Ivanov V.V., Chantsev V.Yu. Changes in vertical stability of the Laptev Sea upper layer under the ice cover shrinkage 110
- Enchilik P.R., Semenov I.N., Aseeva E.N., Samonova O.A., Iovcheva A.D., Terskaya E.V. Catenary biogeochemical differentiation in the southern taiga landscapes (Central Forest Reserve, Tver Oblast) 121

Short communications

- Khusainova A.S., Zamyatina N.Yu. Territorial ethnic exclusion in Zagreb 134
- Kurbanov R.N., Semikolennykh D.V., Yanina T.A., Tyunin N.A., Murray A.S. New data on the age of the Karangatian transgression of the Black Sea 139

ТЕОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ

УДК 911.2

К.Н. Дьяконов¹**ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ПОЛОЖЕНИЯ ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ ЛЕСА НА ЭКВАТОРИАЛЬНО-ТРОПИЧЕСКИХ ОСТРОВАХ ТИХОГО И ИНДИЙСКОГО ОКЕАНОВ**

На основании материалов шести рейсов по изучению островов в экваториально-тропическом поясе Тихого и Индийского океанов и литературных данных установлена совместная роль факторов высоты, площади острова и циркуляции атмосферы, определяющих высотную границу лесного пояса. Выше зоны туманных лесов преобладают два варианта ландшафтов: папоротниково-влажно-луговой (на склонах, обращенных к воздушным потокам пассатной циркуляции) и сухих кустарников, аналогов субтропических маквисов, расположенных выше верхней границы пассатов или на подветренных склонах. Верхняя граница в первом случае обусловлена постоянно высокими значениями относительной влажности воздуха, достигающей 95–100%. Установлена логарифмическая зависимость высоты верхней границы лесной зоны от площади острова. Последняя определяет степень трансформации морских воздушных масс, поступающих на острова, поверхность которых характеризуется удельной теплоемкостью в четыре–пять раз меньшей, чем у воды и обуславливает в дневные часы большую долю затрат энергии на турбулентный теплообмен подстилающей поверхности с атмосферой. Поэтому на малых островах уровень конденсации влаги ниже, чем на больших, а процесс фотосинтеза у древесных растений либо заторможен, либо не происходит.

Ключевые слова: физико-географическая высотная поясность, площадь, высота острова, трансформация воздушных масс, относительная влажность воздуха

Введение. Состояние проблемы. Геофизическая сущность широтной зональности была доказана А.А. Григорьевым и М.И. Будыко [1956]. Сложнее обстоит вопрос о геофизической сущности высотной поясности (зональности). Общепринято, что снижение температуры воздуха с высотой примерно 0,6° на 100 м – главный фактор этой планетарной закономерности. Но, начиная с исследований А. Гумбольдта в Южной Америке, стало очевидным, что не менее важную роль играют атмосферные осадки, которые возрастают до определенной высоты в зависимости от климатического пояса, а затем снижаются. А в чем же заключается специфика высотной поясности на экваториально-тропических островах?

Прежде всего обратимся к становлению и развитию теории островной биогеографии, которая в середине XX в. была одним из крупнейших достижений этой науки [MacArthur, Wilson, 1967; Simberloff, 1976; Пианка, 1981 и др.]. Первое эмпирическое положение гласит: число видов живых организмов на острове прямо пропорционально площади острова. Другим, пожалуй, важнейшим положением островной биогеографии выступает теория динамического равновесия, согласно которой число видов на острове – результат одновременно протекающих процессов: иммиграции и вымирания. На основании этого положения с учетом ряда других, были намечены контуры теории эволюционных этапов

формирования фауны и климатических сообществ, отражающих эволюционное равновесие.

Однако уже к середине 1970-х годов появились работы, в которых авторы отмечали, что на число видов влияет не столько размер острова, сколько разнообразие местообитаний [Mühlenberg et al., 1977; Williamson, 1981; Haila, 1983 и др.]. На наш взгляд, это принципиально важное уточнение: *разнообразие отдельных видов определяется разнообразием ландшафтной структуры*. Позже Г.М. Длусский [Пузаченко и др., 1994] отметил, что эволюционный раздел теории островной биогеографии нельзя считать строго обоснованным ввиду недостаточного фактического материала. Но думается дело не только в его недостатке. *Построение теории островной биогеографии должно опираться и на теорию островного ландшафтоведения (ОЛ)*.

Теория ОЛ берет начало с 1970-х годов, когда по инициативе К.К. Маркова и А.П. Капицы Тихоокеанским институтом географии АН СССР была организована комплексная экспедиция в юго-западную часть тропической зоны Тихого океана. В составе экспедиции на НИС «Дмитрий Менделеев» был ландшафтный отряд, который возглавлял Г.М. Игнатьев. С 1976 по 1990 годы рейсы по изучению экваториально-тропических островов осуществлялись в рамках международной биологической программы ЮНЕСКО «Человек и биосфера», проект № 7 «Экосистемы островов и их рациональное использование». Всего было

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии и ландшафтоведения, зав. кафедрой, чл.-корр. РАН, профессор; e-mail: diakonov.geofak@mail.ru

организовано пять рейсов, где ландшафтными исследованиями руководили Ю.Г. Пузаченко (1976/77 и 1980 гг.) и К.Н. Дьяконов (1984, 1987 и 1990 гг.).

Генеральная цель ландшафтных исследований в указанных экспедициях – развитие теории ОЛ (как составной части ландшафтоведения), то есть подтверждение гипотез или ранее установленных закономерностей на ограниченном числе островов.

Как ни странно, но до сих пор не полностью сформулированы основные методологические и теоретические положения ОЛ как целостного учения. Тема статьи не предусматривает подробное рассмотрение этой проблемы. Однако логично показать место вопроса о специфике высотной поясности на экваториально-тропических островах в контексте общей теории ОЛ.

В конспективной форме теория ОЛ включает следующие положения и разделы. 1. Методологическая база – теория нуклеарных (ядерных) геосистем–хорионов [Ретеюм, 1988]. Островная суша – ядро, которое находится в системе прямых и обратных связей с окружающей водной массой и литоралью. 2. При изучении пространственно-временной организации геосистем острова необходимо основываться на ряде методологических положений, одним из которых выступает принцип дополнительности В.Н. Солнцева – мозаичность, ориентированность и биоциркуляционность. 3. Важнейшими внешними факторами формирования геосистем островов являются: степень изоляции (удаленность от материка), специфика циркуляции атмосферы и количество атмосферных осадков, радиационный баланс, тектоника, геологическая история. 4. Факторы, обуславливающие структуру, функционирование и эволюцию островных геосистем, присущие острову: его площадь и высота над уровнем моря; время аэриального существования (развития); сочетание различных типов морфолитогенеза, локальные и региональные показатели экспозиции и крутизны склонов. 5. Проблему пространственно-временной организации геосистем островов (основное содержание ОЛ) можно частично считать решенной, если составлены ландшафтные карты островов и разработана как классификация островов, так и классификация геосистем разного пространственного масштаба. Благодаря исследованиям на тропических островах и в Северной Пацифике Г.М. Игнатьева, Ю.Г. Пузаченко, К.Н. Дьяконова, А.Н. Иванова [Иванов, 2009, 2014] была доказана применимость использования принципов общепринятой классификации ландшафтов, разработанных советскими учеными Н.А. Гвоздецким, А.Г. Исаченко, В.А. Николаевым. 6. Но главное, необходимо объяснить геофизическую сущность и причины закономерностей пространственно-временной организации.

Цель исследования – выявить совместную роль площади, высоты острова и типа атмосферной циркуляции в положении верхней границы лесного пояса.

Материалы и методы исследования. Важнейшие характеристики объектов исследования для решения поставленной цели представлены в табл. 1.

В основу написания статьи положены данные по островам Као, Силуэт, Уполу, Вити Леву и Савайи, собранные в экспедициях на НИС «Каллисто», «Академик Виноградов» и «Академик Несмеянов». Для характеристик других островов использованы: [Физико-географический атлас Мира, 1964; Resources and Environment ..., 1998]; отдельные статьи в Большой Российской энциклопедии, монографии, статьи и справочники: [География Сейшельских островов, 1990; Игнатьев, 1979; Кислов, 2011; Климатический ..., 1974; Пузаченко и др., 1994; Bruijnzeel et al., 2011; Naila, 1983; Clark et al., 2020; Wright, 1963]. Для Сейшельских островов и архипелага Тонга использованы навигационные карты в масштабах 1:10 000 или 1:25 000.

При подборе островов мы руководствовались следующими принципами. По своему генезису они должны быть преимущественно вулканическими, а их площадь находится в прямой зависимости от высоты. Для разнообразия был взят материковый остров Мадагаскар – типичный кратон, отделившийся от Африканской платформы в мезозойский период. Остров Новая Каледония имеет материковый тип земной коры, о чем свидетельствует его асейсмичность и отсутствие действующих вулканов [Пушаровский, 1972]. Вити-Леву представляет собой эрозионно-вулканическое нагорье, на котором нет действующих вулканов [Doumenge, 1966]. Площадь островов – важнейший фактор положения верхней границы леса, изменяется в значительных пределах: от 12–15 км² до 16 тыс. км² и как особо большой остров-материк – Мадагаскар, площадью 58 700 км².

Учитывая, что самый высокий хребет острова Мадагаскар Царатанак, достигающий высоты 2876 м, расположен в северо-восточной его части и относительно изолирован от центральной и южной территории острова, была рассчитана площадь суши, на которой происходит трансформация натекающей воздушной массы с Индийского океана и которая во многом предопределяет высоту границы лесного пояса. Физического смысла в учете всей площади острова нет.

Рассматриваемые острова расположены в двух климатических поясах: в тропическом или субэкваториальном. Восемь из двенадцати островов характеризуются четко выраженной пассатной циркуляцией. Острова Мадагаскар и Силуэт имеют признаки как пассатной, так и муссонной циркуляции; Лорд-Хау и Рауль расположены в областях муссонных ветров (см. табл. 1). Радиационный индекс сухости на уровне нижнего высотного пояса изменяется от 0,63 до 0,96. Зональным типом ландшафта чаще всего выступают субэкваториальные или тропические вечнозеленые пассатные леса. На островах Као, Лорд-Хау, Новая Каледония и Рауль, которые расположены сравнительно недалеко от южной границы тропического пояса, леса чаще всего листопадно-вечнозеленые.

Полевые исследования осуществлялись на трех масштабных физико-географических уровнях: 1) ландшафтном, когда изучался остров в целом (первич-

Т а б л и ц а 1

Характеристика объектов исследования

Название острова	Координаты	Площадь, тыс. км ²	Высота над уровнем морья, м	Радиационный индекс сухости	Направление ветра I/VII	Зональный тип ландшафта
о. Као, архипелаг Тонга	$\varphi = 19^{\circ}40'$ ю. ш. $\lambda = 175^{\circ}01'$ з. д.	0,012	1046	0,98	ВЮВ/ЮВ	Влажные пассатные тропические леса
о. Силуэт (Сей- шельские о-ва)	$\varphi = 4^{\circ}29'$ ю. ш. $\lambda = 55^{\circ}13'$ в. д.	0,020	752	0,76	С/ЮЮВ	Субэкваториальные влажные вечнозеленые муссонные леса
о. Уполу (Самоа)	$\varphi = 13^{\circ}55'$ ю. ш. $\lambda = 171^{\circ}45'$ з. д.	2,83	1082	0,67	ЮЮВ/ЮВ	Влажные вечнозеленые пассатные тропические леса
о. Вити-Леву	$\varphi = 17^{\circ}48'$ ю. ш. $\lambda = 178^{\circ}00'$ в. д.	10,4	1324	0,68	ВЮВ/ЮВ	Влажные пассатные тропические леса
о. Гавайи, наветренные склоны	$\varphi = 21^{\circ}18'$ с. ш. $\lambda = 157^{\circ}48'$ з. д.	10,43	4205	0,65	СВ/СВ	Влажные пассатные тропические вечнозеле- ные леса
о. Лорд-Хау	$\varphi = 31^{\circ}31'$ ю. ш. $\lambda = 159^{\circ}05'$ з. д.	0,015	875	0,89	СЗ/ЮЗ	Влажные листопад- но-вечнозеленые леса с муссонной циркуля- цией
о. Мадагаскар, наветренные склоны	$\varphi = 12-25^{\circ}$ ю. ш. $\lambda = 43-50^{\circ}$ в. д.	58,7	2886	0,60	С/ЮВ	Влажные тропические леса с признаками мус- сонной циркуляции
о. Новая Каледония	$\varphi = 21^{\circ}$ ю. ш. $\lambda = 165^{\circ}$ з. д.	16,0	1628	0,79	В/ЮВ	Тропические леса с пассатной циркуляцией
о. Савайи (Самоа)	$\varphi = 13^{\circ}35'$ ю. ш. $\lambda = 172^{\circ}25'$ з. д.	1,71	1858	0,67	ЮЮВ/ЮВ	Влажные тропические вечнозеленые пассат- ные леса
о. Коломбангара, группа Соломоновых о-вов	$\varphi = 7^{\circ}58'$ ю. ш. $\lambda = 157^{\circ}04'$ в. д.	0,688	1661	0,65	В/ЮВ	Субэкваториальные влажные пассатные леса
о. Бугенвиль, группа Соломоновых о-вов)	$\varphi = 6^{\circ}08'$ ю. ш. $\lambda = 155^{\circ}16'$ в. д.	9,32	2715	0,63	ССЗ/ЮВ	Субэкваториальные влажные вечнозеленые пассатные леса
о. Рауль	$\varphi = 29^{\circ}15'$ ю. д. $\lambda = 177^{\circ}55'$ з. д.	0,03	516	0,96	ВЮВ/СЗ	Тропические листопад- но-вечнозеленые мус- сонные леса

ным результатом являлась ландшафтная карта); 2) на уровне урочищ путем крупномасштабного ландшафтного профилирования и использованием метода комплексной ординации В.Б. Сочавы с регулярным шагом опробывания в 30 м; 3) на уровне отдельных наиболее типичных элементарных геосистем (фаций). В последнем случае наибольшее внимание уделялось описанию почв и растительного покрова. На ряде островов по профилям производились элементарные метеорологические наблюдения за температурой и влажностью воздуха. В целом использовалось стандартное оборудование ландшафтных исследований.

Обсуждение результатов. Используя данные по площадям островов и верхней границы субэкваториальных и тропических лесов, была найдена логарифмическая зависимость верхней границы леса от площади (рисунок). Она выражается уравнением:

$$Y = 358,75X + 188,75; R^2 = 0,830,$$

где Y – положение верхней границы леса, а X – десятичный логарифм площади острова, R^2 – мера связи (рис.). Положение границы можно определить примерно, с точностью $\pm 100-150$ м. В условиях преобладания пассатной циркуляции приведены значения границ на склонах юго-восточной – юго-западной экспозиций, то есть на наветренных. Другой фак-

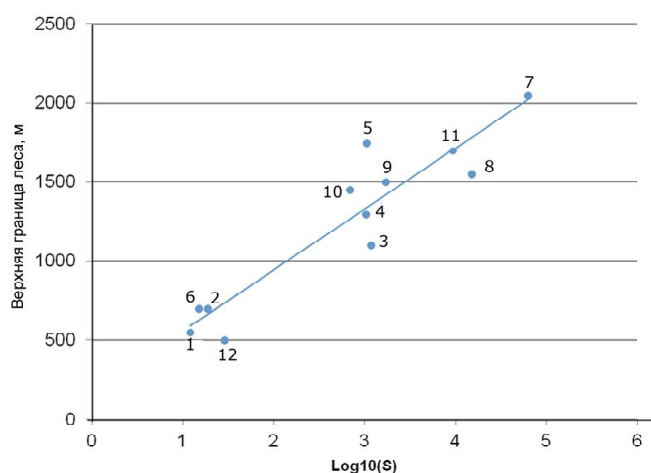


Рис. Зависимость между площадью острова и верхней границей леса: 1 – о. Као (архипелаг Тонга), 2 – о. Силуэт (Сейшельские), 3 – о. Уполу (Самоа), 4 – о. Вити-Леву (архипелаг Фиджи), 5 – Гавайские острова, 6 – Лорд-Хау, 7 – о. Мадагаскар, 8 – о. Новая Каледония, 9 – о. Савайи (Самоа), 10 – о. Коломбангара (архипелаг Соломоновы острова), 11 – о. Бугенвиль (архипелаг Соломоновы острова), 12 – о. Рауль (архипелаг Кермадек)

Fig. Dependence between the island area and the upper forest line. Islands: 1 – Kao (Tonga archipelago), 2 – Silhouette (Seychelles), 3 – Upolu (Samoa), 4 – Viti-Levu (Fiji archipelago), 5 – Hawaiian Islands, 6 – Lord-Howe, 7 – Madagascar, 8 – New Caledonia, 9 – Savaii (Samoa), 10 – Kolombangara (Solomon Islands Archipelago), 11 – Bougainville (Solomon Islands Archipelago), 12 – Raoul (Kermadec archipelago)

тор, осложняющий точное определение границы, заключается в ее постепенности. Широтная зональность, за небольшим исключением, представлена субэкваториальными или тропическими вечнозелеными типами ландшафта. Высотная дифференциация внутри одной зоны проявляется уже с высот 150–200 м, например, на островах Силуэт, Фелисите, Фрегат (Сейшельские); островах в Южно-Китайском море Шон (высота 529 м, $\varphi=8^{\circ}41'$ с. ш., $\lambda=106^{\circ}35'$ в. д.) и Байкань (высота 323 м, $\varphi=8^{\circ}40'$ с. ш., $\lambda=106^{\circ}41'$ в. д.); о. Аполима (Самоа) и др. Причина – увеличение атмосферных осадков с высотой с градиентом, достигающим на о. Уполу 260–270 мм/100 м, на о. Силуэт – 190 мм/100 м. Типичные вечнозеленые леса с высотой сменяются туманным низколесьем или редкостойными лесами, которые переходят в безлесный пояс, образованный либо зарослями папоротников высотой до 150–180 см на 500 м над уровнем моря, постепенно прижимающихся к земной поверхности до высоты 1040 м на о. Као, либо редкими невысокими кустарниками типа средиземноморского маквиса [Игнатьев, 1979] на склонах южной экспозиции, подверженных действию холодных ветров (о. Лорд-Хау).

На о. Уполу, как показали маршрутные наблюдения в самой высокой его части, граница леса, видимо, определяется не влажностью воздуха, а ветровым режимом. Низколесья распространены фрагментарно и отражают местные условия мезорельефа. Пояс высокогорных кустарников и туман-

ных редколесий здесь отсутствует. Он появляется на рядом расположенном острове Савайи, высота которого более 1800 м, на что обратил внимание Г.М. Игнатьев [1979].

Своеобразна структура высотной поясности на Гавайских островах. В нижнем лесном поясе на северо-восточном наветренном макросклоне до высоты 600–700 м, где выпадает не более 1200–1400 мм осадков в год, господствуют сезонно-влажные листопадно-вечнозеленые леса. Постоянно влажные вечнозеленые леса распространены до высоты 1200 м. Туманное низколесье начинается с высоты 1700 м, а на 1900–2000 м уступает место субальпийским лугам и кустарниковым пустошам, причем наветренные склоны получают осадков до 6000 мм/год [Bruijnzeel et al., 2011].

Совместная роль факторов высоты и размеров острова в спектре высотной поясности и в разнообразии его ландшафтной высотной дифференциации состоит в том, что чем больше площадь острова, тем в большей степени трансформируется над ней влажная океаническая масса и тем выше (над уровнем моря) расположен уровень конденсации влаги. В дневные часы вода, имеющая удельную теплоемкость 4187 Дж/кг $^{\circ}\text{C}$, прогревается медленнее, чем суша. Удельная теплоемкость минерального субстрата равна примерно 754–920 Дж/кг $^{\circ}\text{C}$. Структура теплового баланса ландшафтов островов принципиально отличается от структуры морей и океанов тем, что турбулентный поток тепла от водной поверхности составляет 217–435 МДж/м² год, а на суше он равен от 435 до 100 МДж/м² год [Будыко, 1971]. Заметим, что острова, как и водохранилища, трансформируют натекающие на них воздушные массы, а площадь и глубина водохранилищ определяет размер их влияния на прилегающую территорию [Вендров и др., 1970; Тимофеев, 1963].

Конечно, нельзя не учитывать вертикальный градиент увеличения атмосферных осадков, который в пределах высот до 2–3 км на рассматриваемых островах равен от 150 до 290 мм на 100 м высоты. Но с высотой возрастают не только осадки, но и относительная влажность воздуха, достигая в туманных лесах 90–95%. При влажности около 100% интенсивность фотосинтеза резко падает, так как транспирация воды из листьев практически не происходит. Отдельные замеры относительной влажности воздуха на высотах 500–560 м показали, что на уровне 2,5 м от поверхности влажность воздуха составляла 95–99%, а в приземном слое была меньше на 3–5%.

В отличие от арктического, субарктического, умеренного и отчасти субтропического поясов на рассматриваемых островах высотная граница леса не обусловлена термическим режимом, так как средняя месячная температура воздуха самых прохладных месяцев в году на верхней границе туманных лесов в июле и августе не менее 16–18 $^{\circ}$.

На острове Као, осуществляя ландшафтные исследования в третьей декаде июня, мы провели серию метеорологических наблюдений по профилю

от уреза воды до высоты 560 м. Погодные условия: облачность 10/10 баллов. Верхняя точка измерения – крутой склон 22–30° юго-юго-восточной экспозиции, в интервале высот 500–580 м, сложенный с поверхности до глубины 0,7 м плащом пирокластического материала (шлаками до 3–6 см в диаметре), покрытый папоротниковым казуариновым редко- и низколесьем, местами – папоротниково-плауновой растительностью на грубогумусовых примитивных вулканических щебнистых тяжелосуглинистых почвах². Мощность горизонта A_1 составила от 5–6 до 10 см; A_1 –В до 12–15 см от поверхности. Данные измерения температуры воздуха на высоте 2 м приведены в табл. 2.

Анализ таблицы позволяет, во-первых, выявить зону интенсивного влияния океана на местный климат острова – примерно до 40 м. Во-вторых, констатировать влажноадиабатическое изменение температуры с высотой, что является следствием выделения теплоты конденсации. Об этом свидетельствует вертикальный градиент температуры воздуха в слое 75–560 м, равный 0,31. Такой градиент характерен и для многих других островов с пассатной циркуляцией. Явление пассатной инверсии не обнаружено, но пассатную изотермию можно предположить на более высоких гипсометрических уровнях.

С площадью островов (и не только экваториально-тропических) связана густота речной сети, разнообразие ее строения и число порядков рек. Между размером острова и разнообразием его ландшафтной структуры связь очевидна. Об этом свидетельствует весь эмпирический материал ландшафтного картографирования и профилирования. Мы отмечали, что сущность влияния размера островной суши заключается в соотношении периода без осадков (T) и времени добегания осадков в океан (t) – функция размера и высоты острова, рельефа, сла-

гающих пород, испарения. Условие формирования постоянных водотоков – $T < t$. Постоянные водотоки и связанные с ними приустьевые валы, поймы, староречья, террасы, склоны выступают «организаторами» пространственной структуры ландшафтов. Отметим в этом отношении работу А.Н. Иванова [2014], в которой показана логарифмическая зависимость густоты речной сети от площади островов, входящих в состав Шантарского архипелага.

Выводы:

– площадь и высота острова, наряду с его удаленностью от материков, – важнейшие факторы, определяющие био- и ландшафтное разнообразие и спектр высотной поясности, в том числе границу леса;

– в развивающейся эмпирической теории островного ландшафтоведения очень важна геофизическая составляющая для понимания специфики их структуры, динамики, функционирования и эволюции;

– острова в обширном экваториально-тропическом поясе, характеризуются не только относительно устойчивым климатом в плейстоцене, но и устойчивой атмосферной циркуляцией для каждого из островов, важная из которых пассатная;

– на примере различных по размеру островов, характеризующихся высотной поясностью и относящихся к типам субэкваториальных и тропических влажных и вечнозеленых лесов, установлена логарифмическая зависимость верхней границы леса от их площади;

– положение границы леса не обусловлено термическими условиями, а в первую очередь определяется уровнем конденсации влаги и относительной влажностью воздуха;

– с увеличением площади острова над ним более существенно трансформируется влажная океаническая воздушная масса и возрастает уровень конденсации влаги.

Таблица 2

Изменение температуры воздуха с высотой и расстоянием от уреза воды

Форма поверхности	Вода	Урез	Клиф	Пологий склон		Крутой склон			
Высота, м	0	2	8	25	75	370	400	529	560
Расстояние от уреза, м	–12	1	11–12	110	420	1090	1165	1710	1800
Температура, °C	24,1	23,5	22,4	19,8	19,4	19,1	18,9	18,3	17,9
Вертикальный градиент, °C/100 м	от уреза до 25 м – 14,7; от 25 до 560 м – 0,31								

Благодарности. Автор благодарит за полезные консультации и помощь в работе Т.И. Харитонову, Ю.В. Логунову, В.М. Матасова и Е.Г. Нагорную.

² Использовано рабочее название почвы, предложенное В.О. Таргульяном.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Будыко М.И. Климат и жизнь. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 472 с.
- Вендров С.Л., Дьяконов К.Н., Ретеюм А.Ю. Влияние водоемов на климат побережий в различных географических зонах // Влияние водохранилищ лесной зоны на прилегающие территории. М.: Наука, 1970. С. 6–12.
- География Сейшельских островов // Экология и рациональное использование островных экосистем / Под ред. П.А. Каплина, В.Н. Космынина, Л.Г. Никифорова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. 1267 с.
- Григорьев А.А., Будыко М.И. О периодическом законе географической зональности // Доклады АН СССР. 1956. Т. 110. № 1. С. 129–132.
- Иванов А.Н. Проблемы изучения ландшафтов островов // Изв. РГО. 2009. Вып. 4. С. 4–11.
- Иванов А.Н. Проблемы островного ландшафтоведения // Вопросы географии. Горизонты ландшафтоведения. Вып. 138. М.: Кодекс, 2014. С. 138–158.
- Игнатъев Г.М. Тропические острова Тихого океана. М.: Мысль, 1979. 270 с.
- Кислов А.В. Климатология. Учебник для вузов. М.: Академия, 2011. 224 с.
- Климатический справочник зарубежной Азии. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 448 с.
- Пианка Э.Р. Эволюционная экология. М.: Мир, 1981. 400 с.
- Пузаченко Ю.Г., Головач С.И., Длусский Г.М., Дьяконов К.Н., Захаров А.А. Животное население островов Юго-Западной Океании (эколого-географические исследования). М.: Наука, 1994. 253 с.
- Пузаченко Ю.Г., Дьяконов К.Н. Острова в океане. Эколого-географические исследования на островах Тонга и Западно-го Самоа // Наука в СССР. № 4. 1982. С. 76–85.
- Пушаровский Ю.М. Введение в тектонику Тихоокеанского сегмента Земли // Труды ГИН. Вып. 234. М.: Наука, 1972.
- Ретеюм А.Ю. Земные миры. М.: Мысль, 1988. 268 с.
- Тимофеев М.П. Метеорологический режим водоемов. Л.: Гидрометеиздат, 1963. 291 с.
- Физико-географический атлас Мира / Под ред. акад. И.П. Герасимова. АН СССР и ГУГК ГК СССР. М., 1964. 298 с.
- Bruijnzeel L.A., Scatena F.N., Hamilton L.S. Tropical Montane Cloud Forests: Science for Conservation and Management. Cambridge University Press, 2011.
- Clark V., Reeves M., Miller S. Hawaiian Islands Wet Forest. Encyclopedia of the World Cs Biomes, 2020.
- Doumenge F. L Chomme dans le Pacifique Sud. Paris, Publ. de la Socete des Oceanistes, 1966, no. 19.
- Haila Y. Ecology of island colonization by northern land birds: a quantitative approach. Hensinki, Univ. Press, 1983.
- MacArthur R.H., Wilson T.O. The theory of island biogeography. Princeton Univ. Press, 1967, 203 p.
- Mühlenberg M., Laipold D., Mader H.J., Steinhaut D. Island ecology of Arthropods. II. Niches and relative abundance of Seychelles ants (Formicidae) in different habitats. *Oecologia*, 1977, vol. 29(2), p. 135–144. DOI: 10.1007/bf00345793.
- Resources and environment : world atlas. Institute of Geography, Russian Academy of Sciences. Prof. V.M. Kotlyakov (Ed.), Vienna, Ed. Holz, 1998.
- Simberloff D.S. Experimental zoogeography of islands: effect of island size. *Ecology*, 1976, vol. 57, p. 195–205.
- Williamson V.N. Island populations. Oxford: Univer, Press, 1981.
- Wright A.C.S. Soils and land use of Western Samoa. Wellington, Res. Soil bureau bull., 1963, no. 22.

Поступила в редакцию 06.07.2020

После доработки 03.08.2020

Принята к публикации 06.08.2020

K.N. Dyakonov¹

GEOPHYSICAL FACTORS OF THE UPPER FOREST LINE ON EQUATORIAL AND TROPICAL ISLANDS OF THE PACIFIC AND INDIAN OCEANS

Joint effect of altitude, island area and atmospheric circulation for the altitudinal position of the forest belt is described basing on publications and materials of six voyages to the tropical islands of the Pacific and Indian oceans. Two landscape types prevail above the foggy forest zone, i.e. fern-wet-meadow on the slopes facing the trade winds and dry shrublands, analogues of subtropical maquis, above the upper limit of trade winds or on the leeward slopes. In the former case the upper forest line depends on the permanently high relative humidity, up to 95–100%. A logarithmic dependence of the upper forest line altitude on the island area has been revealed. The island area determines the degree of transformation of marine air masses entering the islands. Specific heat capacity of the island surface is 4–5 times lower than that of water; in the daytime a greater share of energy is consumed for turbulent heat exchange with the atmosphere as compared to water. Therefore, the level of moisture condensation on small islands is lower than on larger ones, and the process of photosynthesis in trees is either inhibited or absent.

Key words: physical-geographical altitudinal zonality, island area and altitude, transformation of air masses, relative air humidity

Acknowledgements. The author is grateful to T.I.Kharitonova, Yu.V. Logunov, V.M. Matasov and E.G. Nagornaya for the fruitful consultations and assistance in the study.

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Science, Head of the Department, Professor, Corresponding member of the RAS; e-mail: diakonov.geofak@mail.ru

REFERENCES

- Barry R.G. *Mountain Weather and Climate*. Cambridge Univer, 2008, 506 p.
- Bruijnzeel L.A., Scatena F.N., Hamilton L.S. (ed.). *Tropical montane cloud forests: science for conservation and management*. Cambridge University Press, 2011.
- Budyko M.I. *Klimat i zhizn* [Climate and life]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1971, 472 p. (In Russian)
- Clark V., Reeves M., Miller S. *Hawaiian Islands Wet Forest. Encyclopedia of the World Cs Biomes*, 2020.
- Doumenge F. *L'homme dans le Pacifique Sud: étude géographique*. Paris, Musée de l'homme, 1966, no. 19.
- Fiziko-geograficheskiy atlas mira [Physical-geographical atlas of the world]. I.P. Gerasimov (Ed.). Academy of Sciences of the USSR and GUGK GKG USSR. Moscow, 1964, 298 p. (In Russian)
- Geografiya Seyshel'skikh ostrovov. Ekologiya i ratsional'noye ispol'zovaniye ostrovnykh ekosistem. [Geography of Seychelles. Ecology and rational use of island ecosystems]. P.A. Kaplin, V.N. Kosmynin, L.G. Nikiforov (Eds). Moscow, MSU Publ., 1990, 1267 p. (In Russian)
- Grigor'ev A.A., Budyko M.I. O periodicheskom zakone geograficheskoi zonal'nosti [About the periodic law of geographical zonality]. *Doklady of the Russian Academy of Sciences*, vol. 110, no. 1, 1956, p. 129–132. (In Russian)
- Haila Y. *Ecology of island colonization by northern land birds: a quantitative approach*. University of Helsinki, 1983.
- Ignatiev G.M. *Tropicheskiye ostrova Tikhogo okeana* [Tropical Pacific Islands]. Moscow, Mysl' Publ., 1979, 270 p. (In Russian)
- Ivanov A.N. Problemy izucheniya landshaftov ostrovov [Problems of studying the island landscapes]. *Izvestiya RGO*, 2009, vol. 141, iss. 4, p. 4–11. (In Russian)
- Ivanov A.N. [The problems of island landscapes studies] *Voprosy geografii, Gorizonty landshaftovedeniya* [Issues of Geography. Horizons of Landscape Science], vol. 138, Moscow, Kodeks Publ., 2014, p. 138–158. (In Russian)
- Kislov A.V. *Klimatologiya* [Climatology]. Textbook for high schools. Moscow, Akademiya Publ., 2011, 224 p. (In Russian)
- Klimaticheskij spravochnik Zarubezhnoy Azii [Climates of Foreign Asia]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975, 448 p. (In Russian)
- MacArthur R.H., Wilson T.O. *The theory of island biogeography*. Princeton Univ. Press, 1967, 203 p.
- Mühlenberg M., Leipold D., Mader H.J., Steinhauer B. Island ecology of Arthropods. II. Niches and relative abundances of Seychelles ants (Formicidae) in different habitats. *Oecologia* (Berlin), 1977, vol. 29, p. 135–144. DOI: 10.1007/bf00345793.
- Pianka E.R. *Evolutionary Ecology*. Harper & Row, 1973, 356 p.
- Pushcharovskiy Yu.M. *Vvedeniye v tektoniku Tikhookeanskogo segmenta Zemli* [Introduction to the tectonics of the Pacific segment of the Earth]. Trudy GIN, vol. 234, Moscow, Nauka Publ., 1972. (In Russian)
- Puzachenko Yu.G., Dyakonov K.N. Ostrova v okeane. Ekologo-geograficheskiye issledovaniya na ostrovakh Tonga i Zapadnogo Samoa [Islands in the ocean. Ecological and geographical research on the islands of Tonga and Western Samoa]. *Nauka v SSSR*, no. 4, 1982, p. 76–85. (In Russian)
- Puzachenko Yu.G., Golovach S.I., Dlussky G.M., Dyakonov K.N., Zakharov A.A. Zhivotnoye naseleniye ostrovov Yugo-Zapadnoy Okeanii (ekologo-geograficheskiye issledovaniya). [The animal population of the islands of Southwestern Oceania (ecological and geographical studies)]. Moscow, Nauka Publ., 1994, 253 p. (In Russian)
- Resources and Environment. World Atlas*. Institute of Geography, Russian Academy of Sciences. V.M. Kotlyakov (Ed.). Vienna, Ed. Hölzel, 1998, 190 p.
- Reteyum A.Ju. *Zemnyye miry* [Earthly worlds]. Moscow, Mysl' Publ., 1988, 268 p. (In Russian)
- Simberloff D.S. Experimental zoogeography of islands: effect of island size. *Ecology*, 1976, vol. 57, p. 195–205.
- Timofeev M.P. Meteorologicheskii rezhim vodoyemov [Meteorological regime of water bodies]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1963, 291 p. (In Russian)
- Vendrov S.L., Dyakonov K.N., Reteyum A.Yu. [Influence of reservoirs on the climate of coasts in different geographical zones]. *Vliyaniye vodokhranilishch lesnoy zony na privileyushchiye territorii* [Influence of reservoirs of the forest zone on the adjacent territories]. Moscow, Nauka Publ., 1970, p. 6–12. (In Russian)
- Williamson V.N. *Island populations*. Oxford University Press, 1981.
- Wright A.C.S. Soils and land use of Western Samoa. *Wellington. Res. Soil bureau bull.*, 1963, no. 22.

Received 06.07.2020

Revised 03.08.2020

Accepted 06.08.2020

ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 551.435.36; 551.438.5; 913.211.17

Т.Ю. Репкина¹, Н.Н. Луговой², Ф.А. Романенко³, С.А. Лукьянова⁴

БЕРЕГА РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ: ВИДЫ И ХРОНОЛОГИЯ АНТРОПОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ

Впервые выполнен обзор антропогенных изменений береговой зоны морей Российской Арктики. По данным дешифрирования космических снимков и литературным источникам составлены карты антропогенной трансформации рельефа и рельефообразующих процессов (масштаб 1:15 000 000) и соответствующие базы данных. Выделены шесть этапов освоения побережья: дореволюционный (включает 2 подэтапа – до XVIII века и с XVIII века до 1918 г.), Комсевеопути (1919–1932), Главсевморпути (1933–1963), «ведомственный» (1964–1991), смены хозяйственного уклада (1992–1998) и неокapиталистический (1999 – настоящее время) с досанкционнoм (1999–2014) и санкционнoм (после 2014 г.) подэтапами. Определены специфичные для каждого из них виды антропогенного воздействия на береговую зону. На всех этапах, за исключением 1992–1998 гг., нагрузка на берега нарастала, а антропогенные изменения накапливались. Релаксация берега после снятия нагрузки произошла только там, где в береговой зоне не были созданы инженерные сооружения. Однако антропогенные изменения берегов Российской Арктики все еще имеют локальный характер. Выявлено 89 участков антропогенного воздействия общей протяженностью около 1% от длины береговой линии арктических морей России. На 56% из них трансформация рельефа и рельефообразующих процессов связана со строительством в береговой зоне объектов промышленного, военного и транспортного назначения, а на 44% – с функционированием объектов, расположенных за ее пределами. На 62% участков изменения берегов незначительны и локальны; на 20% рельефообразующие процессы (береговые, криогенные, склоновые, эоловые) усилились на расстоянии до 1 км от источника воздействия. На 18% участков трансформация рельефообразующих процессов вызвала быстрое отступление берегов и/или затопление прибрежных территорий, а изменения распространились на 1–12 км от источника воздействия. Наиболее глубокие изменения в береговой зоне вызывает строительство портовых сооружений и переходов трубопроводов, при этом особенно уязвимы к воздействию человека аккумулятивные (пляжевые и лагунные) и термоабразионные берега.

Ключевые слова: морские берега, антропогенные изменения, геоморфологические процессы

Введение. Проблемам антропогенного морфогенеза на берегах морей посвящена обширная литература. В частности, определены виды воздействия, вызывающие наиболее сильные и долговременные нарушения поперечного профиля и контура берега, состава наносов и берегоформирующих процессов [Берега, 1991; Айбулатов, Артюхин, 1991; Жиндарев, 2013 и др.]. Выделены типы трансформации рельефа береговой зоны под действием разных видов антропогенной нагрузки [Бровко, Малюгин, 2015]. Берега арктических морей отличаются особым набором видов природопользования [Романенко, 2007б; Романенко, 2015; Бредихин и др., 2020]; за счет присутствия морского льда и многолетнемерзлых пород их отклик на воздействие человека и изменение климата отличается от такового на берегах морей умеренных широт [Арэ, 1980; Берега, 1991; Lantuit et al., 2012; Ogorodov et al., 2016

и др.]. За несколько тысячелетий освоения, с тех пор, когда на берега арктических морей пришли древние люди, здесь сформировались своеобразные комплексы антропогенных форм рельефа, в том числе рельефоидов [Розанов, 1990], и рельефообразующих процессов, спровоцированных человеком и часто осложняющих хозяйственную деятельность [Лукьянова и др., 2007]. Состав и распространение таких комплексов менялись во времени вслед за сменой преобладающих видов антропогенной нагрузки. Проблемы реакции арктических берегов на строительство крупных портов и переходов через береговую зону подводных трубопроводов рассматривались в рамках инженерно-геологических изысканий и научных исследований [Камалов и др., 2006; Ермолов, Прядин, 2013; Ogorodov et al., 2016; Novikova et al., 2018 и др.]. В то же время, воздействие на берега Российской Арктики небольших, но более много-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, ст. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: t-repkina@ya.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, науч. с.; e-mail: lugovoyu-n@ya.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, вед. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: faromanenko@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, ст. науч. с., канд. геогр. н.

численных объектов – причальных сооружений, селитебных, промышленных и военных объектов, расположенных на прибрежных террасах, а также изменение антропогенного воздействия на берега в пространстве и времени ранее не изучались. Обобщение информации о преобразовании человеком арктических берегов России особенно важно в условиях климатических изменений, сопровождающихся увеличением штормовой активности и скорости термоабразии и термоденудации [Shabanova et al., 2018], а также в связи с перспективами развития Арктики.

Цель исследования – региональный обзор истории, видов и степени антропогенных изменений рельефа и рельефообразующих процессов береговой зоны (БЗ) морей Российской Арктики. Границы БЗ рассматриваются в понимании авторов монографии «Берега» [1991]. Поэтому антропогенные объекты, расположенные в устьевых областях рек (например, город и порт Архангельск), не были объектами исследования.

Материалы и методы исследований. Данные о распространении берегов разных генетических типов, об антропогенных изменениях рельефа и рельефообразующих процессов БЗ (береговых, криогенных, склоновых, золотых) получены путём визуального дешифрирования космических снимков (КС) высокого (*Landsat*, 1984–2019 гг.; *Sentinel-2*, 2015–2019 гг.) и сверхвысокого (*Quick Bird*, 2010–2019 гг.) разрешения, доступных на открытых интернет-ресурсах *Google Earth*, *Яндекс Карты* и др. Для заверки дешифрирования использованы топографические и геологические карты средних масштабов, данные полевых исследований авторов и литературные источники. Генетические типы берегов выделены по известной классификации [Берега, 1991] (на рис. 1–3 они показаны обобщенно). Для участков, где выявлены признаки антропогенной трансформации БЗ, определен основной в настоящее время вид нагрузок (рис. 1); по опубликованным и архивным материалам [Романенко, 2007а] собрана информация о сроках начала воздействия, увеличения и уменьшения/снятия нагрузки (рис. 2); определена протяженность участка воздействия и инженерных сооружений; на относительном качественном уровне оценена степень трансформации рельефа и рельефообразующих процессов (рис. 3). Изменения последних выявлялись по морфологическим признакам при дешифрировании разновременных КС. Карты антропогенной трансформации рельефа и рельефообразующих процессов БЗ масштаба 1:15 000 000 и базы данных составлены с использованием ArcGIS. Использована Цифровая географическая основа масштаба 1:15 000 000, составленная ВСЕГЕИ [Цифровая ..., 2019].

Результаты исследований и их обсуждение. *Историю освоения арктического побережья* мы разделили на несколько этапов (см. рис. 2). Внутри *дореволюционного этапа* выделяются *допромышленный (до XVIII века)*, от которого сохранились единичные комплексы антропогенных форм

рельефа и отложений, и *капиталистический подэтапы (с XVIII века до 1918 г.)*. Первыми антропогенными объектами на арктических берегах были стоянки представителей традиционных приморских культур, хозяйственная деятельность которых основывалась на добыче рыбы и морского зверя. Остатки жилищ и культовых сооружений часто сохраняются на береговых аккумулятивных формах (Инчоун, Чукотское море и др.). С ростом заселения и освоения новых промысловых ресурсов примитивные бревенчатые причалы, промысловые избы и фактории появились на берегах Белого и Баренцева морей в XIV–XV вв., Чукотского и Берингова – в XVII–XIX вв., а Карского, Лаптевых и Восточно-Сибирского – в XIX – начале XX вв. К 1918 г. влияние человека на рельеф стало заметным на 45 участках БЗ (см. рис. 2А). Чаще всего оно заключалось в механическом воздействии на береговые аккумулятивные формы и дюнный комплекс, существенно реже – в локальных изменениях потоков наносов вблизи причальных и портовых сооружений. Крупнейшими антропогенными объектами на берегах Западной Арктики стали порты Кольского залива, Соловецкого монастыря, лесопильного завода в п. Попов Остров (Рабочеостровск), пристань в Кандалахше и мол в Раз-Наволоке (Беломорск). Восточнее примитивные портовые сооружения появились только на Диксоне (Карское море) и в Ново-Мариинске (г. Анадырь, Берингово море). Большая часть созданных на дореволюционном этапе портов и причалов функционирует до настоящего времени и влияет на рельефообразующие процессы БЗ (см. рис. 2Г). Так, современные берега Унской губы Белого моря находятся под воздействием причала, построенного в XIX в. [Сафьянов, Репкина, 2013].

Период между 1919 и 1932 гг. можно назвать *этапом Комсевепопути (КСМП)*. В 1919 г. адмирал А.В. Колчак создал Комитет Северного морского пути, продолживший свою деятельность и при Советской власти. Освоение БЗ не было системным, появились всего семь новых портов и причалов, созданных для охраны морских границ (Кувшинская Салма, Баренцево море), нужд репрессивной системы (Амбарчик, Восточно-Сибирское море), торговли и добычи рыбы (Новый Порт, Карское море), укрепления Советской власти в отдаленных районах (Найба, море Лаптевых, Ушаковское, Чукотское море; Лаврентия, Уэлькаль, Берингово море).

Многогранная и обширная деятельность *Главного управления Северного морского пути (ГУСМП)* в 1933–1963 гг. – содержание следующего этапа освоения. Тридцать лет деятельности ГУСМП стали временем быстрого освоения берегов Арктики, создания, в том числе руками узников ГУЛАГа и Дальстроя, сети портов и портопунктов – Амдерма, Диксон, Тикси, Певек, Мыс Шмидта, Providения, Эгвекинот, Беринговский, Анадырь и др., объединивших регион в единую транспортную, хозяйственную и оборонную систему. Появилось 24 новых ареала антропогенного воздействия (см. рис. 2А), а в 16 уже освоенных районах возрос-

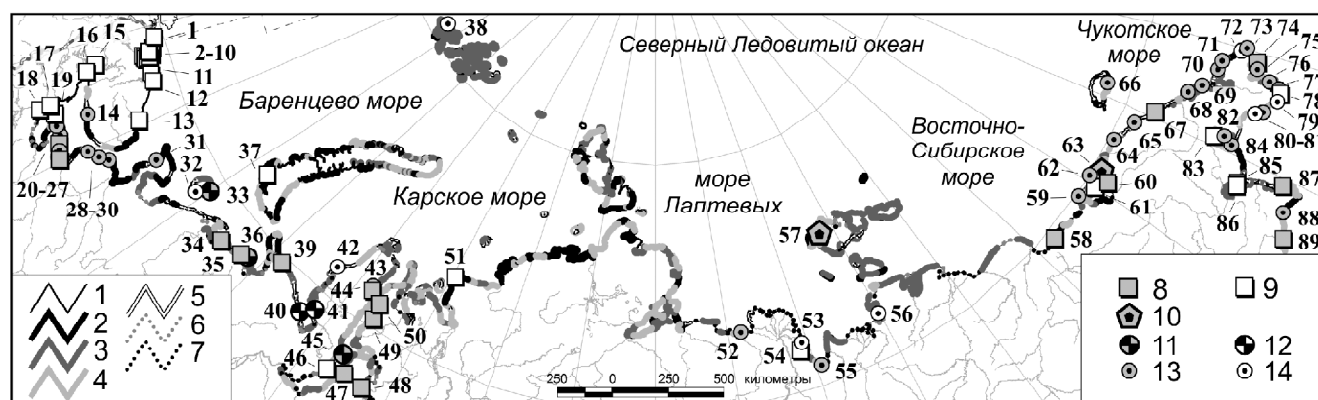


Рис. 1. Виды антропогенного воздействия на БЗ морей Российской Арктики. Условные обозначения.

Генетические типы берегов: 1 – неизменные и слабо измененные морем, 2 – абразионные (активные и отмершие) и абразионно-денудационные, 3 – термоабразионные и термоденудационные, 4 – абразионно-аккумулятивные, 5 – аккумулятивные (пляжевые и лагунные), 6 – осушные, 7 – дельтовые и эстуарные. **Участки антропогенного воздействия** (левый столбец – на аккумулятивные пляжевые и лагунные берега, правый – на берега прочих типов), вызванного: **строительством в БЗ:** 8, 9 – портовых и причальных сооружений, 10 – аэродромов, 11, 12 – переходов трубопроводов; 13, 14 – функционированием объектов, расположенных за пределами БЗ. Цифрами обозначены: 1 – Лиinahамари; 2 – Западная Лица; 3 – Видяево и Ара-Губа; 4 – Порт-Владимир; 5 – Кувшинская Салма; 6 – Гаджиево; 7 – Полярный; 8 – Белокаменка; 9 – Мурманск – Кола – Лавна; 10 – Североморск; 11 – Териберка; 12 – Дальние Зеленцы; 13 – Островной и Гремиха; 14 – Кузомень; 15 – Кандалакша; 16 – Лесозаводский; 17 – Рабоче-островск (Порт Кемь); 18 – Беломорск; 19 – Соловецкий; 20 – Летняя Золотица; 21 – Лопшеньга; 22 – Яреньга; 23 – Пертоминск; 24 – Сюзьма; 25 – Нёнокса; 26 – Солза; 27 – Северодвинск; 28 – Нижняя Золотица; 29 – Ручьи; 30 – Майда; 31 – Шойна; 32 – Бугрино; 33 – Песчанка; 34 – Дресвянка; 35 – Старый Варандей; 36 – Новый Варандей; 37 – Белушья губа; 38 – о. Земля Александры; 39 – Амдерма; 40 – Ярынская; 41 – Байдаракская; 42 – Харасавэй; 43 – Тамбей; 44 – Сабетта; 45 – мыс Каменный; 46 – Новый Порт; 47 – Ямбург; 48 – Юрхарово; 49 – Тадебья-Яха; 50 – Халцанаяха; 51 – Диксон; 52 – Ыстыннах-Хочо; 53 – Быковский; 54 – Тикси; 55 – Найба; 56 – Юкагир; 57 – о. Котельный; 58 – Амбарчик; 59 – Айон; 60 – Западный; 61 – Певек; 62 – Апапельгино; 63 – Биллингс; 64 – Янранай; 65 – Ленинградский; 66 – Ушаковское; 67 – Мыс Шмидта; 68 – Ванкарем; 69 – Нутэпэльмен; 70 – Нешкан; 71 – Энурмино; 72 – Инчоун; 73 – Уэлен; 74 – Лаврентия; 75 – Лорино; 76 – Янракынот; 77 – Новое Чаплино; 78 – Провидения; 79 – Сиреники; 80 – Нунлигран; 81 – Энмелен; 82 – Конергино; 83 – Эгвекинот; 84 – Уэлькаль; 85 – Угольные Копи; 86 – Анадырь; 87 – Беринговский; 88 – Мейныпилыгyno; 89 – Хатырка

Fig. 1. Types of anthropogenic impact on the coastal zone of the Russian Arctic seas.

Legend: **Genetic types of coasts:** 1 – unchanged and slightly modified by the sea, 2 – wave erosion (active and stable) and abrasion-denudation, 3 – thermoerosion and thermodenudation, 4 – erosion-accumulative, 5 – accumulative (beach and lagoon), 6 – intertidal, 7 – delta and estuarine. **Areas of anthropogenic impact** (the left column indicates accumulative coasts, and the right column indicates other types of coasts), induced by: **construction in the coastal zone of the:** 8, 9 – ports and berths, 10 – airfields, 11, 12 – pipeline crossings; 13, 14 – **functioning of objects located outside the coastal zone.** Numbers are indicated: 1 – Liinahamari; 2 – Zapadnaja Lica; 3 – Vidjaevo i Ara-Guba; 4 – Port Vladimir; 5 – Kuvshinskaja Salma; 6 – Gadzhievo; 7 – Poljarnyj; 8 – Belokamenka; 9 – Murmansk – Kola – Lavna; 10 – Severomorsk; 11 – Teriberka; 12 – Dal'nie Zelency; 13 – Ostrovnoj i Gremiha; 14 – Kuzomen'; 15 – Kandalaksha; 16 – Lesozavodskij; 17 – Rabocheostrovsk (Port Kem'); 18 – Belomorsk; 19 – Soloveckij; 20 – Letnjaja Zolotica; 21 – Lopshen'ga; 22 – Jaren'ga; 23 – Pertominsk; 24 – Sjuz'ma; 25 – Njonoksa; 26 – Solza; 27 – Severodvinsk; 28 – Nizhnjaja Zolotica; 29 – Ruch'i; 30 – Majda; 31 – Shojna; 32 – Bugrino; 33 – Peschanka; 34 – Dresvjanka; 35 – Staryj Varandej; 36 – Novyj Varandej; 37 – Belush'ja guba; 38 – Zemlya Aleksandry Island; 39 – Amderma; 40 – Jarynskaja; 41 – Bajdarackaja; 42 – Harasavje; 43 – Tambej; 44 – Sabetta; 45 – mys Kamennyj; 46 – Novyj Port; 47 – Jamburg; 48 – Jurharovo; 49 – Tadebja-Jaha; 50 – Halcanajaha; 51 – Dikson; 52 – Ystynnah-Hocho; 53 – Bykovskij; 54 – Tiksi; 55 – Najba; 56 – Jukagir; 57 – Kotelny Island; 58 – Ambarchik; 59 – Ajon; 60 – Zapadnyj; 61 – Pevek; 62 – Apapel'gino; 63 – Billings; 64 – Janranaj; 65 – Leningradskij; 66 – Ushakovskoe; 67 – Mys Shmidta; 68 – Vankarem; 69 – Nutjepel'men; 70 – Neshkan; 71 – Jenumino; 72 – Inchoun; 73 – Ujelen; 74 – Lavrentija; 75 – Lorino; 76 – Janrakynnot; 77 – Novoe Chaplino; 78 – Providenija; 79 – Sireniki; 80 – Nunligran; 81 – Jenmelen; 82 – Konergino; 83 – Jegvekinot; 84 – Ujel'kal'; 85 – Ugol'nye Kopi; 86 – Anadyr'; 87 – Beringovskij; 88 – Mejnypil'gyno; 89 – Hatyrka

ла нагрузка на БЗ (см. рис. 2Б), более чем в половине из них приуроченная к портам и причальным сооружениям. По функциональному назначению порты практически поровну разделились на торговые (в основном для вывоза продукции горной промышленности и северного завоза) и военные, сконцентрированные, в основном, во фьордах Кольского полуострова. На береговых барах и низких морских террасах строились аэродромы (о. Грэм-Белл, Земля Франца-Иосифа; Косистый, Хатангский залив; о. Котельный; Апапельгино и др.). В связи с организацией и укрупнением колхозов, совхозов и баз оседлости возникали новые участки традиционного

воздействия на берега (Айон, Ушаковское и др.). В ближайших окрестностях полярных станций при строительстве плотин, маяков (о. Белый), узкоколейных железных дорог (Марре-Сале), ветродвигателей (о. Визе), молов (Амбарчик, Новый Порт) из береговой полосы изымали десятки кубометров песка или гальки, особенно интенсивно так было в 1940-х гг., когда полярникам предписывалось опираться на местные стройматериалы. В 1950-х гг. многие прибрежные поселения и причалы, в том числе приуроченные к лагерям ГУЛАГа (Амбарчик, Куйвиев), были заброшены. Сейчас следы воздействия на БЗ видны только в единичных пунк-

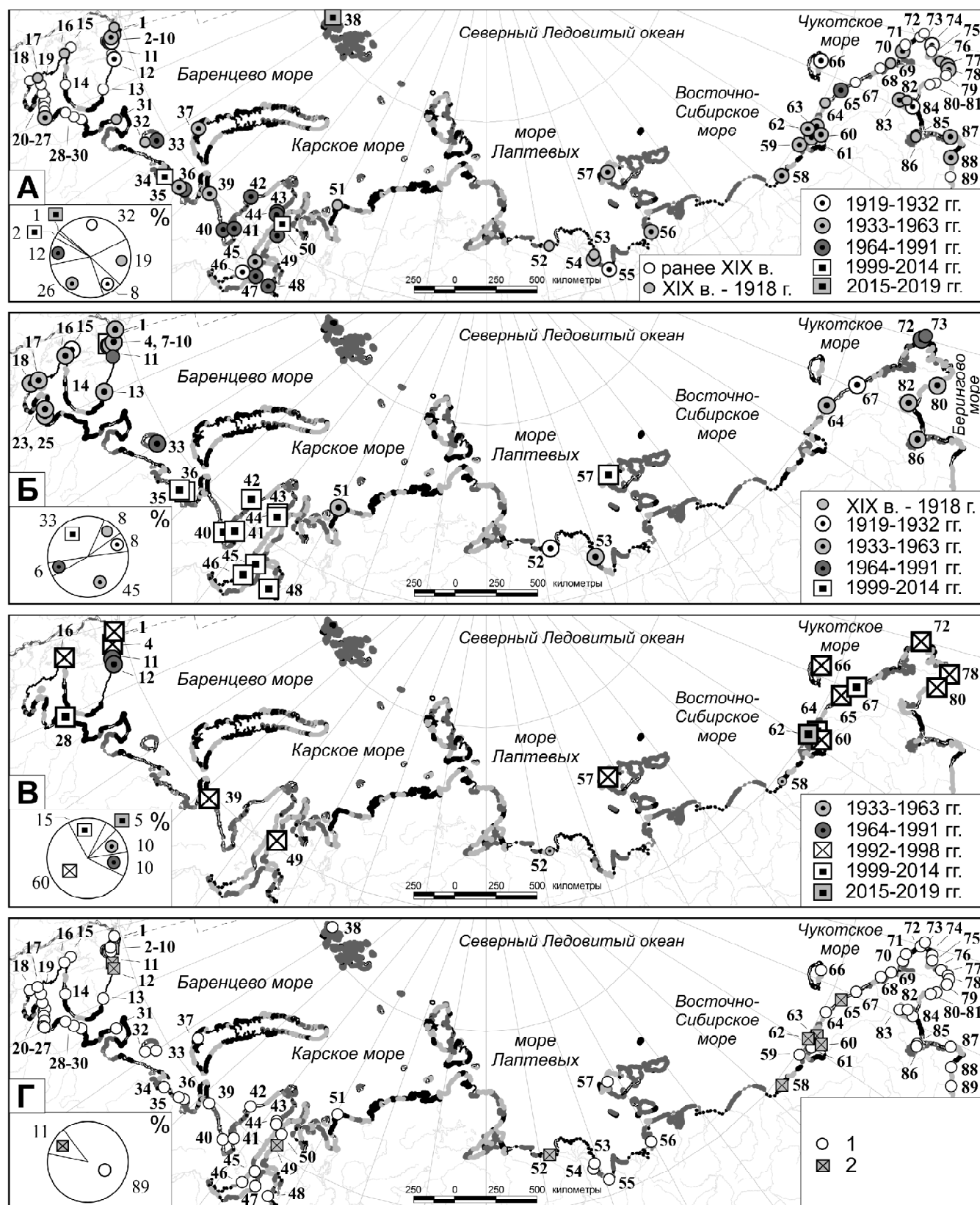


Рис. 2. Изменение антропогенной нагрузки на БЗ Российской Арктики. А – начало воздействия, Б – резкое увеличение нагрузки, В – резкое уменьшение или снятие нагрузки, Г – современное состояние объекта воздействия (1 – действующий, 2 – заброшенный, оказывает остаточное воздействие). Условными знаками показано положение участков воздействия (наименования см. рис. 1).

Круговые диаграммы показывают процентное соотношение участков на разных этапах освоения

Fig. 2. Changes of anthropogenic impact on the coastal zone of the Russian Arctic. А – the beginning of the impact, Б – a sharp increase of the impact, В – a sharp decrease or removal of the impact, Г – the current state of the affected object (1 – active, 2 – abandoned, has a residual impact). Conventional signs show the position of the impact sites (see Fig. 1 for names). Pie charts show the percentage of areas with different stages of development of the Arctic coast

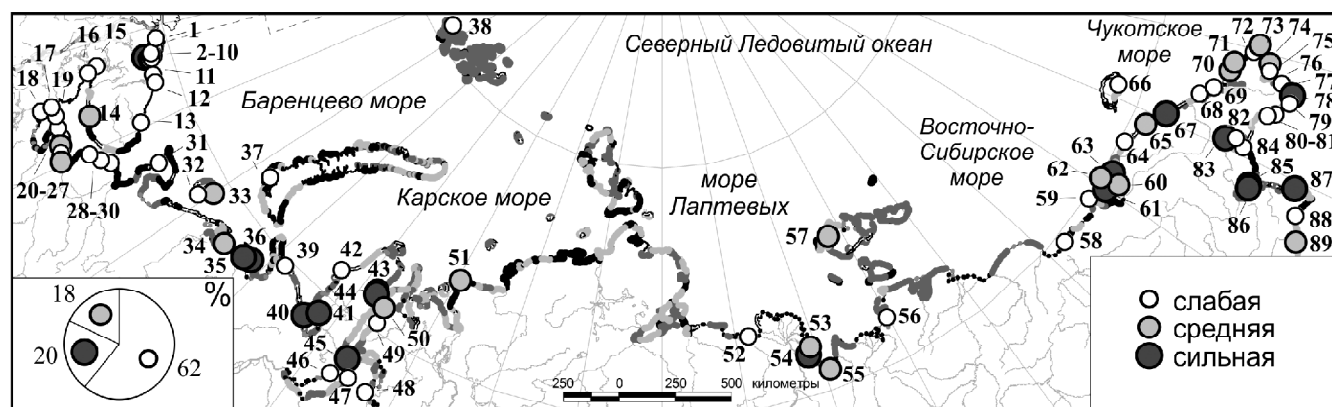


Рис. 3. Степень трансформации рельефообразующих процессов БЗ Российской Арктики (относительная качественная оценка). Условными знаками показано положение участков воздействия (наименования см. рис. 1). Круговая диаграмма показывает процентное соотношение участков с разной степенью изменения процессов

Fig. 3. Degree of transformation of relief-forming processes of the coastal zone of the Russian Arctic (relative qualitative assessment). Conventional signs show the position of impact sites (see figure 1 for names). The Pie chart shows the percentage of sites with different degrees of change in processes

тах, где сохранились полуразрушенные причальные сооружения (Амбарчик) (см. рис. 2Г).

Постепенно функции ГУСМП перешли министерствам и ведомствам, продолжавшим работы в Арктике по своим программам, часто не согласованным друг с другом. Поэтому *этап с 1964 г. до 1991 г. можно назвать «ведомственным»*. Освоение берегов было подчинено в Западной Арктике поиску, разведке и подготовке к транспортировке нефти и газа (Варандей, Песчанка, Дресвянка в Баренцевом море, берега Обской и Байдарацкой губ Карского моря), а в Восточной – добыче золота (п. Ленинградский, Чукотское море и др.). В то же время часть баз ВМФ, портов, поселков, полярных станций прекратила существование.

В 1992 году начался *этап смены хозяйственного уклада (1992–1998)*. Сырьевые отрасли – основной агент создания антропогенного рельефа, резко сократили свою активность. Хозяйственная жизнь на берегах Арктики замерла. Были заброшены (см. рис. 2В) поселки нефтегазоразведочных экспедиций (Тадибе-яха, Обская губа и др.) и приисков (Ленинградский, Чукотское море и др.), объекты транспортной инфраструктуры (аэропорты о. Котельный и др.), лесопильные заводы (п. Лесозаводский, Белое море и др.), несколько десятков полярных станций и военных объектов. Но антропогенная нагрузка на БЗ уменьшилась не столь резко, как на суше. Заброшенные причальные сооружения (п. Западный, п. Порт-Владимир и др.), скопления антропогенных наносов (п. Лесозаводский и др.), а также оставленная на берегах техника до сих пор меняют береговые процессы (см. рис. 2Г).

После 1998 г. начался новый этап роста хозяйственной активности в Арктике – *неокапиталистический*, продолжающийся и сейчас. Его можно разделить на два подэтапа – *досанкционный (1999–2014)* и *санкционный (после 2014 г.)*. Различия между ними связаны с прекращением и/или

сокращением сотрудничества с западными партнерами, что немедленно отразилось на интенсивности освоения и появления новых ареалов антропогенного рельефа и трансформации береговых процессов. В 1999–2014 гг. возникли два новых участка антропогенного прессинга (34 и 50, см. рис. 1–3), а на 11 нагрузка на БЗ резко возросла, тогда как с 2015 г. до наших дней начато освоение только одного нового участка БЗ (о. Земля Александры). Рост нагрузки связан с добычей и транспортом углеводородного сырья (Варандей и Дресвянка в Баренцевом море, переходами магистрального газопровода Бованенково – Ухта через Байдарацкую губу, Саббета, Новый Порт и ряд других в Карском море), а также с созданием и реконструкцией оборонных объектов. Главная особенность этапа – возросшие технические возможности преобразования рельефа БЗ.

Таким образом, воздействие человека на берега Российской Арктики на каждом из этапов освоения было связано с ограниченным набором видов хозяйственной деятельности, определяемым политико-экономической ситуацией на «материке». Поэтому антропогенная нагрузка изменялась не линейно во времени и пространстве. На всех этапах освоения, за исключением 1992–1998 гг., она нарастала, больше на западе и крайнем востоке региона. В основном это происходило постепенно и несистемно, и только во время деятельности ГУСМП (1933–1963 гг.) – стремительно и более планомерно. В зависимости от вида и масштаба воздействия и отклика БЗ, формы антропогенного рельефа усложнялись, а спровоцированные человеком рельефообразующие процессы активизировались, или же, после снятия нагрузки, затухали. К настоящему времени значимые изменения рельефа и/или береговых процессов выявлены на 89 участках, расположенных вблизи действующих и заброшенных населенных пунктов, промышленных и военных объектов (см. рис. 2Г).

Виды антропогенного воздействия на БЗ морей Российской Арктики в целом менее разнообразны, чем на берегах морей умеренных широт; преобладает строительство гидротехнических сооружений (табл. 1).

В отличие от густонаселенных побережий, строительство портов и причалов – основной фактор антропогенной нагрузки на 48% участков, а объекты береговой рекреационной инфраструктуры, в т. ч. берегозащитные сооружения, отсутствуют. Другие объекты строительства: переходы трубопроводов (6%), аэродромы на береговых косах и барах (2%). На остальных участках (44%) вмешательство человека связано с функционированием поселений, где сохраняется традиционный хозяйственный уклад, или небольших промышленных и военных объектов, расположенных за пределами БЗ. Оно сводится к изъятию отложений береговых аккумулятивных форм и дюнного комплекса, механическому воздействию на рельеф БЗ, а также ее загрязнению отходами производства, потребления и перевозок грузов.

Степень антропогенных изменений рельефа и рельефообразующих процессов БЗ зависит от вида и интенсивности воздействия человека, и отличается на берегах разных генетических типов (см. рис. 3).

Протяженность участков антропогенного прессинга, как правило, не более двух километров при максимуме около 40 км. При этом влияние антропогенной нагрузки на рельефообразующие, в первую очередь – береговые, процессы может распространяться на десятки километров от участка воздействия. Поэтому, наиболее объективным критерием оценки изменений БЗ, учитывающим силу антропогенного прессинга и реакцию берега, представляется *степень трансформации рельефообразующих (береговых, криогенных, склоновых, эоловых) процессов*. Выделены три категории: 1) *слабая*, если изменения рельефообразующих процессов незначительны и практически не выходят за пределы участка антропогенной нагрузки; в таких случаях скорость смещения береговых уступов или береговой линии близка к средней для данного района [Лукьянова, Соловьева, 2009; Lantuit et al., 2012; Национальный ..., 2017 и др.]; 2) *средняя*, если скорость

смещения берега незначительно возросла, а состав и/или интенсивность рельефообразующих процессов изменены на расстоянии до одного километра от участка воздействия; 3) *сильная*, если произошла смена типа процесса и/или берега, скорость его смещения резко увеличилась, при этом рельефообразующие процессы изменены на протяжении более одного километра от участка воздействия.

Строительство гидротехнических и иных инженерных сооружений вызывает наиболее глубокие изменения рельефа и рельефообразующих процессов БЗ (см. табл. 1): берега осложнены рельефоидами, изменяются поперечный профиль и контур берега, объем и состав наносов, температурный режим пород, морфо- и литодинамические процессы [Айбулатов, Артюхин, 1993; Ogorodov et al., 2016 и др.]. Строительство неизбежно сопровождается механическим изменением рельефа и замусориванием БЗ, а иногда – дноуглубительными работами, дампингом и другими видами воздействия. Поэтому участок интенсивной антропогенной нагрузки нередко в несколько раз превышает протяженность инженерных сооружений.

Портовые и причальные сооружения чаще всего занимают десятки – сотни метров береговой линии, а в районах длительного освоения, чередуясь с береговыми постройками разного назначения, могут тянуться на десятки километров. Максимальной протяженности они достигают на берегах, слабо измененных морем (~30 км в районе порта Мурманск в Кольском заливе Баренцева моря и ~5 км в бухте Провидения Берингова моря). Крупные комплексы портовых сооружений (от двух до восьми километров) созданы на абразионных (Тикси, Певек, Анадырь), абразионно-аккумулятивных (Эгвекино, Беринговский) и аккумулятивных (Варандей, Сабетта, Анадырский лиман) берегах. Изменения береговых процессов вблизи большей части портовых и причальных сооружений обусловлены перехватом вдольбереговых потоков наносов, вызывающим заполнение входящего угла (аккумуляция наносов перед поперечными сооружениями) и низовой размыв в их тылу. На берегах, слабо измененных морем, портовые сооружения не приводят к серьезным нарушениям береговых процессов, хотя сильно изме-

Таблица 1

Степень трансформации рельефообразующих процессов на участках антропогенного воздействия

Вид антропогенного воздействия	Степень трансформации процессов; число участков / (%)			
	малая	средняя	высокая	всего
Строительство в БЗ, в том числе:	25 / (28)	9 / (10)	16 / (18)	50 / (56)
– портовых и причальных сооружений	25 / (28)	8 / (9)	10 / (11)	43 / (48)
– переходов трубопроводов	–	–	5 / (6)	5 / (6)
– аэродромов на береговых косах и барах	–	1 / (1)	1 / (1)	2 / (2)
Функционирование объектов разного назначения, расположенных за пределами БЗ	30 / (34)	9 / (10)	–	39 / (44)
Всего	55 / (62)	18 / (20)	16 / (18)	89 / (100)

няют морфологию берегов (Мурманск, Providения и др.). На абразионных берегах низовой размыв спровоцировал активизацию гравитационных процессов, а на термоабразионных и термоденудационных – криогенных и гравитационных (Тикси, Беринговский и др.) процессов на береговых уступах. Степень трансформации рельефообразующих процессов на таких берегах оценивается как малая или средняя, и только в более крупных портах (Тикси, Певек, Анадырь, Эвекинот) – как высокая.

Высокая и средняя степень трансформации рельефообразующих процессов свойственна аккумулятивным пляжевым и лагунным берегам. Строительство даже небольших причалов, как правило, приводит здесь к низовому размыву береговых аккумулятивных форм и изменению потоков наносов. Зона воздействия сооружений на рельефообразующие процессы обычно на порядок и более превышает их размеры. Так, в п. Лаврентия (Берингово море) влияние причала шириной 20 м, выдающегося в море на 40 м, прослеживается на расстоянии около 650 м (400 м – аккумуляция, 250 м – низовой размыв). Одна из главных причин перестройки морфолитодинамических систем и размыва аккумулятивных форм – изъятие материала с подводного берегового склона, пляжа и авантюны (Северодвинск, Мыс Шмидта и др.). Губительны для аккумулятивных форм проезды тяжелой техники и иные механические нарушения растительного и почвенного покровов, выявленные на расстоянии от 100–200 м до километров от портов и причалов. На песчаных косах и барах они провоцируют дефляцию, а при значительной льдистости пород – термоденудацию. В результате высота аккумулятивных форм над уровнем моря уменьшается, и они становятся уязвимы для штормовых нагонов, еще больше разрушающих берег. Так, в г. Северодвинске при штормовом нагоне 15–16 ноября 2011 г. волны переклестывали бар и прибрежные дюны. В результате дюнный пояс был практически разрушен, а берег отступил на 1–3 м.

Переходы подводных трубопроводов через БЗ построены подземным способом. Трубы уложены в траншеи и засыпаны грунтом. На берегах Байдарацкой губы переходы магистрального газопровода Бованенково–Ухта защищены бетонными коффердамами [Ермолов, Прядилин, 2013]. Остальные переходы (33, 45, см. рис. 1–3) не имеют надземной защиты. Протяженность участков БЗ, где рельеф и отложения полностью изменены при укладке трубопроводов, не превышает 500 м. За счет обустройства инфраструктуры и проездов тяжелой техники зона антропогенного воздействия увеличивается до 2–15 км. Степень трансформации рельефообразующих процессов на всех подвергшихся такому воздействию берегах (термоабразионных, абразионных и аккумулятивных) оценивается как высокая.

Так, на уральском берегу Байдарацкой губы скорость отступления берега в створе перехода газопровода увеличилась за время строительства (2008–2012 гг.) в два раза, достигнув трех–четырех

метров в год. Основная причина активизации термомеханического разрушения и волнового размыва береговых уступов – дефицит наносов, резко усугубившийся в результате изъятия песков с пляжа и приливной осушки, а также перехвата коффердамами потока наносов [Ермолов, Прядилин, 2013]. Низовой размыв, затронувший не только термоабразионные, но и ранее стабильные аккумулятивные берега, прослеживается на уральском берегу на 2,5 км, а на ямальском – на 2 км [Novikova et al., 2018], а аккумуляция во «входящих углах» коффердамов – на 0,7 и 0,3 км соответственно. Проезды тяжелой техники по пляжу и приливной осушке многократно усиливают разрушение аккумулятивных берегов [Ogorodov et al., 2016]. На о. Варандей за 50 лет освоения изъятие наносов пляжей и разрушение дюнного комплекса привели к необратимым изменениям морфолитодинамической системы на протяжении 15 км. В БЗ возник резкий дефицит наносов, а поверхность острова стала ниже на один–три метра и затапливается во время штормовых нагонов. Абразионный уступ террасы, сложенной малоальдистыми песками, отступал в отдельные годы на 7–10 м, а в среднем за последние десятилетия – на 3–4 м/год, что в полтора–два раза превышает скорость разрушения берегов такого типа в естественном состоянии [Ogorodov et al., 2016]. Изъятие наносов и механические нарушения поверхности тяжелой техникой стали основными причинами деградации голоценовых аккумулятивных форм. На северо-востоке о. Колгуева за 35 лет эксплуатации перехода нефтепровода Песчаноозерского месторождения, прорезавшего корень косы, берег отступил не менее чем на 60 м. Деградация косы, вызванная реакцией берега на указанные воздействия, прослеживается на 12 км. На мысе Каменном в Обской губе при строительстве (2012–2016 гг.) и эксплуатации нефтеналивного терминала «Ворота Арктики» нарушено около 60% поверхности косы протяженностью 23 км. Масштабные изменения рельефа несут угрозу отступания берега в корне косы, а также низового размыва в ее дистальной части, южнее створа перехода.

Строительство аэродромов (см. рис. 1) не повлияло на динамику внешних берегов кос, при этом их внутренние берега значительно или полностью изменены при обустройстве мостов и дорог (см. табл. 1); лагуны заполняются наносами и мелеют.

Участки антропогенного воздействия, связанного с *функционированием объектов, расположенных за пределами БЗ*, в 79% случаев приурочены к аккумулятивным берегам. На фоне относительно небольших изменений рельефа БЗ здесь становится заметным влияние на береговые процессы замусоривания пляжей и подводного берегового склона. Скопления брошенной техники, затонувшие суда, металлические контейнеры и бочки перехватывают и изменяют локальные потоки наносов. Иногда, например, у заброшенных баз ВМФ и военных частей (п. Порт-Владимир, Баренцево море; пос. Урелики, Берингово море), они блокируют бе-

рег на протяжении 100–300 м. Бытовой мусор, уголь и отходы лесопильных заводов (п. Лесозаводский, о. Средний в устье р. Керети на Белом море и др.). вовлекаются в потоки наносов.

Таким образом, наибольшее воздействие на рельеф БЗ оказывает строительство портов и переходов трубопроводов. Обустройство инфраструктуры любых объектов строительства не только расширяет площадь антропогенного прессинга в несколько раз, но часто наносит БЗ больший урон, чем создание основного объекта. Наиболее разрушительны для берегов большей части генетических типов перехват, изъятие и уплотнение наносов, а также механические деформации берегового рельефа. Протяженность зон воздействия на рельефообразующие процессы, в зависимости от параметров источника антропогенной нагрузки, его положения в морфолитодинамической системе и реакции берега изменяется от сотен метров до 12 км.

Берега разных генетических типов используют человеком неравномерно, а их реакция на антропогенную нагрузку не одинаково интенсивна (табл. 2). Наиболее удобны для хозяйственного освоения, но и весьма уязвимы, аккумулятивные (пляжевые и лагунные) берега.

Антропогенная нагрузка ведет к деградации поверхностей аккумулятивных форм и отступанию берега. На песчаных берегах активизируется дефляция, реже – процессы термоденудации. Лагуны, разделенные дорогами и мостами на обособленные водоемы, мелеют. Доля участков с существенными изменениями рельефообразующих процессов достигает 45%. Абразионные, термоабразионные и термоденудационные берега выбирают для строительных и селитебных целей существенно реже. Антропогенная нагрузка провоцирует здесь активизацию абразии, а также, в зависимости от состава пород береговых уступов, комплекс склоновых, криогенных и эоловых процессов, ускоряя отступление берега. Такие же изменения происходят на абразионных и термоабразионных участках абразионно-аккумулятивных берегов. Трансформация береговых процессов на неизмененных и слабо измененных морем берегах незначительна. Исключение – берега крупных портовых комплексов (Мурманск-

Кола-Лавна и Providения), где берега практически полностью покрыты рельефоидами.

Выводы:

– в истории освоения берегов Российской Арктики выделены шесть этапов: дореволюционный (включает два подэтапа – до XVIII в. и с XVIII в. до 1918 г.), этап КСМП (1919–1932), этап ГУСМП (1933–1963), «ведомственный» (1964–1991), смены хозяйственного уклада (1992–1998) и неокapиTaлистический (1999 – настоящее время) с досанкцион- ным (1999–2014) и санкционным (после 2014 г.) под- этапами. Каждый из них отличался специфическим набором видов антропогенного воздействия и степенью трансформации рельефа и рельефообра- зующих процессов береговой зоны. На всех этапах, за исключением 1992–1998 гг., нагрузка на берега нарастала, а антропогенные изменения накаплива- лись. Релаксация берега после снятия нагрузки про- изошла только на некоторых участках, где в БЗ не были созданы инженерные сооружения;

– в настоящее время антропогенное воздействие на берега Российской Арктики имеет точечный ха- рактер и локализовано вблизи портов, населенных пунктов, военных объектов, участков добычи и транспорта углеводородов. Из 89 ареалов антропо- генного прессинга 56% связаны со строительством в береговой зоне объектов промышленного, воен- ного и транспортного назначения, а 44% – с функци- онированием объектов, расположенных за ее пре- делами. Общая протяженность участков воздей- ствия составляет около 400 км (около 1% длины береговой линии арктических морей России по [Циф- ровая ..., 2019]); не более трети из них приходится на инженерные сооружения;

– наибольшее воздействие на рельеф берего- вой зоны оказывает строительство портовых соору- жений и переходов трубопроводов. Основной вид воздействия сопровождается комплексом сопут- ствующих, что расширяет зону антропогенного прес- синга в несколько раз; наиболее губительны из них – изъятие наносов и разрушение аккумулятивных форм берегового рельефа;

– антропогенная нагрузка, как правило, активи- зирует комплекс денудационных береговых, криоген-

Таблица 2

Степень антропогенной трансформации рельефообразующих процессов на берегах различных генетических типов

Генетический тип берега	Степень трансформации процессов; число участков / (%)			
	малая	средняя	высокая	всего
Неизмененные и слабо измененные морем	17 / (19)	–	2 / (2)	19 / (21)
Абразионные (активные и отмершие)	–	1 / (1)	3 / (3)	4 / (4)
Термоабразионные и термоденудационные	6 / (7)	1 / (1)	3 / (3)	10 / (11)
Абразионно-аккумулятивные	2 / (2)	–	–	2 / (2)
Аккумулятивные пляжевые и лагунные	30 / (34)	16 / (18)	8 / (9)	54 / (61)
Всего	55 / (62)	18 / (20)	16 / (18)	89 / (100)

ных, склоновых и эоловых процессов и провоцирует отступление берега и затопление прибрежных территорий. При этом наиболее уязвимы аккумулятивные (пляжевые и лагунные) и термоабразионные берега;

– на 55 участках воздействия (62%) антропогенные изменения рельефа и рельефообразующих

процессов береговой зоны незначительны; на 18 (20%) привели к активизации процессов разрушения берега на расстоянии до одного километра от источника; на 16 участках (18%) рельеф береговой зоны сильно изменен, а изменения рельефообразующих процессов прослеживаются на расстоянии 1–12 км от участка воздействия.

Благодарности. Сбор, обработка и интерпретация информации о хозяйственном освоении и антропогенной трансформации береговой зоны Российской Арктики выполнены при финансовой поддержке проекта РФФИ № 18-05-60200; сбор и обработка сведений о генетических типах берегов выполнены в рамках темы госзадания № АААА-А16-11632810089-5 «Эволюция природной среды, динамика рельефа и геоморфологическая безопасность природопользования».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Айбулатов Н.А., Артюхин Ю.В. Геоэкология шельфа и берегов Мирового океана. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 304 с.

Арз Ф.Э. Термоабразия морских берегов. М.: Наука, 1980. 159 с.

Берега / П.А. Каплин, О.К. Леонтьев, С.А. Лукьянова, Л.Г. Никифоров. М.: Мысль, 1991. 479 с.

Бредихин А.В., Еременко Е.А., Харченко С.В., Беляев Ю.Р., Романенко Ф.А., Болысов С.И., Фузеина Ю.Н. Районирование Российской Арктики по типам антропогенного освоения и сопутствующей трансформации рельефа на основе кластерного анализа // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2020. № 1. С. 42–56.

Бровко П.Ф., Малюгин А.В. Техногенная трансформация берегов Японского моря // Ойкумена. Регионоведческие исследования. 2015. № 3(34). С. 7–14.

Ермолов А.А., Прядилин Р.Ю. Особенности производственного мониторинга геологических и литодинамических процессов на участке строительства перехода магистральных газопроводов через Байдарацкую губу Карского моря // Инженерные изыскания. 2013. № 10–11. С. 88–91.

Жиндарев Л.А. Антропогенный морфогенез в прибрежной зоне моря // Антропогенная геоморфология. Москва-Киев: Медиа-ПРЕСС, 2013. С. 149–160.

Камалов А.М., Огородов С.А., Бирюков В.Ю., Совершаева Г.Д., Цвечинский А.С., Архипов В.В., Белова Н.Г., Носков А.И., Соломатин В.И. Морфолитодинамика берегов и дна Байдарацкой губы на трассе перехода магистральными газопроводами // Криосфера Земли. 2006. № 3. С. 3–14.

Лукьянова С.А., Сафьянов Г.А., Соловьева Г.Д. Морфодинамические типы берегов Российской Арктики и риск природопользования // Геоэкологическое состояние арктических побережий России и безопасность природопользования. М.: ГЕОС, 2007. С. 480–501.

Лукьянова С.А., Соловьева Г.Д. Абразия морских берегов России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2009. № 4. С. 40–44.

Национальный атлас Арктики. Раздел 8. Берега морей / Ред. Н.С. Касимов. М.: Роскартография, 2017. С. 222–237.

Розанов Л.Л. Теоретические основы геотехноморфологии. М.: ИГ АН СССР, 1990. 189 с.

Романенко Ф.А. История природопользования // Геоэкологическое состояние арктических побережий России и безопасность природопользования. М.: ГЕОС, 2007а. С. 98–112.

Романенко Ф.А. Современные региональные особенности природопользования // Геоэкологическое состояние арктических побережий России и безопасность природопользования. М.: ГЕОС, 2007б. С. 112–123.

Романенко Ф.А. Воздействие человека на рельеф Арктики: прошлое, настоящее, будущее // Геоморфологические ресурсы и геоморфологическая безопасность: от теории к практике. Всероссийская конференция «VII Щукинские чтения». Москва, МГУ имени М.В. Ломоносова, 18–21 мая 2015 г.: Материалы конференции. М.: МАКС Пресс, 2015. С. 344–347.

Сафьянов Г.А., Репкина Т.Ю. Динамика берегов Унской губы (Летний берег Белого моря) // Геоморфология. 2013. № 1. С. 82–89.

Lantuit H., Overduin P., Couture N. et al. The Arctic coastal dynamics database: A new classification scheme and statistics on Arctic permafrost coastlines. *Estuaries & Coasts*, 2012, vol. 35, no. 2, p. 383–400. DOI: 10.1007/s12237-010-9362-6.

Ogorodov S.A., Baranskaya A.V., Belova N.G., Kamalov A.M., Kuznetsov D.E., Overduin P.P., Shabanova N.N., Vergun A.P. Coastal dynamics of the Pechora and Kara Seas under changing climatic conditions and human disturbances. *Geography, Environment, Sustainability*, 2016, vol. 9, no. 3, p. 53–73. DOI: 10.15356/2071-9388_03v09_2016_04.

Novikova A., Belova N., Baranskaya A., Aleksyutina D., Maslakov A., Zelenin E., Shabanova N., Ogorodov S. Dynamics of permafrost coasts of Baydaratskaya Bay (Kara Sea) based on multi-temporal remote sensing data. *Remote Sensing*, 2018, vol. 10, no. 1481. DOI: 10.3390/rs10091481.

Shabanova N., Ogorodov S., Shabanov P., Baranskaya A. Hydrometeorological forcing of western Russian arctic coastal dynamics: XX-century history and current state. *Geography, Environment, Sustainability*, 2018, vol. 11, no. 1, p. 113–129. DOI: 10.24057/2071-9388-2018-11-1-113-129.

Электронный ресурс

Цифровая географическая основа территории России масштаба 1:15 000 000. URL: <https://vsegei.ru/ru/info/topo/> (дата обращения 02.12.2019).

Поступила в редакцию 11.05.2020

После доработки 20.06.2020

Принята к публикации 06.08.2020

T.Yu. Repkina¹, N.N. Lugovoy², F.A. Romanenko³, S.A. Lukyanova⁴SEA COASTS OF THE RUSSIAN ARCTIC:
TYPES AND CHRONOLOGY OF HUMAN-INDUCED CHANGES

Anthropogenic changes in the coastal zone of the Russian Arctic seas are overviewed for the first time. Maps of the anthropogenic transformation of relief and relief-forming processes (scale 1:15 000 000) and corresponding databases have been compiled using the interpreted data from satellite images and literature sources. Six stages of the coast development have been identified, i.e. Pre-revolutionary (including 2 sub-stages: before the 18th century and from the 18th century till 1918), Komseveroput' (1919–1932), Glavsevmorput' (1933–1963), Departmental (1964–1991), Changes of economic structure (1992–1998) and Neocapitalist (1999 – present) with pre-sanctional (1999–2014) and sanctional (after 2014) sub-stages. For each of them specific types of the anthropogenic impact on the coastal zone were determined. During all stages, except that of 1992–1998, the load on the coasts increased, and the anthropogenic changes accumulated. After deloading the coasts relaxation occurred just in places without engineering structures in the coastal zone. However, the anthropogenic changes of the Russian Arctic coasts are still of local character. We identified 89 sites of anthropogenic impact with a total length of about 1% of the total coastline of the Russian Arctic seas. At 56% of them Transformation of relief and relief-forming processes result from the construction of industrial, military and transport facilities in the coastal zone (56%), and operation of facilities located outside (44%). Changes of the coastal relief are insignificant and local for 62% of the sites; 20% of the sites undergo the increasing denudation relief-forming processes (coastal, cryogenic, slope, and aeolian) at a distance of up to 1 km from the source of impact. Transformation of relief-forming processes caused rapid coastal retreat and/or flooding of coastal areas for 18% of the sites; the changes spread to 1–12 km from the source of impact. The most profound changes in the coastal zone result from the construction of port facilities and pipeline crossings; accumulative (beach and lagoon) and thermoabrasion coasts are particularly vulnerable to human impact.

Key words: sea coasts, anthropogenic impact, geomorphological processes

Acknowledgements. Information on the economic development and anthropogenic transformation of the coastal zone of the Russian Arctic was collected, processed and interpreted with financial support of the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-05-60200). Information on the genetic types of coasts was collected and processed under the state task AAAA-A16-116032810089-5 «Evolution of the natural environment, the dynamics of relief and the geomorphological safety of nature management».

REFERENCES

- Ajbulatov N.A., Artjuhin Ju.V. *Geojekologija shel'fa i beregov Mirovogo okeana* [Geocology of the shelf and coasts of the World Ocean]. StPetersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1993, 304 p. (In Russian)
- Are F.E. *Termoabrazija morskikh beregov* [Thermoabrasion of sea coasts]. Moscow, Nauka Publ., 1980, 159 p. (In Russian)
- Berega [Sea Coasts] / P.A. Kaplin, O.K. Leont'ev, S.A. Luk'janova, L.G. Nikiforov. Moscow, Mysl' Publ., 1991, 479 p. (in Russian)
- Bredikhin A.V., Eremenko E.A., Harchenko S.V. et al. Rajonirovanie Rossijskoj Arktiki po tipam antropogennogo osvoenija i sopushtvujushhej transformacii rel'efa na osnove klasternogo analiza [Regionalization of the Russian Arctic according to the types of anthropogenic development and associated relief transformation by applying the cluster analysis]. *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2020, no. 1, p. 42–56.
- Brovko P.F., Malyugin A.V. *Tehnogennaja transformacija beregov Japonskogo morja* [Technogenic transformation of the Sea of Japan coasts]. *Ojkumena. Regionovedcheskie issledovanija*, 2015, no. 3(34), p. 7–14.
- Ermolov A.A., Pryadilin R.Ju. Osobennosti proizvodstvennogo monitoringa geologicheskikh i litodinamicheskikh processov na uchastke stroitel'stva perehoda gazoprovodov cherez Bajdarackuju gubu Karskogo morja [Features of production monitoring of geological processes and bottom relief dynamics in the area of main gas pipelines crossing across the Baydarata Bay of the Kara Sea]. *Inzhenernye izyskanija*, 2013, no 10–11, p. 88–91. (In Russian)
- Kamalov A.M., Ogorodov S.A., Birjukov V.Ju. et al. Morfolitodinamika beregov i dna Bajdarackoj guby na trasse perehoda magistral'nymi gazoprovodami [Coastal and seabed morpholithodynamics of the Baydaratskaya Bay at the route of gas pipeline crossing]. *Kriosfera Zemli*, 2006, no. 3, p. 3–14. (In Russian)
- Lantuit H., Overduin P., Couture N. et al. The Arctic coastal dynamics database: A new classification scheme and statistics on Arctic permafrost coastlines *Estuaries & Coasts*, 2012, vol. 35, no. 2, p. 383–400.
- Lantuit H., Overduin P., Couture N. et al. The Arctic coastal dynamics database: A new classification scheme and statistics on

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: t-repkina@ya.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography, Scientific Researcher; e-mail: lugovoy-n@ya.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography, Leading Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: faromanenko@mail.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography

Arctic permafrost coastlines. *Estuaries & Coasts*, 2012, vol. 35, no. 2, p. 383–400.

Luk'janova S.A., Saf'janov G.A., Solov'eva G.D. [Morphodynamic types of the Russian Arctic coasts and the risk of environmental management]. *Geojekologicheskoe sostojanie arkticheskikh poberezhij Rossii i bezopasnost' prirodopol'zovanija* [Geoecological state of the Arctic coasts of Russia and safe nature management]. Moscow, GEOS Publ., 2007, p. 480–501. (In Russian)

Luk'janova S.A., Solov'eva G.D. Abrazija morskikh beregov Rossii [Abrasion of sea coasts in Russia]. *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2009, no. 4, p. 40–44. (In Russian)

Nacional'nyj atlas Arktiki. Razdel 8. Berega morej [National Atlas of the Arctic. Section 8. The Sea Coasts]. red. N.S. Kasimov. Moscow, Roskartografija Publ., 2017, s. 222–237. (In Russian)

Novikova A., Belova N., Baranskaya A. et al. Dynamics of permafrost coasts of the Baydaratskaya Bay (the Kara Sea) based on multi-temporal remote sensing data. *Remote Sensing*, 2018, vol. 10, no. 1481.

Ogorodov S.A., Baranskaya A.V., Belova N.G. et al. Coastal dynamics of the Pechora and Kara Seas under changing climatic conditions and human disturbances, *Geography, Environment, Sustainability*, 2016, vol. 9, no. 3, p. 53–73.

Romanenko F.A. [History of environmental management]. *Geojekologicheskoe sostojanie arkticheskikh poberezhij Rossii i bezopasnost' prirodopol'zovanija* [Geoecological state of the Arctic coasts of Russia and safe nature management]. Moscow, GEOS Publ., 2007, p. 98–112. (In Russian)

Romanenko F.A. [Actual regional features of environmental management]. *Geojekologicheskoe sostojanie arkticheskikh*

poberezhij Rossii i bezopasnost' prirodopol'zovanija [Geoecological state of the Arctic coasts of Russia and safe nature management]. Moscow, GEOS Publ., 2007, p. 112–123. (In Russian)

Romanenko F.A. [Human impact on the relief of the Arctic: past, present, future] *Geomorphological resources and geomorphological safety: from theory to practice*. VII Schukin Conference: Moscow, Moscow University, May 18–21, 2015: Extended abstracts. Moscow, MAKS Press, 2015, p. 344–347. (In Russian)

Rozanov L.L. Teoreticheskie osnovy geotekhnomorfologii [Theoretical Foundations of Geotechnomorphology]. Moscow, Institut geografii RAS Publ., 1990, 189 p. (In Russian)

Saf'janov G.A., Repkina T.Ju. Dinamika beregov Unskoj Guby (Letniy bereg Belogo morja) [Coastal dynamics of the Unskaya Guba Bay (Summer coast of the White Sea)]. *Geomorfologija*, 2013, no. 1, p. 82–89. (in Russian)

Shabanova N., Ogorodov S., Shabanov P., Baranskaya A. Hydrometeorological forcing of western russian arctic coastal dynamics: XX-century history and current state. *Geography, Environment, Sustainability*, 2018, vol. 11, no. 1, p. 113–129.

Zhindarev L.A. [Anthropogenic morphogenesis in the coastal zone of the sea] *Antropogennaja geomorfologija* [Anthropogenic geomorphology]. Moskva–Kiev, Media-PRESS, 2013, p. 149–160. (In Russian)

Web source

Digital geographical basis of the territory of Russia at the scale of 1:15 000 000, URL: <https://vsegei.ru/ru/info/topo/> (accessed December 2, 2019).

Received 11.05.2020

Revised 20.06.2020

Accepted 06.08.2020

УДК 528.94; 912.43-13

О.Д. Васильев^{1,2}

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ СРЕДООБРАЗУЮЩИХ ФУНКЦИЙ ЛЕСОВ И ИХ СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ В ЛАНДШАФТАХ МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ

В статье приводятся результаты среднемасштабного исследования и картографирования средообразующих функций лесов в пределах выбранных эталонных ландшафтов, которые расположены в различных физико-географических районах Московской области: Верхневолжской низменности, южного макросклона Клинско-Дмитровской гряды, Теплостанской возвышенности и Мещерской низменности. По карте растительности Московской области для каждого ландшафта определено разнообразие лесов, по космическим снимкам системы Landsat разных лет выявлена динамика и рассчитан вегетационный индекс для каждой лесной эпиассоциации. Для некоторых типов леса сведения о составе и структуре которых имеются в литературных источниках, рассчитано продуцирование кислорода и депонирование углерода фитомассой на площади с 1 га. Источниками информации для этого выступили полевые исследования автора, кафедры биогеографии географического факультета МГУ, ЦЭПЛ РАН, а также литературные источники. При помощи методов математической статистики и значений вегетационного индекса предложена методика расчета средообразующих функций для каждого контура лесов эталонных ландшафтов. Это позволило дать картографическую оценку вклада основных древесных пород в средообразующую функцию леса. Наиболее высокие значения продуцирования кислорода присущи пойменным мелколиственным лесам с ольхой серой и черной, лещиной и ивой в составе, а также условно-коренным широколиственным породам. При этом максимальное продуцирование кислорода отмечается в лесах в ландшафтах с низким антропогенным влиянием – Верхневолжской и Мещерской низменностях, минимальное – в антропогенно нарушенных лесах Теплостанской возвышенности. Заболоченный характер местности указанных низменных ландшафтов также определяет относительно высокие значения и депонирования углерода лесами. В работе приведен пример созданных карт оценки средообразующих функций лесов. Полученные результаты могут быть использованы в устойчивом управлении лесами с целью составления рекомендаций сохранения наиболее ценных лесных сообществ в ландшафте. Неучет экологической составляющей приводит к деградации не только лесов, но и экосистемы в целом, что негативно сказывается как на экологической ситуации, так и на здоровье человека.

Ключевые слова: экологические функции лесов, продуцирование кислорода, депонирование углерода, дистанционное зондирование лесов, картография

Введение. В настоящий момент актуальна проблема сохранения лесных массивов, являющихся базовыми ядрами экологического каркаса регионов [Кравченко, 2015]. Московская область характеризуется повышенным антропогенным преобразованием природных экосистем, наиболее уязвимыми при градостроительном развитии оказываются лесные массивы [Васильев, Чистов, 2017; Васильев и др., 2019].

Леса являются природными экосистемами и способны выполнять различные экологические функции. Функция леса, по мнению М.В. Рубцова, это «его специфическое влияние на факторы среды, явления природы и компоненты биосферы, определяющиеся характером взаимодействия с ними свойствами лесных биогеоценозов» [Рубцов, 1984, с. 3]. Принято выделять несколько групп природных экологических функций: средообразующие, защитные и стабилизирующие. Наиболее важными для человека являются средообразующие функции лесного покрова. Леса вносят важный вклад в углеродный

баланс и регуляцию глобальных климатических изменений [Woodward et al., 1995; Schimal et al., 2001; Замолотчиков, 2011 и др.]. Однако оценки этого вклада носят глобальный и крупнорегиональный характер и не учитывают пространственную структуру и разнообразие реакций лесных сообществ. Проблеме разработки ландшафтно-экологического подхода посвящено значительно меньше работ, основная часть из которых выполнена российскими специалистами [Зимин, 2009; Коломыц и др., 2009].

Вопросам оценки важнейших экологических функций растительного покрова уделяется определенное внимание, но остается актуальной задача оценки и создания соответствующих эколого-географических карт [Васильев, Чистов, 2016; Зимин, 2009]. Целью настоящей работы является сравнительно-картографическая оценка средообразующих функций, выполняемых лесными сообществами в пределах эталонных ландшафтов Московской области.

Материалы и методы исследования. В качестве эталонных территорий выбраны четыре ланд-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра картографии и геоинформатики, аспирант; *e-mail:* vasilyev_vizin@bk.ru

² ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова», отдел прикладных морских и водохозяйственных исследований и изысканий, мл. науч. с.

шафта моренного, моренно-водноледникового и водноледникового генезисов, которые расположены в различных природных провинциях Московской области: Верхневолжской низменности, южном макросклоне Клинско-Дмитровской гряды, Теплостанской возвышенности и Мещерской низменности. Природная структура самих ландшафтов (генезис, климатические и прочие особенности), а также антропогенное влияние существенно различаются пространственным соотношением лесов различных формаций и тенденциями трансформации лесного покрова [Васильев и др., 2019].

В пределах Верхневолжской низменности был выбран наиболее типичный Ермолинский ландшафт, в Мещерской низменности в качестве эталонного выбран относительно малоосвоенный Лузгаринский ландшафт, в Клинско-Дмитровской гряде – Истринский ландшафт, а на Теплостанской возвышенности – Апрелевско-Кунцевский [Анненская и др., 1997].

В качестве метода исследования был выбран картографический, который позволяет проводить не только пространственное сравнение, но и оценку изменения динамики средообразования. Основным картографическим источником послужила карта растительности Московской области (1996 г., растительный покров дан по состоянию на 1991 г.). На ней в рамках концепции эпитаконов показаны условно-коренные, короткопроизводные и длительнопроизводные лесные сообщества [Огуреева и др., 1996].

Общий алгоритм исследования приведен на рис. 1. В первой его части проведено определение параметров средообразования лесов, исходными данными при этом послужили литературные источники и полевые исследования автора. Вторая часть основана на использовании материалов космической съемки – Landsat 5 (сентябрь 2006 г.) и Landsat 8 (сентябрь 2014 и 2016 гг.). Для их совместного анализа выполнена радиометрическая калибровка и атмосферная коррекция космических снимков. Пос-

ле этого проведена классификация лесов по их спектральной яркости, результаты которой при необходимости редактировались путем визуального дешифрирования.

Автором были апробированы снимки, сделанные в разные сезоны года (с июня по сентябрь), в результате чего на основе качества отснятого материала (на все эталонные ландшафты) и анализа результатов тематической обработки (величина соотношения вегетационного индекса для разных месяцев в пределах ландшафта практически одинакова) были выбраны снимки за сентябрь, для которых также характерна и определенная форма крон деревьев, сформировавшихся за вегетационный период климатического года. Для учета фазы вегетации древесных пород были использованы литературные источники и проведена аналогичная работа по космическим снимкам июля и августа. Форма крон деревьев разного вида является одним из признаков для дешифрирования на снимках породного состава древостоя.

Основой оценки экологических функций лесов являются их средообразующие способности – объем продуцирования кислорода и депонирования углерода [Васильев, Чистов, 2016]. В целом, оценке средообразующих функций лесов посвящено достаточно много работ. Одна из наиболее полных – монография Н.И. Базилович [1993]. Настоящее исследование при оценке объемов продуцирования кислорода по первичной продукции дерева ориентировано на методическое обобщение, предложенное в работе [Варфоломеев, МIRONENKO, 2012]. Расчет депонируемого им углерода основан на определении прироста фитомассы по методу, изложенному в работе [Уткин и др., 2003]. При этом данные первичной биологической продукции являются прямой функцией продуцирования кислорода.

Определение депонирования углерода фитомассой дерева построено на конверсионно-объемной

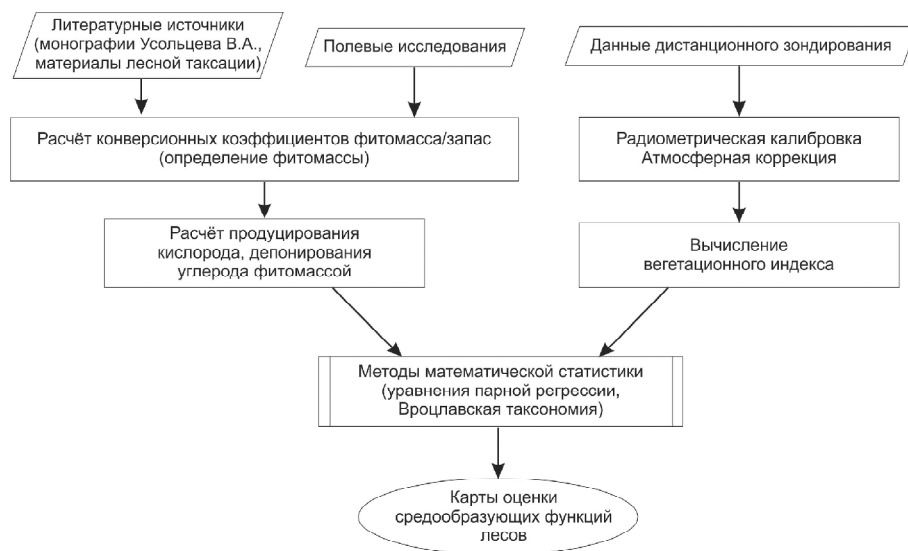


Рис. 1. Общий алгоритм исследования

Fig. 1. General scheme of the study

методике для оценки запасов углерода в лесных насаждениях, по которым оценивают годовое депонирование углерода лесами. Метод основан на конверсии объемных запасов насаждений в фитомассу и далее в углерод [Уткин и др., 2003].

В качестве источников информации о первичной продукции лесов целесообразно использовать материалы полевых исследований или крупномасштабной лесной таксации (лесоустройства). В исследовании были использованы имеющиеся в фондах кафедры биогеографии географического факультета МГУ крупномасштабные (1:25 000) материалы лесной таксации прошлых лет на части эталонных ландшафтов (ввиду недоступности подобных данных), результаты полевых исследований, а также монографии [Усольцев, 2010; Усольцев, 2016], содержащие сведения о биологической продуктивности основных лесобразующих пород. Исходные материалы были увязаны в единой координатной основе и наложены на среднемасштабную карту растительности для локализации точек исходных данных в конкретных эпиассоциациях.

Отметим, что проводимые по упомянутым методикам оценки позволяют представить продукционные процессы конкретных древесных видов и будут справедливы, строго говоря, лишь для монодоминантных сообществ. Рассматриваемая в настоящем исследовании в качестве единицы картографирования лесная эпиассоциация представляет собой определенный комплекс растительных сообществ с разным составом пород и внутренней структуры. Расчет искомых функций в пределах лесных сообществ производился как средневзвешенное значение для отдельных пород деревьев с учетом формулы древостоя.

В связи с этим, относительно точный расчет был возможен для тех сообществ, сведения о составе, структуре и первичной продукции которых имеются в литературе. Однако некоторая часть лесов не обеспечена ни литературными, ни полевыми данными. Но поскольку в исследовании ставилась задача сравнительного анализа эталонных ландшафтов в целом, возникла необходимость разработки методики определения искомых величин на основе использования цифровых космических снимков. За основу расчетов были взяты следующие положения.

Известно, что многозональные космические снимки позволяют с некоторыми допущениями определять на основе вегетационных индексов продукционные особенности различных типов как естественной, так и сельскохозяйственной растительности [Кронберг, 1998]. Вегетационный индекс суммирует и отражает влияние многих факторов; его значение отображает в целом интенсивность процесса фотосинтеза – продуцирования кислорода и депонирования фитомассой углерода. В данном исследовании был использован простой разностный вегетационный индекс (т. н. Difference VI, DVI), который определяется как разность между яркостями в ближней инфракрасной и красной зонах спектра. Таким образом, зная усредненное значение ве-

гетационного индекса в пределах лесных сообществ, выделенных на карте растительности и актуализированных по космическим снимкам, можно сделать вывод об эффективности процесса фотосинтеза в лесах эталонных ландшафтов.

Для расчета вегетационного индекса в каждом контуре растительных сообществ были собраны эталонные значения яркости, определяемые верхним ярусом древесных пород. Для этого использовались материалы «Tree canopy cover for year 2000» портала Global forest watch, создаваемого в рамках глобального проекта Global forest change, которые косвенно отражают сомкнутость крон (в каждом пикселе изображения с разрешением 30 м отображается процент древесного покрова на данной территории, от 0 до 100%) [Hansen et al., 2013].

Это позволило на качественном и количественном уровнях сравнить значения вегетационного индекса в разных по своему составу лесных сообществах, осредняя параметры средообразования, и дало возможность отработать методику оценки продуцирования кислорода и депонирования углерода фитомассой лесов с отсутствующими исходными данными для более точного расчета. Таким образом, данная методика позволяет получить необходимые в целях картографирования материалы.

Отметим, все упомянутые операции были проведены для каждого эталонного ландшафта с целью дальнейшего сравнительного анализа, в рамках данной работы приведем основные результаты исследования на примере одного Лузгаринского ландшафта Мещерской низменности, ввиду относительно низкого нарушения его лесного покрова.

Результаты и их обсуждение. По значениям вегетационного индекса строились диаграммы от минимального значения до максимального. По анализу диаграмм для каждого эталонного ландшафта было выделено 5 комплексов леса (от А до Д), которые резко отличаются друг от друга по своим средообразующим способностям, где комплекс А имеет минимальный вегетационный индекс (средообразующие способности лесов минимальны), комплекс Д – максимальный. Минимальный вегетационный индекс характерен в основном для длительнопроизводных сообществ с преобладанием мелколиственных пород или старовозрастных короткопроизводных лесов с преобладанием ели. В Лузгаринском ландшафте (рис. 2) это березово-сосновые леса с елью. Максимальный же вегетационный индекс в основном у короткопроизводных или условно-коренных сообществ; в Лузгаринском ландшафте – пушистоберезовые с сосной и ольхой серой, а также осиново-сосново-еловые леса.

По значениям вегетационного индекса, определенным для каждого лесного сообщества в Лузгаринском ландшафте и вычисленным по исходным данным величины продуцирования кислорода и депонирования углерода фитомассой лесов, были построены графики их соответствия с ежегодной продукцией ландшафта (см. рис. 2). Эти материалы послужили основой последующих расчетов уравне-

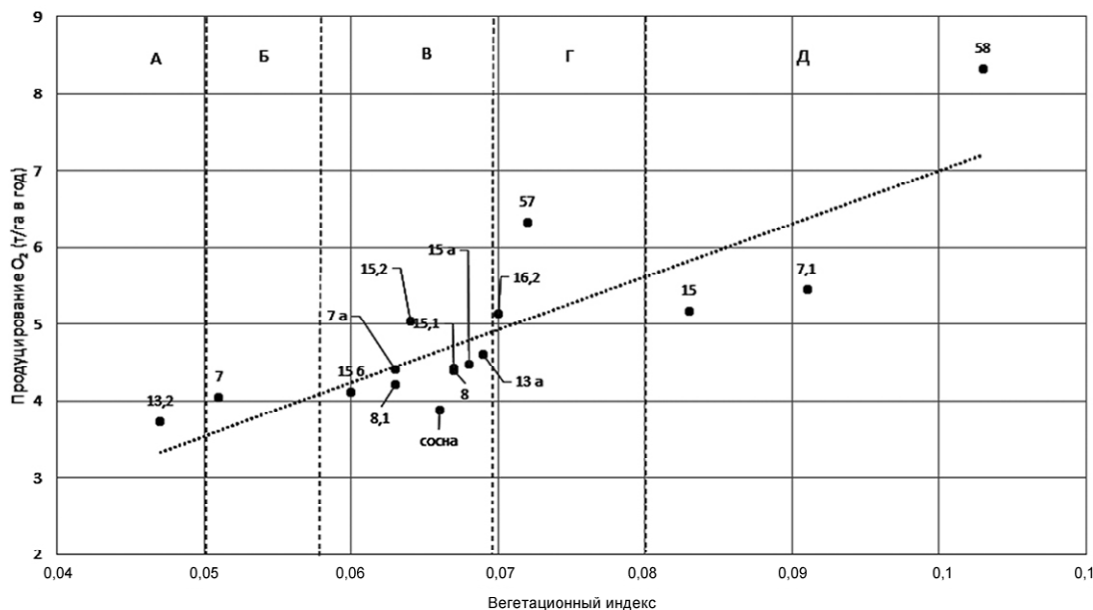


Рис. 2. Диаграмма рассеяния (поле корреляции) и комплексы лесов по вегетационному индексу (Лузгаринский ландшафт)
Fig. 2. The scattering diagram (correlation field) and forest complexes according to the vegetation index (Luzgarinskij landscape)

ний регрессии линейного типа с целью определения неизвестных характеристик средообразующих функций некоторых лесов, проведенных в программном продукте Statistica base. К примеру, уравнение регрессии связи продуцирования кислорода и вегетационного индекса для Лузгаринского ландшафта Мещерской низменности (см. рис. 2) имеет следующий вид:

$$y = 68,859x + 0,115,$$

(1)

где y – величина продуцирования кислорода, x – значение вегетационного индекса, определенное по космическим снимкам системы Landsat.

Дополнительно оценивалось качество уравнений регрессии, средняя ошибка аппроксимации и соответствие критерию Дарбина-Уотсона. Для всех эталонных ландшафтов качество уравнения регрессии достаточно высокое, однако в Истринском и Лузгаринском ландшафтах эта связь выражена ярче (табл. 1).

Связь между показателями, величину которой отражает коэффициент корреляции, для всех эталонных ландшафтов прямая и высокая, чуть меньше – в Апрелевско-Кунцевском ландшафте. Для него же характерно в целом низкое значение коэффициента детерминации, который показывает с какой долей (вероятностью) результат определяется показате-

лем. В нашем случае в Апрелевско-Кунцевском ландшафте продуцирование кислорода только на 64% зависит от вегетационного индекса и, наоборот, остальные 36% объясняются не учтенными в модели факторами – это могут быть и экологическое состояние, и возрастные особенности и другие причины. Однако средняя ошибка для данной модели составляет 7%, что говорит о достаточно хорошем подборе уравнения регрессии.

Безусловно, полученные сведения не учитывают влияние на продукционные способности лесов возраста и экологических особенностей насаждений, прежде всего ввиду недоступности подобных сведений. Однако полученные уравнения позволяют определять наиболее вероятные величины продуцирования кислорода в отсутствии точных данных. Ошибка, возникающая при таких расчетах, не является статистически значимой для целей среднemasштабной оценки и верификации используемой методики. При наличии более подробных сведений для всех эталонных ландшафтов подобные расчеты могут проводиться отдельно для различных возрастных групп лесов.

Разделение лесов ландшафта на группы средообразования на основании одного вегетационного индекса не является оптимальным. В связи с этим была разработана методика, которая бы учитыва-

Таблица 1

Показатели качества уравнений регрессии

Ландшафт	Коэффициент парной корреляции	Коэффициент детерминации	Средняя ошибка аппроксимации (%)
Ермолинский	0,83	0,69	12,82
Истринский	0,88	0,77	5,79
Апрелевско-Кунцевский	0,80	0,64	7,02
Лузгаринский	0,84	0,71	9,45

ла как вегетационный индекс, так и продукционные способности лесов. В данной работе в основу классификации лесов положен метод Вроцлавской таксономии (см. рис. 1), широко использующийся в математической статистике для разработки классификаций, учитывающих несколько факторов. Разработанная классификация лесов основана на группировке лесных сообществ на основе подобию их внутренней структуры, представленной в данном случае посредством двух показателей. Результат такой классификации изображен на рис. 3. В предложенной таблице строки характеризуют интервалы вегетационного индекса по выделенным комплексам, столбцы – результат выделения аналогичных интервалов по продуцированию кислорода. В ячейках представлена оценка средообразования (номера групп) лесных сообществ по карте растительности, которые отражены интенсивностью цвета.

С учетом доли каждой эписоциации в эталонных ландшафтах произведены расчеты суммарных

показателей выделенных групп лесов, которые наглядно характеризуют различия в продукционных способностях сообществ эталонных ландшафтов, представленных в табл. 2 (продуцирование кислорода) и табл. 3 (депонирование углерода). В таблицах в числителе приведены интервалы соответствующих величин, а в знаменателе – их средневзвешенное значение соответственно.

По продуцированию кислорода минимальное значение характерно для старовозрастных березово-осиново-еловых с сосной лесов, в то время как максимальные значения характерны для условно-коренных широколиственных лесов. Полученные результаты хорошо соотносятся с аналогичными выводами других исследований [Базилевич, 1993; Зимин, 2009 и др.]. Так, молодые насаждения на уровне ландшафта аккумулируют углерод и увеличивают его запас, а преобладание спелых и перестойных насаждений в ландшафте снижает запас углерода [Bottcher et al., 2008]. По накоплению уг-

	A	B	C	D	E	F
1	Вегетационный индекс	Продуцирование кислорода				
2		Менее 4	от 4 до 4,3	от 4,3 до 4,9	от 4,9 до 6	более 6
3	менее 0,05	I	II	III	IV б	V б
4	от 0,05 до 0,055					
5	от 0,055 до 0,069					
6	от 0,069 до 0,08			IV а		
7	более 0,08				V а	

Рис. 3. Выделение групп лесов по значениям вегетационного индекса и продуцирования кислорода (Лузгаринский ландшафт). Латинскими цифрами отмечены выделенные группы лесов

Fig. 3. Groups of forests according to the vegetation index and oxygen production values (Luzgarinskij landscape). The groups of forests are marked with Latin numbers

Таблица 2

Продуцирование кислорода по группам лесов (т/га в год)

Оценка продуцирования (в группе лесов)	Эталонный ландшафт Московской области			
	Ермолинский	Истринский	Апрелевско-Кунцевский	Лузгаринский
I	<u>2,45 – 3,4</u>	<u>3,88 – 4,01</u>	<u>3,34 – 3,70</u>	<u>3,73 – 3,88</u>
	3,31	3,95	3,53	3,75
II	<u>3,59 – 4,01</u>	<u>4,01 – 4,54</u>	<u>3,81 – 4,20</u>	<u>4,04 – 4,21</u>
	3,78	4,21	4,00	4,19
III	<u>3,60 – 4,20</u>	<u>4,66 – 4,75</u>	<u>4,35 – 4,79</u>	<u>4,41 – 4,48</u>
	3,94	4,73	4,45	4,44
IV	<u>4,3 – 4,72</u>	<u>4,85 – 5,5</u>	<u>4,36 – 5,17</u>	<u>4,61 – 5,17</u>
	4,50	4,96	4,79	4,87
V	<u>5,04 – 7,63</u>	<u>5,22 – 6,74</u>	<u>5,45 – 6,78</u>	<u>5,45 – 8,32</u>
	6,41	5,50	6,26	6,39
Средневзвешенное по ландшафту	4,32	4,43	4,60	4,34

Таблица 3

Депонирование углерода фитомассой в группах лесов (т/га в год)

Оценка депонирования (в группе лесов)	Эталонный ландшафт Московской области			
	Ермолинский	Истринский	Апрелевско-Кунцевский	Лузгаринский
I	0,90 – 1,28	1,44 – 1,51	1,20 – 1,40	1,39 – 1,55
	1,24	1,48	1,32	1,41
II	1,34 – 1,50	1,50 – 1,70	1,40 – 1,5,8	1,51 – 1,58
	1,42	1,58	1,50	1,57
III	1,35 – 1,57	1,75 – 1,80	1,63 – 1,80	1,65 – 1,68
	1,48	1,86	1,67	1,66
IV	1,60 – 1,80	1,80 – 2,1	1,63 – 2,00	1,70 – 1,95
	1,68	1,86	1,80	1,83
V	1,89 – 2,90	1,90 – 2,60	2,04 – 2,55	2,00 – 3,20
	2,40	2,06	2,35	2,40
Средневзвешенное по ландшафту	1,62	1,68	1,72	1,62

лерода стоит выделить леса Мещерской низменности, являющиеся его важным пулом в пределах Московской области. Однако площадь лесов со значительными объемами депо углерода в рассмотренном ландшафте невелика, в связи с этим их вклад в средневзвешенное по ландшафту значение ограничен.

В Лузгаринском ландшафте в лесах V группы (условно-коренные широколиственные и короткопроизводные леса) продуцирование кислорода достигает 8,32 т/га в год, а депонирование углерода – 3,2 т/га в год.

В IV группе (в основном условно-коренные сосново-еловые леса) продуцирование кислорода достигает чуть более 5 т/га в год (средневзвешенное 4,87 т/га в год), среднее депонирование углерода – чуть менее 2 т/га в год, а вегетационный индекс – от 0,055 до 0,08.

III группа (короткопроизводные мелколиственные и хвойные леса) по продуцированию кислорода не выделяется (максимально 4,5 т/га в год), депонирование углерода также среднее (не более 1,7 т/га в год), вегетационный индекс не превышает 0,069.

Во II группе (коротко- и длительнопроизводные мелколиственные и хвойные леса) продуцирование кислорода не превышает 4,21 т/га в год, а вегетационный индекс меньше 0,069.

Леса I группы меньше всего продуцируют кислород (меньше 4 т/га в год) и депонируют углерод (меньше 1,55 т/га в год). Сюда входят короткопроизводные березово-сосновые с елью леса и старовозрастные посадки сосны.

Отметим, что выделенные в итоге группы лесов согласуются с их геоботаническим разделением: в ландшафте почти полностью представлен ряд сосново-еловых вейниково-черничных лесов (эпиассоциации 13 и 15; здесь и далее номера эпиассоциаций даны в соответствии с картой растительности МО). Относительно высокий средообразую-

щий потенциал имеют условно-коренные и короткопроизводные леса, слабый средообразующий – длительнопроизводные сообщества: 15–15,2–15,1–15а–15б и 13–13а–13,2 (старовозрастные сосново-еловые леса), при этом средневзвешенная величина продуцирования кислорода и депонирования углерода в ряду эпиассоциации 15 несколько выше соответствующих значений ряда эпиассоциации 13, что может свидетельствовать о более угнетенном и старовозрастном составе данных лесов.

Подобное выделение групп легло в основу построения легенд карт оценок средообразующих функций лесов на эталонные ландшафты (рис. 4). Легенды представляют собой матричную форму, где, с одной стороны отмечены количественные характеристики средообразования, с другой дана качественная оценка средообразующего потенциала. Как можно заметить, средообразующий потенциал тем больше, чем выше величина продуцирования кислорода и депонирования углерода. Карты позволяют наглядно оценить средообразующий эффект лесных сообществ и выделить, прежде всего, наиболее ценные из них, для которых (при условии выполнения других экологических функций) целесообразно предложение мер охраны как важнейших ядер экологического каркаса территории.

Подобная работа была проведена для всех четырех эталонных ландшафтов Московской области. Разработанные в результате этого карты оценки средообразующих функций лесов полностью раскрывают их средообразующие процессы. Карт на подобную тематику среди зарубежных работ немного. Пожалуй, следует особо выделить работу Европейской комиссии по картографированию экосистемных услуг (Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services – MAES). Полная методологическая основа картографирования экосистемных услуг (функций) разработана в [Burkhard, Maes, 2017].

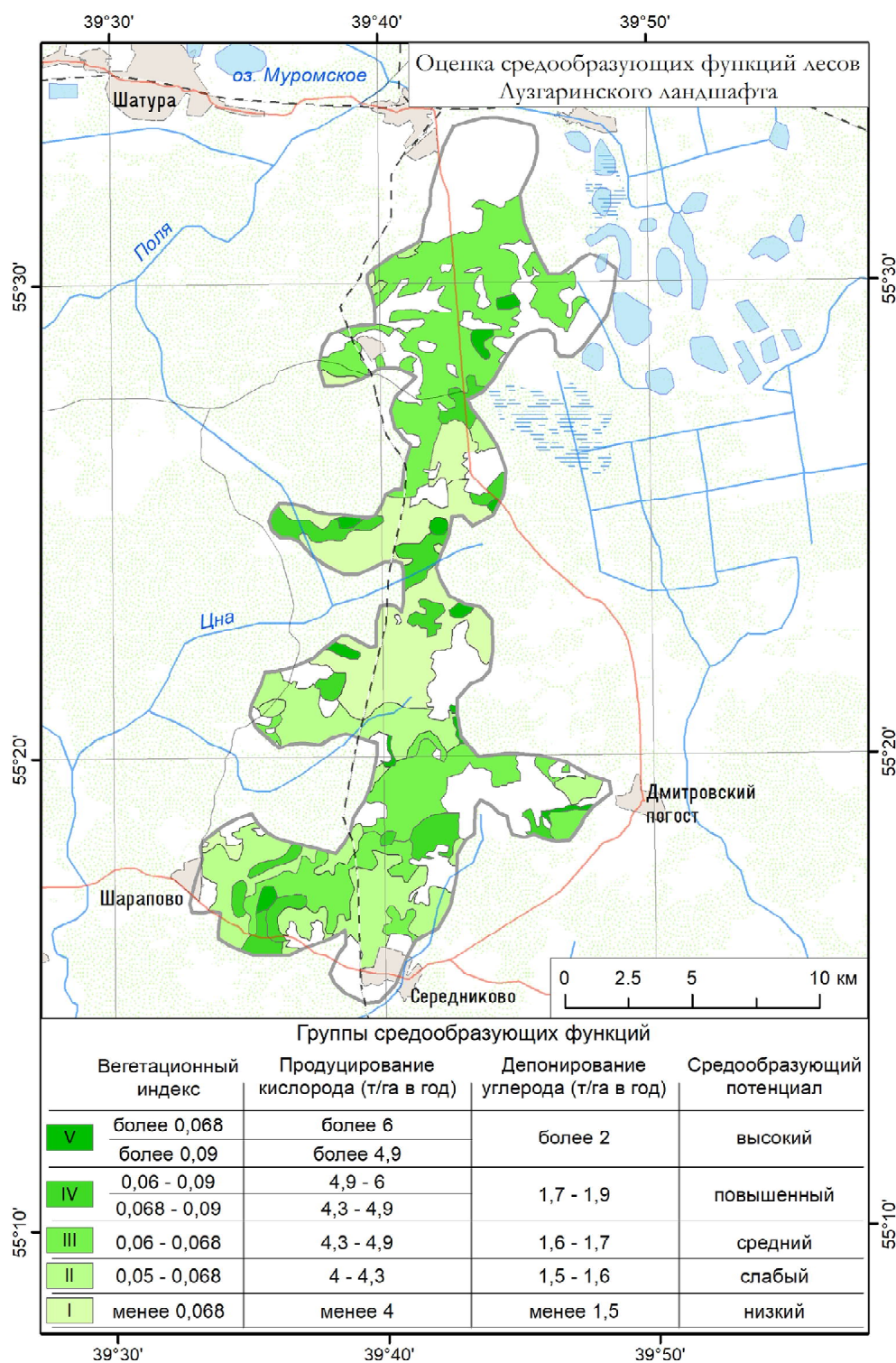


Рис. 4. Фрагмент карты оценки средообразующих функций лесов (Лузгаринский ландшафт)

Fig. 4. The fragment of the map of the assessment of environmental-forming functions of forest (Luzgarinskij landscape)

На основе данных карт стал возможным качественный и количественный анализ параметров средообразования каждого лесного контура эписоциаций (взятого с рассмотренной карты растительности Московской области), а также мест произрастания наиболее ценных лесов ландшафта. Так, на рис. 5 приведены диаграммы, наглядно характе-

ризующие соотношение лесов разных групп и средообразующую ценность ландшафта в целом. В таблице 4 приведены количественные доли лесов разных групп в ландшафтах.

В Истринском ландшафте (см. рис. 5Б) ярко преобладают леса слабого средообразующего потенциала (II группы), при этом максимальная ве-

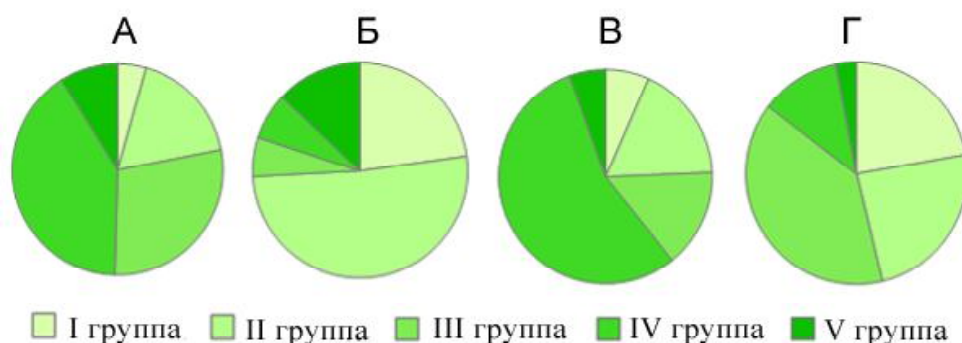


Рис. 5. Продукционные способности лесов эталонных ландшафтов: А – Ермолинский; Б – Истринский; В – Апрелевско-Кунцевский; Г – Лузгаринский

Fig. 5. The production functions of forests in the reference landscapes: А – Ermolinskij; Б – Istrinskij; В – Aprelevsko-Kuntsevskij; Г – Luzgarinskij

Таблица 4

Соотношение лесов разных групп в эталонных ландшафтах

Эталонный ландшафт	Группы лесов (% от общей площади лесов)				
	I	II	III	IV	V
Ермолинский	4,40	17,53	28,51	40,63	8,93
Истринский	22,78	51,37	5,89	6,92	13,04
Апрелевско-Кунцевский	6,65	17,68	14,98	55,20	5,49
Лузгаринский	22,21	24,04	39,07	11,67	3,01

личина продуцирования кислорода составляет 6,74 т/га в год. По породному составу высокие продукционные способности имеют еловые, сосново-еловые, елово-дубовые сообщества, произрастающие в основном к северо-западу от Истры и юго-западу от Истринского водохранилища. Минимальные показатели средообразования у березово-сосновых с елью, березово-еловых с сосной лесов, посадок сосны, произрастающих в южной и северо-восточной частях ландшафта.

В Апрелевско-Кунцевском ландшафте наиболее значительные площади лесов повышенного средообразующего потенциала (см. рис. 5В), максимальная величина продуцирования кислорода, как и в предыдущем случае, не превышает 6,78 т/га в год. Высокие параметры средообразования характерны для короткопроизводных дубовых, липово-дубовых с березой, осинкой, сосной и елью лесов. Такие леса произрастают в основном к северу от города Одинцово, а также в Вороновском поселении присоединенных территорий Москвы. В целом, как показало аналогичное исследование на присоединенных территориях Москвы, леса Роговского и Вороновского поселений имеют высокое значение средоэкологического потенциала, а данные муниципальные образования – благоприятную экологическую обстановку [Васильев, Чистов, 2016]. Минимальные продукционные способности у березовых с елью, ольхой и рябиной сообществ, а также условно-коренных черноольховых с черемухой ивняковых лесов, окружающих крупные населенные пункты и произрастающих в центральной части ландшафта.

В Ермолинском ландшафте (см. рис. 5А) примерно равные доли занимают леса II и III групп, при преобладании длительнопроизводных лесов максимальное значение продуцирования кислорода менее 7,7 т/га в год. Наиболее продуктивные – осиново-березово-сероольховые, березовые с елью и сосной, а также условно-коренные пушистоберезовые с ольхой черной леса, которые произрастают к северо-востоку от Талдома, а также в самой восточной части ландшафта. Леса, произрастающие в восточной и северной частях ландшафта, в основном переувлажнены, и для них характерны высокие значения депонирования углерода. К низкопродуктивным относятся бореальные березово-осиново-еловые с сосной, сосновые сообщества, произрастающие в центральной части ландшафта в окрестностях деревни Ермолино.

В Лузгаринском ландшафте (см. рис. 4; рис. 5Г) преобладают условно-коренные старовозрастные леса, высокие показатели средообразования (до 8,32 т/га в год) характерны для условно-коренных лесов: черноольховых с черемухой ивняковых, пушистоберезовых с сосной и ольхой серой, а также короткопроизводных бореальных осиново-березово-сосново-еловых лесов, произрастающих по большей части в северной и отчасти центральной частях ландшафта. Минимальная средообразующая способность у березово-сосновых с елью лесов, а также посадок сосны в центральной части ландшафта.

Таким образом, преобладание в ландшафтах условно-коренных и короткопроизводных лесов характеризует в целом стабильный с экологической

точки зрения ландшафт и относительно высокие продукционные способности лесов (например, Лузгаринский ландшафт), при преобладании же длительнопроизводных мелколиственных лесов продуцирование кислорода и депонирование углерода фитомассой имеют меньшие значения, однако именно в них являются наиболее ценными сохранившиеся ареалы короткопроизводных сообществ, имеющие большой вегетационный индекс и характеристики средообразования (к примеру, Апрелевско-Кунцевский ландшафт). Также на средообразующие функции влияют как породный, так и возрастной состав лесов. Продуцирование кислорода, как и способность депонировать углерод, в таких лесах падает, в то время как в лесах среднего возраста она возрастает.

Выводы:

– в лесах рассмотренных ландшафтов Московской области существенны различия как в процентном соотношении лесных сообществ, так и в направлении трансформации лесных экосистем, которые выполняют различные экологические функции. Наиболее ярко охарактеризованные различия проявляются в оценке средообразующих функций лесов;

– использование сентябрьских космических снимков в предложенной методике автора позволило рассчитать вегетационные индексы для каждого лесного контура в пределах эталонных ландшафтов, тем самым косвенно оценив средообразующие функции лесов. Условно-коренные лесные сообщества имеют, как правило, более высокий вегетационный индекс, для длительнопроизводных нарушенных лесов он будет более низким. Так, в среднем вегетационный индекс лесов Лузгаринского ландшафта выше Апрелевско-Кунцевского;

– основываясь на функциональной зависимости между продуцированием кислорода и вегетационны-

ми индексами, для всех лесов эталонных ландшафтов были рассчитаны интересующие величины средообразования. При помощи методов математической статистики были выделены пять групп средообразования лесов, на основе которых составлены легенды карт оценки средообразующих функций лесов эталонных ландшафтов по упомянутой методике. Эти карты, составленные в масштабе 1:200 000, являются первым подобным картографическим произведением на рассматриваемую территорию, имеют единую компоновку и элементы;

– относительно высокое максимальное продуцирование кислорода отмечается в лесах ландшафтов с низким антропогенным влиянием – Лузгаринском (Мещерская низменность) и Ермолинском (Верхневолжская низменность). Заболоченный характер местности указанных ландшафтов также определяет относительно высокие значения запасов и депонирования углерода лесами (ввиду их малой площади средневзвешенное значение получается ниже, чем в других ландшафтах). Несмотря на скудность видового состава, в Лузгаринском ландшафте леса выполняют важную средообразующую роль, как и некоторые лесные сообщества Апрелевско-Кунцевского ландшафта, которые следует рекомендовать к охране;

– на основе составленных карт, демонстрирующих результат оценки средообразующих функций лесов эталонных ландшафтов, возможна реализация исследования с целью картографирования средообразующих функций лесов на иные территории – как ландшафты, так и регион в целом. Это позволит сохранить важнейшие ядра экологического каркаса Московской области в интересах будущих поколений и устойчивого развития территории столичного региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Анненская Г.Н., Жучкова В.К., Калинина В.Р., Мамай И.И., Низовцев В.А., Хрусталева М.А., Цесельчук Ю.Н. Ландшафты Московской области и их современное состояние. Смоленск: СГУ, 1997. 296 с.

Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.

Варфоломеев А.Ю., Мироненко А.А. Влияние накопления биологических повреждений на выделение кислорода хвойными насаждениями на севере // Фундаментальные исследования. 2012. № 9. С. 361–368.

Васильев О.Д., Чистов С.В. Исследование и картографирование средообразующих функций лесов Новой Москвы // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2016. Т. 60. № 5. С. 128–133.

Васильев О.Д., Чистов С.В. Экологический каркас Московского региона и его сохранение // Геопоиск-2017: Материалы II Всероссийского конгресса молодых ученых-географов. Тверь: Изд-во ТвГУ, 2017. С. 338–354.

Васильев О.Д., Огурева Г.Н., Чистов С.В. Оценка ценотического разнообразия лесного покрова и его динамики в эталонных ландшафтах Московского региона по данным дистанционного зон-

дирования // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2019. Т. 64(2). С. 185–205. DOI: 10.21638/spbu07.2019.202.

Замолодчиков Д.Г. Система оценки и прогнозов запаса углерода в лесных экосистемах // Устойчивое лесопользование. 2011. № 4(29). С. 15–22.

Зимин М.В. Разработка методики картографирования средообразующих функций бореальных лесов европейской России: дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2009. 157 с.

Коломыц Э.Г., Розенберг Г.С., Шарая Л.С. Методы ландшафтной экологии в прогнозных оценках биотической регуляции углеродного цикла при глобальном потеплении // Экология. 2009. № 6. С. 403–409.

Кравченко П.Н. Экологическая оценка территории Тверской области в интересах сохранения редких видов *in situ* на основе каркасно-геоэкологического моделирования: дис. ... канд. геогр. наук. Тверь, 2015. 181 с.

Кронберг П. Дистанционное изучение Земли / Пер. с нем. М.: Мир, 1988. 343 с.

Огурева Г.Н., Микляева И.М., Сулова Е.Г., Швергунов Л.В. Растительность Московской области. Пояснительный текст к карте (м-б 1:200 000). М.: Экор, 1996. 45 с.

Рубцов М.В. Классификация функций и роли леса // Лесоведение. 1984. № 2. С. 3–10.

Усольцев В.А. Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 570 с.

Усольцев В.А. Фитомасса модельных деревьев лесобразующих пород Евразии: база данных, климатически обусловленная география, таксационные нормативы. Екатеринбург: Уральский госуд. лесотехн. ун-т, 2016. 335 с.

Уткин А.И., Замолотчиков Д.Г., Пряжников А.А. Методы определения депонирования углерода фитомассы и нетто-продуктивности лесов (на примере Республики Беларусь) // Лесоведение. 2003. № 1. С. 48–57.

Bottcher H., Kurz W.A., Freibauer A. Accounting of forest carbon sinks and sources under a future climate protocol – factoring out past disturbance and management effects on age-class structure. *Environ. Sci. Policy*, 2008, no. 11, p. 669–686.

Burkhard B., Maes J. Mapping Ecosystem Services. Sofia: Pensoft Publishers. 2017. 374 p.

Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher R., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 2013, vol. 342, issue 6160, p. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693. URL: <https://science.sciencemag.org/content/342/6160/850>.

Schimel D.S., House J.L., Hibbard K.A. et al. Reset patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 2001, vol. 414, no. 8, p. 169–178. DOI: 10.1038/35102500.

Woodward F.I., Smith T.M., Emanuel V.R. A global and primary productivity and phytogeography model. *Global biogeochemical cycles*, 1995, vol. 9, iss. 4, p. 471–490. DOI: 10.1029/95GB02432.

Поступила в редакцию 29.01.2020

После доработки 12.05.2020

Принята к публикации 06.08.2020

O.D. Vasilyev¹

MAPPING OF ENVIRONMENT-FORMING FUNCTIONS OF FORESTS AND THEIR COMPARATIVE ANALYSIS IN THE LANDSCAPES OF THE MOSCOW REGION

The article presents the results of a medium-scale study and mapping of the environment-forming functions of forests in the reference landscapes located in various physical and geographical areas of the Moscow region, namely the Verkhnevolzhskaya Lowland, the Klinsko-Dmitrovskaya range, the Teplostanskaya Upland and the Meshcherskaya Lowland. The actual forest diversity was determined for each landscape from the vegetation map; the dynamics of each forest epi-association was identified, and the vegetation index was calculated using the Landsat space imagery. The production of oxygen and the carbon sequestration by phytomass are calculated for 1 ha of some types of forests, the composition and structure of which are covered in available publications. The sources of information are field studies by the author, the Department of Biogeography of the MSU Faculty of Geography, the Center of Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences, and literary sources. Using methods of mathematical statistics and values of the vegetation index, a method for calculating the environment-forming functions for each forest area of reference landscapes is proposed. This made it possible to give a cartographic assessment of the contribution of main tree species to the environment-forming functions of forests. The highest values of oxygen production are characteristic of floodplain forests with gray and black alder, hazel and willow, as well as for nominally primary broad-leaved species. The maximum production of oxygen is observed in the landscapes with low anthropogenic impact, i. e. the Verkhnevolzhskaya and Meshcherskaya lowlands, the minimum production – in the anthropogenically disturbed forests of the Teplostanskaya Upland. And, the swampy terrain of the low-lying landscapes determines relatively high values of carbon sequestration by forests. The paper gives examples of the evaluation maps of environment-forming functions of forests. The results can be used for sustainable forest management with the aim of recommending the conservation measures for the most valuable forest communities in a landscape. Disregard of the environmental component leads to the degradation of both forests and the whole ecosystem, thus affecting the ecological situation and the human health.

Key words: ecological functions of forests, oxygen production, carbon sequestration, remote sensing of forests, cartography

REFERENCES

Annenskaya G.N., Zhuchkova V.K., Kalinina V.R., Mamai I.I., Nizovtsev V.A., Khrustaleva M.A. Tsesel'chuk Yu.N. *Landshafty Moskovskoi oblasti i ikh sovremennoe sostoyanie* [Landscapes of the Moscow region and their current state]. Smolensk, SGU Publ., 1997, 296 p. (In Russian)

Bazilevich N.I. *Biologicheskaya produktivnost' ekosistem Severnoi Evrazii* [Biological productivity of Northern Eurasia ecosystems]. Moscow, Nauka Publ., 1993, 293 p. (In Russian)

Bottcher H., Kurz W.A., Freibauer A. Accounting of forest carbon sinks and sources under a future climate protocol – factoring

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Cartography and Geoinformatics, post-graduate student; Zubov State Oceanographic Institute, Department of Applied Sea and Water Economy Research and Surveying, Junior Scientific Researcher; e-mail: vasilyev_vizin@bk.ru

out past disturbance and management effects on age-class structure. *Environ. Sci. Policy*, 2008, no. 11, p. 669–686.

Burkhard B., Maes J. *Mapping Ecosystem Services*. Sofia, Pensoft Publishers, 2017, 374 p.

Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher R. et al. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 15 Nov 2013, vol. 342, iss. 6160, p. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693. URL: <https://science.sciencemag.org/content/342/6160/850>

Kolomyts E.G., Rozenberg G.S., Sharaya L.S. Metody landshaftnoi ekologii v prognoznnykh otsenkakh bioticheskoi regulatsii uglerodnogo tsikla pri global'nom poteplenii [Landscape ecology methods in predictive estimates of the biotic regulation of the carbon cycle during the global warming]. *Ekologiya*, 2009, no. 6, p. 403–409. (In Russian)

Kravchenko P.N. *Ekologicheskaya otsenka territorii Tverskoi oblasti v interesakh sokhraneniya redkikh vidov in situ na osnove karkasno-geoekologicheskogo modelirovaniya* [Ecological assessment of the Tver region for *in-situ* conservation of rare species based on the network-geoeological modeling], PhD dissertation, Tver, 2015, 181 p. (In Russian)

Kronberg P. *Distantionnoe izuchenie Zemli* [Remote sensing of the Earth]. Moscow, Mir Publ., 1998, 343 p. (In Russian)

Kronberg P. *Fernerkundung der Erde: Grundlagen und Methoden des Remote Sensing in der Geologie*. Stuttgart, Enke, 1985, 394 p.

Ogureeva G.N., Miklyaeva I.M., Suslova E.G., Shvergounova L.V. *Rastitel'nost' Moskovskoi oblasti. Poyasnitel'nyi tekst k karte (m-b 1:200 000)* [Vegetation of the Moscow region. Explanatory text to the map (scale 1:200 000)]. Moscow, Ekor Publ., 1996, 45 p. (In Russian)

Rubtsov M.V. Klassifikatsiya funktsij i roli lesa [Classification of forest functions and role]. *Lesovedenie*, 1984, no. 2, p. 3–10. (In Russian)

Schimal D.S., House, J.L., Hibbard K.A. et al. Reset patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 2001, vol. 414, no. 8, p. 169–178. DOI: 10.1038/35102500.

Usoltsev V.A. *Fitomassa i pervichnaya produktsiya lesov Evrazii* [Biomass and primary production of Eurasia's forests]. Yekaterinburg, UrO RAN Publ., 2010, 570 p. (In Russian)

Usoltsev V.A. *Fitomassa model'nykh derev'ev lesoobrazuyushchikh porod Evrazii: baza dannykh, klimaticheski obuslovlennaya geografiya, taksatsionnye normativy* [Single-tree biomass of forest-forming species in Eurasia: database, climate-

related geography, weight tables]. Yekaterinburg, Ural'skii gosud. lesotekhn. universitet, 2016, 335 p. (In Russian)

Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Pryazhnikov A.A. Metody opredeleniya deponirovaniya ugleroda fitomassy i netto-produktivnosti lesov (na primere Respubliki Belarus') [Methods for evaluation of carbon sequestration in phytomass and net productivity of forests (case study of the Republic of Belarus)]. *Lesovedenie*, 2003, no. 1, p. 48–57. (In Russian)

Varfolomeev A.Y., Mironenko A.A. Vliyanie nakopleniya biologicheskikh povrezhdenii na vydelenie kisloroda khvoinymi nasazhdeniyami na severe [Decrease of oxygen segregation by coniferous stands in case of biological damage accumulation]. *Fundamental research*, 2012, no. 9–2, p. 361–369. (In Russian)

Vasilyev O.D., Chistov S.V. [Ecological framework of Moscow region and its preservation], *Vserossiiskii kongress molodykh uchenykh-geografov Geopisk-2017* [All-Russian Congress of young geographers «Geopisk-2017»], Tver, TvGU Publ., 2017, p. 338–354. (In Russian)

Vasilyev O.D., Chistov S.V. Issledovanie i kartografirovanie sredobrazuyushchikh funktsij lesov Novoi Moskvy [Researching and creating maps of environmental-forming functions of the forests of New Moscow], *Izvestiya vuzov. Geodezy and aerophotosurveying*, 2016, vol. 60, no. 5, p. 128–133. (In Russian)

Vasilyev O.D., Ogureeva G.N., Chistov S.V. Otsenka tsenoticheskogo raznoobraziya lesnogo pokrova i ego dinamiki v etalonnykh landshaftakh Moskovskogo regiona po dannym distantionnogo zondirovaniya [The assessment of forest cenotic diversity and its dynamics in Moscow region reference landscapes based on remote sensing data], *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2019, no. 64(2), p. 185–205. DOI: 10.21638/spbu07.2019.202. (In Russian)

Woodward F.I., Smith T.M., Emanuel V.R. A global and primary productivity and phypogeography model. *Global biogeochemical cycles*, 1995, vol. 9, iss. 4, p. 471–490. DOI: 10.1029/95GB02432.

Zamolodchikov D.G. Sistemy otsenki i prognoza zapasov ugleroda v lesnykh ekosistemakh [The system of evaluation and prediction of carbon stocks in forest ecosystems]. *Ustoichivoe lesopol'zovanie*, 2011, no. 4(29), p. 15–22. (In Russian)

Zimin M.V. *Razrabotka metodiki kartografirovaniya sredobrazuyushchikh funktsij boreal'nykh lesov evropeiskoi Rossii* [Elaboration of a methodology for mapping the environment-forming functions of boreal forests in European Russia]. PhD dissertation. Moscow, 2009, 157 p. (In Russian)

Received 29.01.2020

Revised 12.05.2020

Accepted 06.08.2020

УДК 504;628.35

А.М. Дрегуло^{1,2}

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ЭКСПЛУАТАЦИЮ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ОТХОДОВ ВОДООТВЕДЕНИЯ

Перспективы использования солнечной энергии, способствующей снижению капитальных затрат на обработку отходов водоотведения в естественных условиях, обеспечивает лидерство в выборе природно-технических систем обработки отходов водоотведения – иловых площадок (карт). Отличительной чертой функционирования иловых площадок является прямая зависимость режима их эксплуатации от климатической нагрузки (μ) – совокупного влияния среднегодовых значений температуры воздуха и атмосферных осадков. В настоящей работе динамика μ изучалась для иловых площадок, расположенных на территории Ленинградской области. В работе проанализированы нормативные требования и рекомендации по их эксплуатации, «кочующие» из одной редакции нормативных документов в другую. Основные нормативные критерии климатической нагрузки (μ) не соответствуют действительному влиянию среднегодовых значений температуры воздуха и атмосферных осадков как базовых параметров эксплуатации природно-технических систем обработки отходов водоотведения. Было установлено, что среднегодовые величины атмосферных осадков превышали установленные нормы на один–три шага, в то время как диапазон среднегодовых температур воздуха всего хронологического ряда соответствовал нормативному шагу ранжирования. Влияние атмосферных осадков изменяло значение μ и его территориальную специфику. Результаты исследования позволяют заключить, что увеличение атмосферных осадков могло способствовать потере эксплуатационных и природозащитных свойств природно-технических систем обработки отходов водоотведения, спроектированных и эксплуатировавшихся согласно нормативным требованиям.

Ключевые слова: иловые карты, осадки сточных вод, влияние климата, нормативные требования, экологический вред

Введение. Региональные климатические особенности как совокупность физико-географических факторов, изменения которых осложняются пространственной неоднородностью и антропогенной нагрузкой [Curtigero et al., 2001; Второй оценочный ..., 2014; Григорьев, Кондратьев, 2010], требуют адекватных подходов к технологиям, применяемым при эксплуатации природно-технических систем обработки отходов водоотведения. Процесс обезвоживания осадка на иловых площадках является совокупностью тепловых процессов и процессов массопередачи. В общей практике он описывается уравнением скорости влагоотдачи (подробнее [Воронов, Яковлев, 2006]).

Разработка и совершенствование методов обработки осадка сточных вод с использованием солнечной энергии все более актуализируются, поскольку процесс высыхания осадка является высокоэнергоемким, поэтому требуются альтернативные малозатратные источники энергии.

Прогнозные оценки изменения климата показали, что средняя скорость роста среднегодовой температуры воздуха на территории России в 1976–2014 гг. составила 0,42°C/10 лет, что в 2,5 раза больше скорости роста глобальной температуры за тот же период [О состоянии ..., 2014]. В значительной степени этому способствуют колебания величин атмосферных осадков. По результатам среднего

месяца сезона для федеральных округов в 2017 г. в зимний период наблюдалось увеличение атмосферных осадков в ЦФО на 270%; СЗФО – на 300%; ЮФО – 240%; СКФО – 390%; ПФО – 300%; УФО – 400%; СФО – 560%; ДФО – 540%. В летний период наблюдалось увеличение в ЦФО на 12%; СЗФО – 50%; ЮФО – 225%; СКФО – 50%; ПФО – 50%; УФО – 50%; СФО – 25%; ДФО – 47% [Изменение климата ..., 2018]. Потенциальное воздействие атмосферных осадков может резко снижать эксплуатационные характеристики природно-технических систем обработки отходов водоотведения, что приводит к появлению объектов накопленного экологического ущерба [Dregulo, Kudryavtsev, 2018; Дрегуло и др., 2016].

До настоящего времени нет научно обоснованных рекомендаций по выявлению геоэкологических факторов, способствующих деградации природно-технических систем, вмещающих иловые карты. Только в Ленинградской области насчитывается более 170 иловых карт, расположенных в зоне водосбора восточной части Финского залива и Ладожского озера. В целом по стране данные о количестве и состоянии природно-технических систем иловых карт отсутствуют, что дополнительно актуализирует своевременность настоящего исследования – оценку адекватности нормативных требований к определению климатической нагрузки на природно-

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, науч. с., канд. биол. н.; e-mail: a.dregulo@spbu.ru

² Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, лаборатория геоэкологических проблем природно-хозяйственных систем и урбанизированных территорий, ст. науч. с.

технические системы обработки отходов водоотведения (иловые карты, площадки).

Материалы и методы исследования. В качестве одного из информативных критериев геоэкологической устойчивости природно-технических систем карт исследовано влияние климатической нагрузки (совокупного влияния температуры воздуха и количества атмосферных осадков – коэффициент μ [СП 32.13330.2012 Канализация ...]), оказывающей влияние на технологические параметры обработки осадков сточных вод – высоту слоя и объем напуска осадка.

Для оценки изменения климатических факторов (среднегодовых температуры воздуха и количества атмосферных осадков) были проанализированы специализированные массивы климатических данных 518 станций за период 1958–2012 гг. [Научно-прикладной ..., 2019]. На основании полученных значений проводили территориальное зонирование, строили ГИС-модель карты-схемы распределения μ . Для оценки среднесуточных массивов данных осадков использовался метод интегрально-разностных кривых (ИРК) [Дроздов, 1962].

Результаты исследований и их обсуждение. Региональными особенностями изменения климата могут оказаться как орографические преграды, так и зоны, разделяющие территорию по воздействию антропогенных факторов, влияющих на процессы подсушивания осадков. Историческая реконструкция (периоды, за которые менялись нормативные требования ранжирования природно-климатической нагрузки на иловые карты) и прогноз современных изменений климатической нагрузки на иловые карты показали, что геоэкологические критерии, используемые в проектировании и эксплуатации природно-технических систем иловых карт, не учитывают реальную динамику температуры воздуха и атмосферных осадков. Критериям природно-климатической нагрузки, используемым в настоящее время, соответствуют только ряд южных регионов страны (рис. 1), соответственно, зональная градация климатической нагрузки не применима для всей территории страны. На рис. 2 видно, что температурные зоны более позднего периода значительно смещаются в северо-восточном направлении.

В северных и юго-восточных регионах Восточной и Западной Сибири появляются локальные (замкнутые) температурные зоны. К примеру, на северо-западе страны в зоне температур $-9...-13^{\circ}\text{C}$ появляются локальные зоны со среднегодовой температурой ниже -13°C . При очевидной выраженной тенденции сдвига изотерм по всей территории РФ в районах Приамурья и Прибайкалья в диапазоне $-5...-9^{\circ}\text{C}$ сохраняются локальные зоны -5°C , -9°C , -1°C .

В период 1986–2012 гг. значительно увеличилось количество осадков (рис. 3). Особенно это характерно для центрального, северо-западного региона, а также для Восточной и Западной Сибири. Отличительной особенностью смены зон выпадения осадков является зональное укрупнение характер-

ных областей. Очевидно, что совокупное воздействие климатических факторов с учетом выявленных закономерностей их пространственно-временного изменения вряд ли будет иметь линейную форму распределения климатического коэффициента μ .

Санкт-Петербург, согласно градации [СП 32.13330.2012, 2019], находится в зоне μ между 0,9 и 1,0 (примерно 0,95). При этом диапазон температуры сохраняется от $+3$ до $+7^{\circ}\text{C}$, но увеличивается по количеству осадков 600–700 мм. Согласно градации количества осадков, Санкт-Петербург находится в зоне 660 мм. Среднегодовое количество осадков, рассчитанное за 49 лет (1966–2012 гг.), составляет 652 мм. Это достаточно близкие значения в пределах наблюдаемого хронологического цикла. Увеличение количества осадков на 52–60 мм для среднегодового цикла – довольно существенная разница [Климат России, 2019]. Схожая ситуация наблюдается в Тихвине, Выборге, Старой Руссе, Белогорке (рис. 4), где со сменой климатических факторов изменилось и воздействие на иловые карты и площадки.

При определении μ согласно градации [СП 32.13330.2012, 2019] для всех перечисленных городов, $\mu=0,9$, на карте-схеме (см. рис. 4) он равен 0,8. В данном случае, как и Санкт-Петербург, все эти города находятся в одной климатической зоне.

На данной территории среднегодовое количество осадков увеличилось с 680 мм (в 1966–1985) до 720 мм (1986–2012), что привело к снижению μ на 0,1 (до 0,8), что уже не учитывается при градации [СП 32.13330.2012, 2019].

Очевидно, что при сохранении режима температуры в рассматриваемой мезоклиматической зоне, выпадение атмосферных осадков является ключевым фактором изменения (снижения) климатического коэффициента μ .

Снижение μ ухудшает эффективность процесса обработки осадков сточных вод на иловых площадках ввиду того, что заданные величины, согласно формуле (1) [Евилевич, 1957] для проектирования иловой площадки, в данном случае не изменяются как должно вместе с коэффициентом μ :

$$F = \frac{W_{\text{ос}}}{H\mu}, \quad (1)$$

где F – полезная площадь иловой площадки, (м^2); $W_{\text{ос}}$ – годовое количество осадков, поступающих на иловые площадки, (м^3); H – высота годового слоя напуска осадка (м). Следовательно, для уже существующих иловых площадок необходимо оптимизировать параметры F , $W_{\text{ос}}$ или H .

Обработка климатических данных длительного хронологического ряда наблюдений позволила определить, что величина осадков, превышающая диапазоны коэффициента μ , в большей степени зависит не от среднегодовой суммы осадков, нивелирующей их совокупное влияние на иловые карты (площадки), а от их максимальной суточной величины и продолжительности дней с разной интенсивностью.

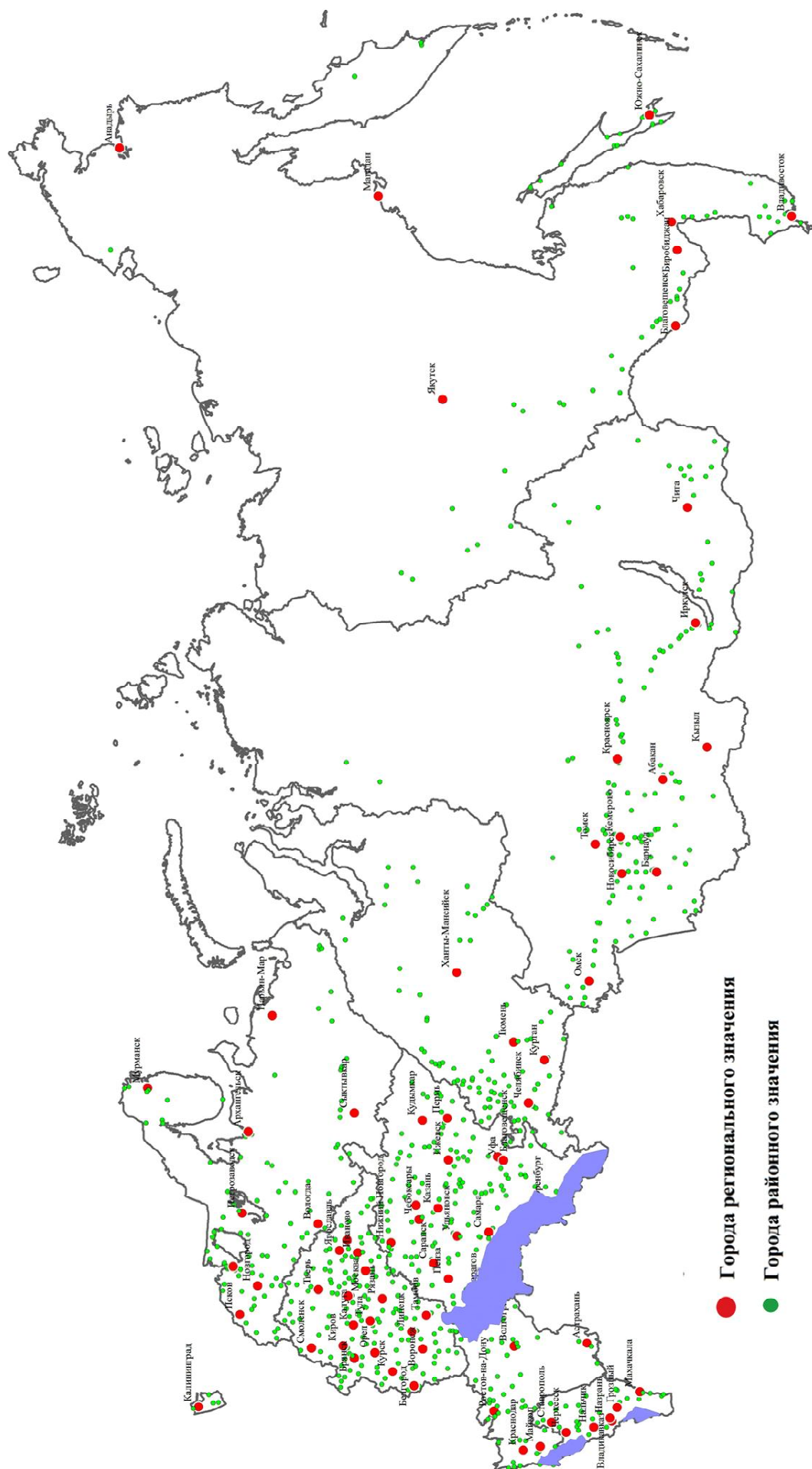


Рис. 1. Зонирование территорий по нормативным (СП 32.13330.2012) требованиям (μ) в период с 1986–2012 гг.

Fig. 1. Territory zoning according to standards (μ) of SP 32.13330.2012 in 1986–2012

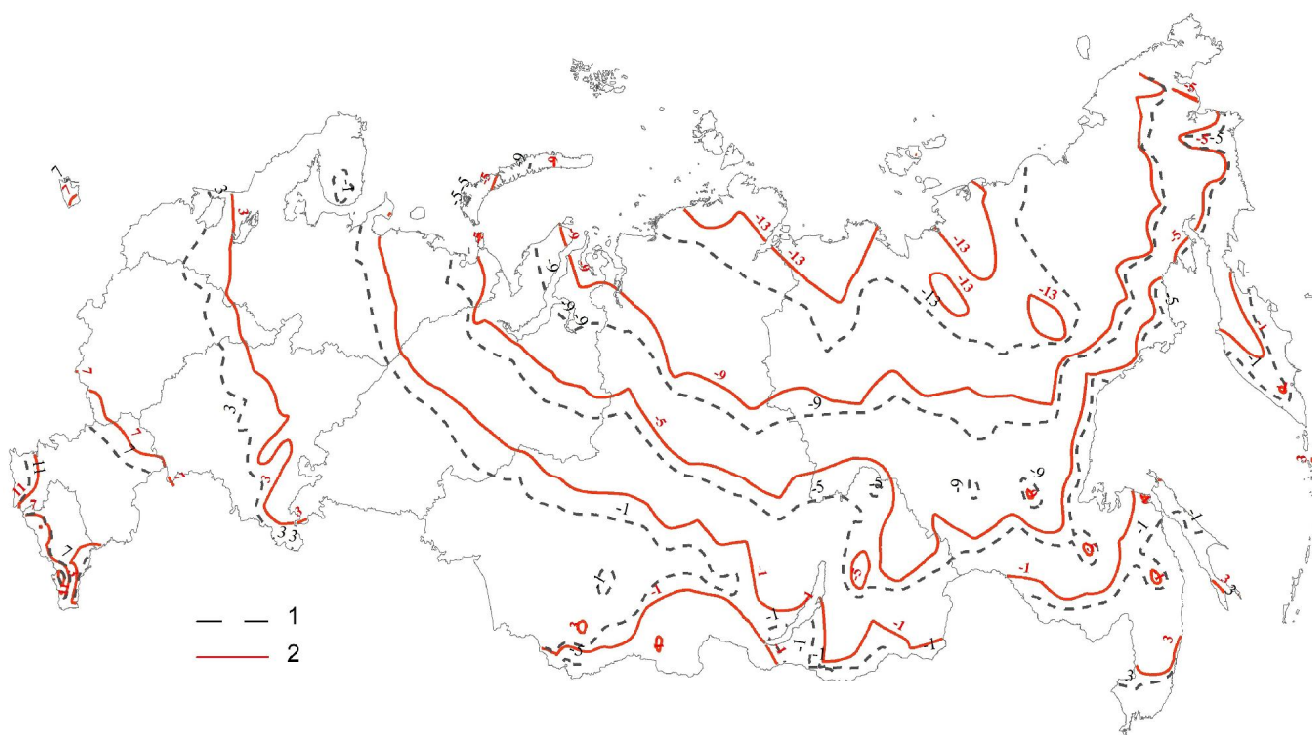


Рис. 2. Среднегодовая температура воздуха (°C) в 1958–1985 гг. (1) и 1986–2020 гг. (2)

Fig. 2. The average annual air temperature (°C) during 1958–1985 (1) and 1986–2020 (2)

Поэтому для оптимизации уже введенных в эксплуатацию и еще проектируемых природно-технических систем обработки отходов водоотведения важно оценить именно хронологический цикл дина-

мики атмосферных осадков как доминирующего фактора, необходимого для объективной оценки долгосрочной климатической нагрузки, отражающейся на величине коэффициента μ .

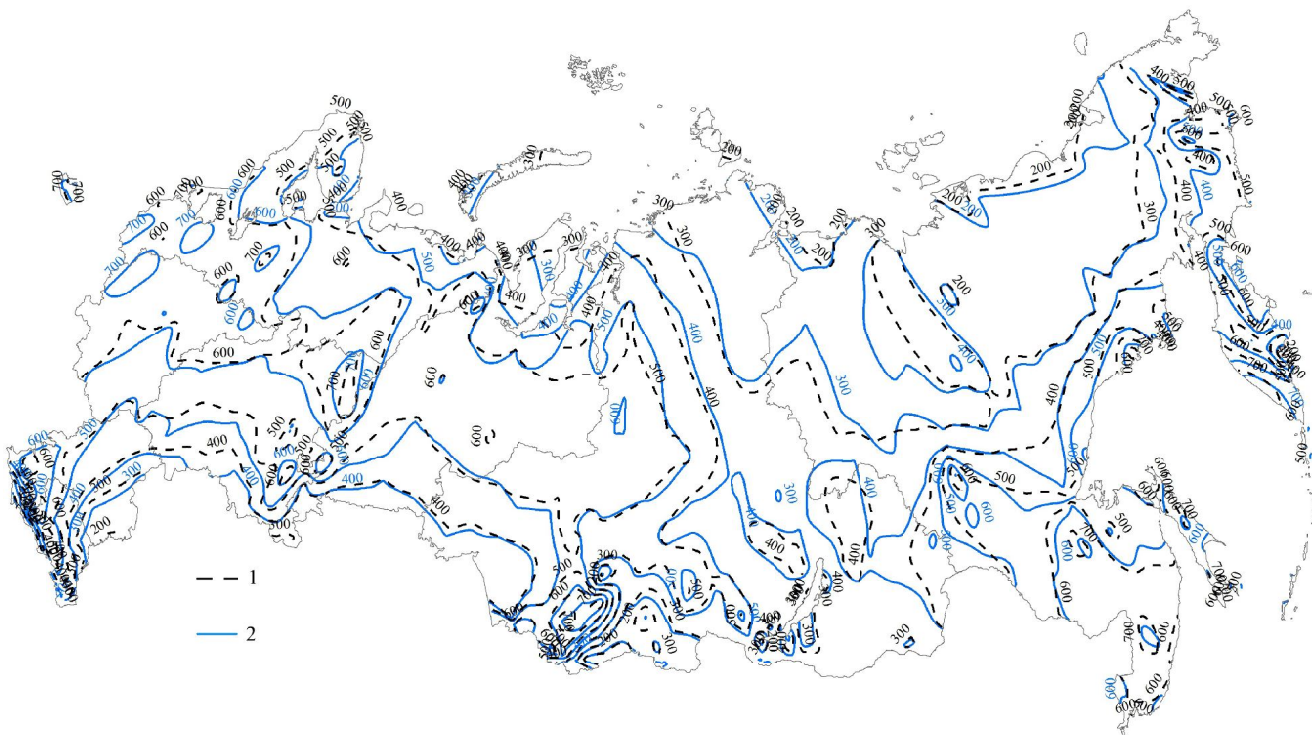


Рис. 3. Среднегодовое количество атмосферных осадков (мм) в 1966–1985 гг. (1) и 1986–2012 гг. (2)

Fig. 3. The average annual amount of precipitation (mm) during 1966–1985 (1) and 1986–2012 (2)

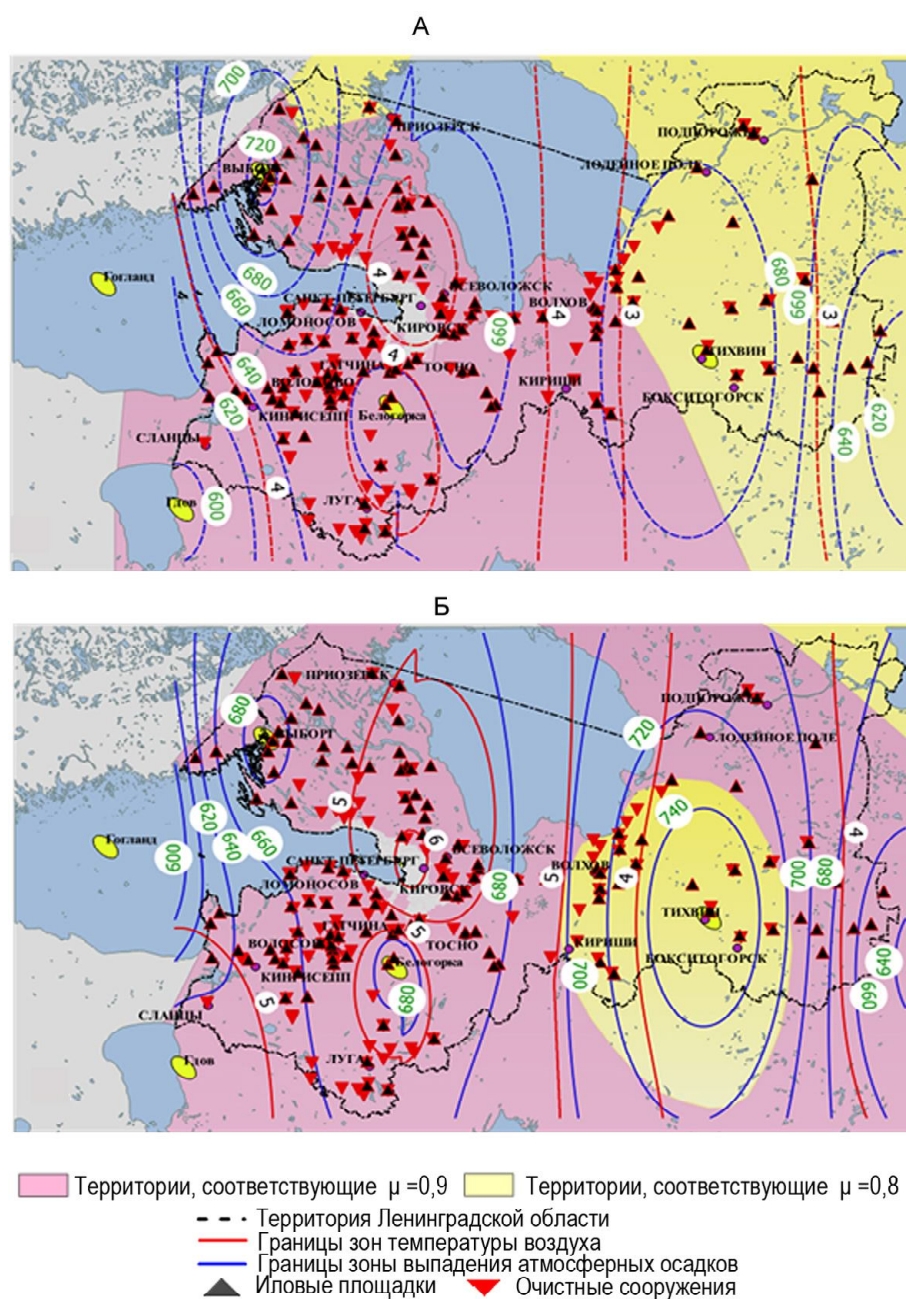


Рис. 4. Смена влияния климатических коэффициентов на иловые площадки в 1958–1985 гг. (А) и 1986–2012 гг. (Б)

Fig. 4. Changes of the influence of climatic factors on sludge drying beds during 1958–1985 (А) and 1986–2012 (Б)

Эти исследования показали, что изменение годовых сумм осадков имеет синусоидальный вид с четко выраженными фазами временного цикла. Маловодная фаза (K_c) занимает значительно меньший период (всего семь лет из 49, 1966–1972 гг., для Санкт-Петербурга, Старой Руссы и Выборга), с 1966 по 1983 гг. – для Тихвина и весьма значительный для Белогорки (с 1966 по 2002 гг., 36 лет). Многоводная фаза (K_n) охватывает период 39 лет (1973–2012 гг.) для Санкт-Петербурга, Старой Руссы и Выборга, 28 лет (1984–2012 гг.) для Тихвина и наименьший – 10 лет (2002–2012 гг.) для Белогорки (таблица, рис. 5).

Для Тихвина количество лет со среднегодовым превышением осадков в диапазоне $\mu=1$ составило 35 лет из 49 с максимумом 995 мм, для Выборга – 6 лет с максимумом 995 мм, для Старой Руссы – 8 лет с максимумом 920 мм, для Белогорки – 18 лет, с максимумом 826 мм. Проведенный анализ многолетней динамики осадков и температуры (рис. 6) показал определенное наличие статистически не значимых трендов в рядах температуры и их отсутствие для атмосферных осадков.

Диапазон μ маловодной фазы (K_c) от 0,89 до 0,986 и многоводной фазы (K_n) – от 1,0

Т а б л и ц а

Значения ординат ИРК и степени отклонения фаз

Тихвин		Старая Русса		Санкт-Петербург		Белогорка		Выборг	
<i>Kc</i>	<i>Kn</i>	<i>Kc</i>	<i>Kn</i>	<i>Kc</i>	<i>Kn</i>	<i>Kc</i>	<i>Kn</i>	<i>Kc</i>	<i>Kn</i>
0,94	1,02	0,94	0,99	0,89	1,0	0,986	1,0	0,93	1,0
1966–1983	1984–2012	1966–1973	1974–2012	1966–1973	1974–2012	1966–2002	2003–2012	1966–1973	1974–2012
±8%		±5%		±11%		±1,4%		±7%	

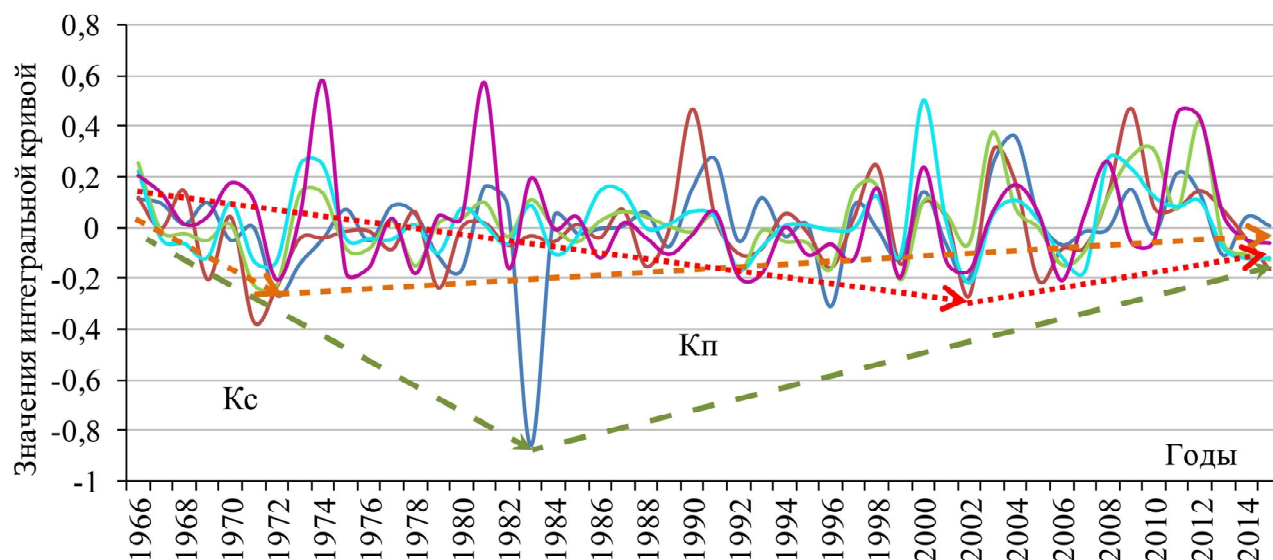


Рис. 5. Значение ИРК многолетней динамики выпадения осадков

Fig. 5. Value of integrated difference curves of the long-term precipitation dynamics

до 1,02. Амплитуда общего цикла осадков составляет 0,858.

Так, для юго-западной части Ленинградской области (Белогорка) степень отклонения μ не превышает $\pm 1,4\%$, западной части (Тихвин) – $\pm 8\%$; южной (Старая Русса) – $\pm 5\%$; северной (Выборг) – $\pm 7\%$. Наибольшая степень отклонения наблюдается для Санкт-Петербурга – $\pm 11\%$.

Отсутствие корреляции между хронологическими рядами температуры и осадков (хотя их колебания имеют значительное сходство) и в то же время заметный рост среднегодовых величин атмосферных осадков обуславливают необходимость дополнительно учитывать закономерности изменения циклических колебаний при расчете и оценке эксплуатационной эффективности иловых площадок [Матвеева и др., 2015; Золина, Булыгина, 2016; Чернокульский и др., 2018].

Таким образом, результаты исследования позволяют сделать вывод о том, что регламентируемые в актуальной редакции нормативной документации требования, начиная с 1986 г. по настоящее время, не отражают реальные климатические осо-

бенности регионов, что могло способствовать проектным и эксплуатационным ошибкам в управлении природно-техническими системами обработки отходов водоотведения.

Выводы:

– несмотря на наблюдаемый рост температуры воздуха, наиболее значимым фактором влияния на эксплуатацию иловых площадок является количество атмосферных осадков, воздействие которых не определяется границами мезоклиматической зоны и должно учитываться в каждом конкретном случае;

– существует вероятность того, что проекты природно-технических систем обработки отходов водоотведения, выполненные согласно нормативной документации, могли зачастую содержать ошибки при градации территорий по климатической нагрузке. Вследствие этого эксплуатация и эффективность иловых площадок могла значительно снижаться, что могло стать причиной их захламления и последующей трансформации в объекты накопленного экологического вреда [Dregulo, Vitkovskaya, 2018; Dregulo et al., 2019].

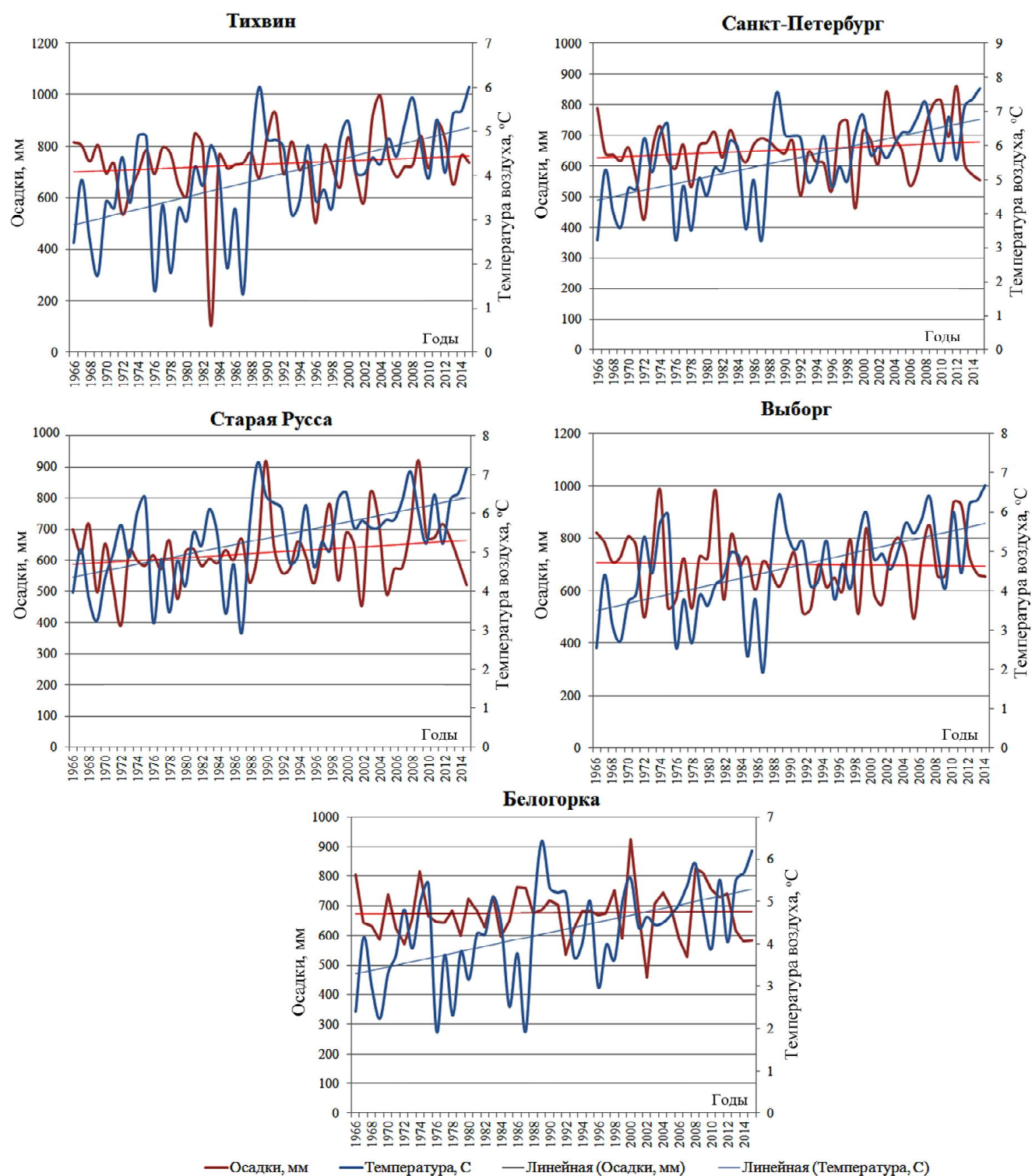


Рис. 6. Динамика среднегодовых атмосферных осадков и температуры воздуха в Санкт-Петербурге и Ленинградской области за 1966–2012 гг.

Fig. 6. Dynamics of average annual precipitation and air temperature in Saint Petersburg and the Leningrad region during 1966–2012

Благодарности. Автор выражает благодарность старшему научному сотруднику НИЦЭБ РАН, канд. техн. н. Петухову В.В. за оказанную помощь в обработке климатических данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Воронов Ю.В., Яковлев С.В. Водоотведение и очистка сточных вод / Учебник для вузов. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. 704 с.
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М.: Росгидромет, 2014. 61 с.
- Григорьев А.А., Кондратьев К.Я. Природные и антропогенные экологические катастрофы. Классификация и основные характеристики // Исследование Земли из космоса. 2010. № 2. С. 72.
- Дрегало А.М., Кулибаба В.В., Гильдеева И.М. Иловые площадки как специфические объекты прошлого экологического ущерба (в частном бассейне Финского залива) // Общество. Среда. Развитие. 2016. № 3. С. 115–119.
- Дроздов О.А. О свойствах интегрально-разностных кривых // Труды Главной геофизической обсерватории. 1962. Вып. 162. С. 3–6.
- Евилевич А.З. К расчету иловых карт // Водоснабжение и санитарная техника. 1957. № 10. С. 30–32.
- Золина О.Г., Булыгина О.Н. Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. Т. 1. С. 84–103.
- Матвеева Т.А., Гуцина Д.Ю., Золина О.Г. Крупномасштабные индикаторы экстремальных осадков в прибрежных природно-экономических зонах европейской территории России // Метеорология и гидрология. 2015. № 11. С. 20–32.
- Чернокульский А.В., Козлов Ф.А., Золина О.Г., Булыгина О.Н., Семенов В.А. Климатология осадков разного генезиса в северной Евразии // Метеорология и гидрология. 2018. № 7. С. 5–18.
- Curriero F.C., Patz J.A., Rose J.B., Lele S. The association between extreme precipitation and waterborne disease outbreaks in the United States, 1948–1994. *American journal of public health*, 2001, vol. 91(8), p. 1194–1199.
- Dregulo A.M., Kudryavtsev A.V. Transformation of technonatural systems of water treatment to objects of past environmental damage: peculiarities of the legal and regulatory framework. *Water and Ecology*, 2018, no. 3(75), p. 54–62. DOI: 10.23968/2305-3488.2018.20.3.54-62.
- Dregulo A.M., Vitkovskaya R.F. Microbiological evaluation of soils of sites with accumulated ecological damage (Sewage Dumps). *Fiber Chemistry*, 2018, vol. 50, iss. 3, p. 243–247. DOI: 10.1007/s10692-018-9965-4.
- Dregulo A.M. Identification and prediction of climatic loads for design and operation of drying beds. *Water and Ecology*, 2019, vol. 24, iss. 1, p. 35–43. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.1.35-43.
- Dregulo A.M., Pitulko V.M., Rodionov V.Z., Kulibaba V.V., Petukhov V.V. Geoecological evaluation of environmental damage to the results of long-term dynamics of benzopyrene and petroleum within landfill sludge. 2 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. T. 321. 2019. 012003. DOI: 10.1088/1755-1315/321/1/012037.
- Электронные ресурсы*
- Изменение климата. Федеральная служба государственной статистики. URL: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/environment/# (дата обращения 29.10.2018).
- «Климат России»: научно-прикладной справочник. URL: <http://aisori.meteo.ru/Clspr> (дата обращения 20.04.2019).
- О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2014 году. Государственный доклад. URL: <http://www.ecogsdoklad.ru/> (дата обращения 20.04.2019).
- СП 32.13330.2012. Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85 (с Изменением № 1). Дата введения 2013-01-01. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200094155> (дата обращения 20.04.2019).

Поступила в редакцию 22.08.2019

После доработки 16.05.2020

Принята к публикации 06.08.2020

A.M. Dregulo^{1,2}

INFLUENCE OF CLIMATIC FACTORS ON THE OPERATION OF NATURAL-TECHNICAL SYSTEMS FOR THE SEWAGE SLUDGE TREATMENT 120

The prospects of the use of solar energy, which helps to reduce capital costs for the treatment of sewage sludge under natural conditions, provides leadership in the selection of natural-technical systems for the treatment sewage sludge – drying beds (sewage dumps). A distinctive feature of the functioning of drying beds is the direct dependence of the operating mode on the climate load (μ), i. e. the combined influence of average annual air temperature and precipitation. The dynamics of μ was studied for drying beds located within the territory of the Leningrad region. The paper analyzes the regulatory requirements and recommendations for the operation of drying beds that «migrate» from one version of regulatory documents to another. The main standard criteria of climate load (μ) do not match the actual influence of average annual air temperature and precipitation as basic parameters of the operation of natural-technical waste treatment systems. It was found that the average annual amount of precipitation exceeded the established norms by 1 to 3 steps, while the range of average annual air temperatures of the entire chronological series corresponded to the standard step of ranking. The influence of atmospheric precipitation changed the value of μ and its territorial specifics. The results of the study allow for the conclusion that the increasing precipitation could contribute to the loss of operational and environmental protection properties of the natural-technical sewage sludge treatment systems designed and operated in accordance with the regulatory requirements.

¹ St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Researcher, PhD in Biology; e-mail: a.dregulo@spbu.ru

² Scientific Research Center for Ecological Safety of the Russian Academy of Sciences, Laboratory for Geoecological Problems of Natural and Economic Systems and Urbanized Territories, Senior Scientific Researcher

Key words: drying beds, sewage sludge, climate impact, standards, environmental damage

Acknowledgements. The author is grateful to V.V. Petukhov, PhD in Geography, Senior Scientific Researcher of the Scientific Research Center for Ecological Safety of the Russian Academy of Sciences, for the assistance in climatic data analysis.

REFERENCES

- Chernokulsky A.V., Kozlov F.A., Zolina O.G., Bulygina O.N., Semenov V.A. Klimatologiya osadkov raznogo genezisa v severnoj Evrazii [Climatology of Precipitation of Different Genesis in Northern Eurasia]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2018, no. 7, pp. 5–18. (In Russian)
- Curriero F.C., Patz J.A., Rose J.B., Lele S. The association between extreme precipitation and waterborne disease outbreaks in the United States, 1948–1994. *American journal of public health*, 2001, no. 91(8), pp. 1194–1199.
- Dregulo A.M., Kudryavtsev A.V. Transformation of technonatural systems of water treatment to objects of past environmental damage: peculiarities of the legal and regulatory framework. *Water and Ecology*, 2018, no. 3(75). pp. 54–62. DOI: 10.23968/2305-3488.2018.20.3.54–62.
- Dregulo A.M., Vitkovskaya R.F. Microbiological evaluation of soils of sites with accumulated ecological damage (Sewage Dumps) *Fiber Chemistry*, 2018, vol. 50, iss. 3, pp. 243–247. DOI: 10.1007/s10692-018-9965-4.
- Dregulo A.M. Identification and prediction of climatic loads for design and operation of drying beds. *Water and Ecology*, 2019a, no. 24(1), pp. 35–43. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.1. 35–43.
- Dregulo A.M., Kulibaba V.V., Gil'deeva I.M. Ilovye ploshhadki kak specificheskie objekty proshlogo jekologicheskogo ushherba (v chastnom bassejne Finskogo zaliva) [The Sludge Landfill as Specifically Object of Past Environmental Damage (in the Gulf of Finland)]. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie*, 2016, no. 3, pp. 115–119. (In Russian)
- Dregulo A.M., Pitulko V.M., Rodionov V.Z., Kulibaba V.V., Petukhov V.V. Geoecological evaluation of environmental damage to the results of long-term dynamics of benzopyrene and petroleum within landfill sludge. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 321, 012037. DOI: 10.1088/1755-1315/321/1/0120.
- Drozdov O.A. O svoystvakh integral'no-raznostnykh krivykh [On the properties of integrated difference curves]. *Trudy Glavnoj geofizicheskoy observatorii*, 1964, no. 62, pp. 3–6. (In Russian)
- Zolina O.G., Bulygina O.N. Sovremennaja klimaticheskaja izmenchivost' harakteristik jekstremal'nykh osadkov v Rossii [Current climatic variability of extreme precipitation in Russia]. *Fundamental and Applied Climatology*, 2016, vol. 1, pp. 84–103. (In Russian)
- Web sources*
- Izmenenie klimata. Federal'naja sluzhba gosudarstvennoj statistiki, URL: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/environment/# (access date 29.10.2018).
- KLIMAT-ROSSII. Nauchno-prikladnoj spravochnik, URL: <http://aisori.meteo.ru/Clspr>.
- O sostojanii i ob ohrane okruzhajushhej sredy Rossijskoj Federacii v 2014 godu. Gosudarstvennyj doklad, URL: <http://www.ecogodoklad.ru/> (access date 20.04.2019).
- SP 32.13330.2012 Kanalizacija. Naruzhnye seti i sooruzhenija. Aktualizirovannaja redakcija SNiP 2.04.03-85 (s izmenenijem no. 1) Data vvedenija 2013-01-01, URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200094155> (access date 20.04.2019).

Received 22.08.2019

Revised 16.05.2020

Accepted 06.08.2020

ДИНАМИКА ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

УДК 556.537-911.2

А.А. Куракова¹, Р.С. Чалов²

МОРФОЛОГИЯ РУСЛА И РАЗМЫВЫ БЕРЕГОВ НИЖНЕЙ ОБИ (В ПРЕДЕЛАХ ХМАО-ЮГРЫ)

Размывы берегов рек – одна из наиболее опасных форм проявления русловых процессов. Создавая угрозу разрушения объектов жилищной и хозяйственной инфраструктуры на берегах, они оказывают существенное влияние на русловой режим рек, сопровождаются изменениями форм русла, их параметров, структуры и гидравлики потока. Однако размывы берегов и их связь с морфодинамикой русел остаются слабо изученными. В статье дается общая характеристика размывов берегов нижней Оби при относительной однородности их литологического песчано-суглинистого строения на всем протяжении реки с разветвленным руслом в условиях рассредоточения стока воды по многочисленным рукавам и пойменным протокам. Используя данные сопоставления разновременных космических снимков с помощью ГИС-технологий, были получены величины скоростей и протяженности фронта размыва берегов, определены основные параметры рукавов одиночных разветвлений, излучин и русловых (островных) разветвлений рукавов раздвоенного русла – основных типов русла нижней Оби. В рукавах одиночных разветвлений, образующих пологие излучины возле островов, скорости размыва берегов меньше, чем на более крутых излучинах рукавов других типов разветвлений, и определяются местными условиями. Большим радиусам кривизны и шагам излучин или одиночных разветвлений соответствует удлинение фронта и снижение темпов размыва берегов. Установлено, что увеличение расхода воды и рассредоточение стока воды по рукавам и пойменным протокам (ответвлениям) в половодье приводит к активизации размывов берегов на излучинах рукавов раздвоенного русла и в рукавах одиночных разветвлений. При прочих равных условиях в рукавах большей водности интенсивность размыва берегов выше.

Ключевые слова: русловые процессы, излучины, разветвления, раздвоенное русло, фронт размыва

Введение. Река Обь – одна из крупнейших рек России, имеющая важное транспортное и водохозяйственное значение. Свободные условия формирования русла в однородных легкоразмываемых песчано-суглинистых отложениях на нижней Оби способствуют интенсивным размывам берегов и активному развитию русловых деформаций. Это создает риск разрушения объектов, находящихся на приречных территориях.

Размывы берегов – одно из наиболее опасных проявлений русловых процессов – обусловлены гидрологическим и русловым режимами рек. Большое значение имеют морфодинамические типы русла, его извилистость или разветвленность на рукава, рассредоточение стока по рукавам и пойменным протокам, определяющее мощность и структуру потока, воздействующего на берега и вызывающего их размыв, развитие прирусловых отмелей (побочной и осередков), излучин русла и изгибов рукавов возле островов и т. д. [Чалов, 2019; Knighton, 1998; Schumm, 1977; Hemmelder, 2018]. Однако именно формам русла и их параметрам обычно не уделяется должного внимания при оценке размывов берегов, хотя именно они определяют структуру

потока, воздействующего на берега. Так, Г.Я. Эберхардс [1986], дав детальную характеристику перестроений берегов малых рек Прибалтики, типизировал их по различиям в геологическом строении размываемых берегов и показал специфику отступания в разные фазы водного режима. Е.В. Камалова [1988] связала интенсивность разрушения берегов при их размыве и спровоцированных ими оползаний и обрушений блоков пород на реках центра ЕТР с различной водоносностью (выделены шесть категорий рек по среднегодовым расходам от <50 до >1000 м³/с), но также без учета параметров излучин. Все исследованные реки свободно меандрировали, но параметры излучин при этом не учитывались. На больших реках, к которым относится Обь, размывам берегов уделяется еще меньше внимания. На средней [Коркин, Исыпов, 2017; Петров, 1979; Чалов и др., 2012] и нижней Оби [Герасимова, 1959; Петров, 1979; Трепетцов, 1973] исследования касались лишь отдельных участков русла (в т. ч. на основе стационарных наблюдений), где размывы берегов представляют реальную угрозу. Но их результаты сводились обычно к общей характеристике процесса без увязки с

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, аспирант; e-mail: a.a.kurakova@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, профессор; научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, гл. науч. с., докт. геогр. н.; e-mail: rschalov@mail.ru

морфологией русла и динамикой потока. То же относится и к оценкам размывов берегов на других больших реках – Волге [Попов, 1963], Амуре [Махинов и др., 2001].

По существу, впервые исследование связей характеристик размывов берегов от параметров форм русла (излучин, разветвлений) было выполнено авторами [Куракова, Чалов, 2019] для широтного участка средней Оби (между устьями рек Ваха и Иртыша). Были получены зависимости средних и максимальных скоростей и протяженности фронта размыва берегов от морфологии русла. Было установлено, что главным фактором в размыве берегов на средней Оби является степень развитости излучин русла и рукавов русловых разветвлений. При этом литологический фактор здесь не сказывается, так как на всем протяжении реки пойма и низкие террасы, как и на нижней Оби, сложены легко размываемыми песчано-суглинистыми аллювиальными отложениями.

Задача настоящей статьи – впервые для нижней Оби (в пределах ХМАО-Югры) дать общий анализ распространения размываемых берегов поймы и низких террас, установит их связь с морфологическими параметрами форм русла, морфодинамическими типами русла, водностью и рассредоточением стока по рукавам и пойменным протокам (ответвлениям).

Объект, материалы и методы исследования. Главной особенностью нижней Оби является раздвоенное русло [Чалов, 2001, 2008]. Впервые оно

появляется на средней Оби выше г. Сургута (Юганская Обь, Большая Салымская протока и протока Неулева). На нижней Оби (от устья р. Иртыша до с. Перегребного) русло сначала представляет собой практически единый морфологически однородный участок, расположенный вдоль коренного берега – Белогорского материка – и представляющий одиночные разветвления, чередующиеся с прямолинейным неразветвленным руслом. Ниже с. Перегребного река меняет направление течения с северо-западного на северное и разделяется на два практически равноценных рукава – Малую и Горную Обь. Они образуют сложную систему раздвоенного русла, рукава которого сами имеют раздвоенное русло и связаны между собой и р. Северной Сосьвой, левым притоком Оби, протекающим в тыловой части поймы (рис. 1). В результате водность основных рукавов снижается до 12–15% от общего расхода воды в реке в половодье. Это сказывается на русловых деформациях и на условиях размыва берегов. Нижняя Обь при любом типе русла отличается развитой пойменной многорукавностью, расчленяющей широкую пойму и увеличивающей рассредоточение стока воды. Наиболее крупные протоки, соединяющие с Северной Сосьвой, – Лапоровская, Пырсим, а рукава – протока Вайсова и поперечная протока Большой Нюрик, забирающая 41% от суммарного стока Малой Оби, благодаря чему ниже по течению более полноводным рукавом раздвоенного русла нижней Оби становится правый – Большая Обь.

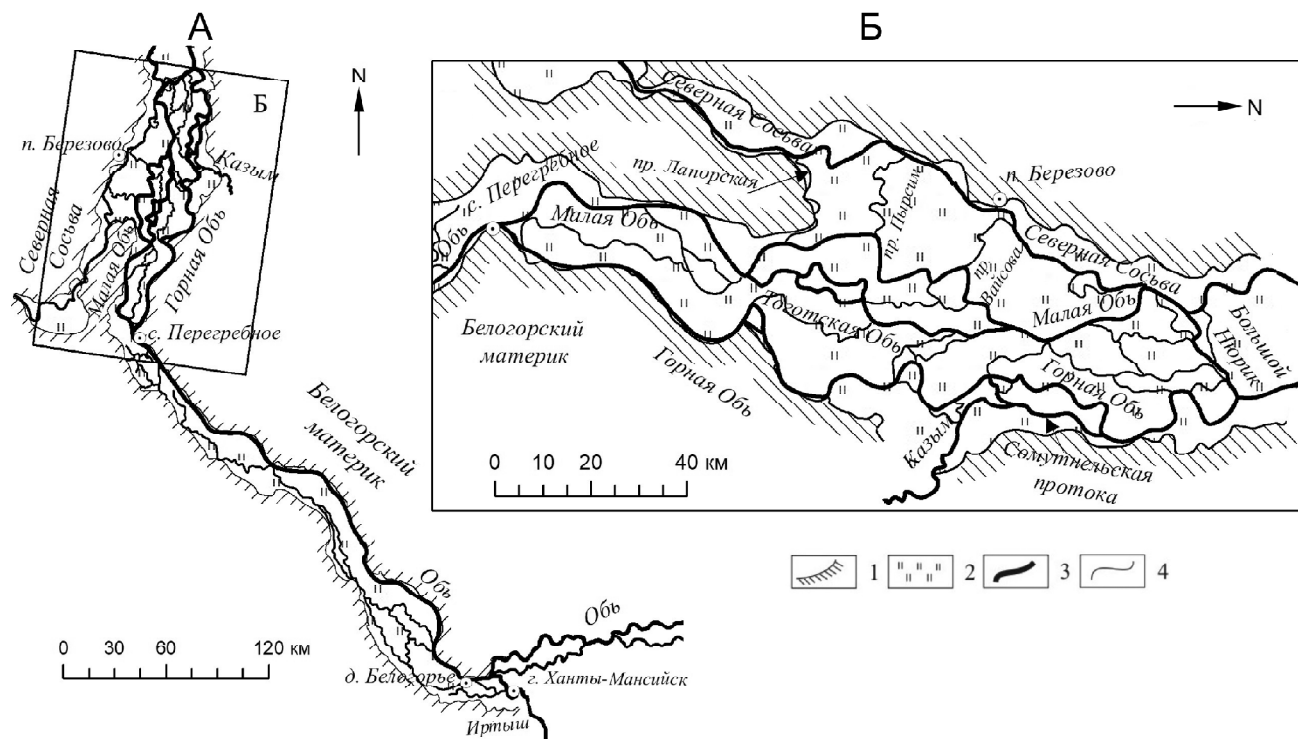


Рис. 1. Нижняя Обь в пределах ХМАО-Югры. А – от устья р. Иртыша до протоки Большой Нюрик; Б – раздвоенное русло: 1 – коренные берега; 2 – пойма; 3 – русло Оби и рукавов раздвоенного русла р. Северной Сосьвы; 4 – наиболее крупные пойменные протоки

Fig. 1. The Lower Ob River (within the KhMAO–Yugra autonomous district). A – from the mouth of the Irtysh river to the Bolshoi Nyurik channel; Б – difurcated channel: 1 – valley sides; 2 – floodplain; 3 – the channel of the Ob River and the branches of the Severnaya Sosva River bifurcation; 4 – the largest floodplain channels

Участок Оби ниже р. Иртыша до раздвоения русла и Горная Обь находятся под влиянием правого коренного берега. Левобережная пойма луговая или закустаренная, с болотами, старичными озерами и пойменными протоками, определяющими течение потока [Камышев и др., 2017]. При впадении в Горную Обь правого притока (р. Казым) появляется правобережная пойма. Ширина поймы колеблется от 20–25 до 40–45 м; ниже Лапоровской протоки, соединяющей Обь с Северной Сосьвой, она расширяется до 60 км. Сток воды с затопленной поймы в русло (по данным измерений в половодье 2019 г.) колебался от 500 до 1700 м³/с.

Среднемноголетний расход воды Оби у д. Белогорье (ниже слияния с р. Иртышом) составляет 10 200 м³/с, у г. Салехарда – 12 800 м³/с; среднемаксимальный – 28 200 и 36 700 м³/с, соответственно. Во время русловых исследований на нижней Оби в июне 2019 г. выше с. Перегребного расход воды в русле в половодье достигал 24 020 м³/с (не считая отвлечения части стока в пределы затопленной поймы и в пойменные протоки). Это соответствует величине руслоформирующего расхода воды по г. п. Белогорье – 25 000 м³/с [Чалов, 1979].

Исследование размывов берегов на нижней Оби (от слияния с р. Иртышом до границы ХМАО–Югры и ЯНАО) было выполнено на основе сопоставления космических снимков серии «Sentinel-2», «Landsat 5 TM», «CORONA KH-4A» за два временных интервала 1969–1988 гг. и 2018 гг. Темпы многолетних смещений берегов русла оценивались традиционным методом сравнения положения береговых бровок за 30–50-летний период.

Показателями размывов берегов были приняты: средние скорости их отступления ($C_{\text{ср}}$, м/год), протяженность фронта размыва ($L_{\text{фр}}$, км) и отношение протяженности фронта размыва берега к длине береговой линии – относительная протяженность фронта размыва берега ($x_{\text{фр}}$) – в русловых разветвлениях единого русла Оби (устье р. Иртыша – с. Перегребное), и в рукавах раздвоенного русла – Малой и Горной Оби. Излучины рукавов раздвоенного русла и рукавов русловых разветвлений характеризовались степенью развитости (l/L), радиусом кривизны (r , км), шагом излучин ($L_{\text{изл}}$, км) и шагом разветвлений ($L_{\text{разв}}$, км). Последний определялся только для одиночных разветвлений; изгибы рукавов, огибающих острова, образуют излучины, имеющие аналогичное излучинам русла расположение зон размыва и аккумуляции наносов. Рукава пойменно-русловых разветвлений, встречающиеся дважды на Малой Оби, состоят из двух–пяти излучин или образуют вторичные разветвления [Чалов, 2017].

Результаты обработки спутниковых снимков были откорректированы и дополнены данными, полученными в ходе экспедиционных исследований на нижней Оби в июне 2019 г.³

Результаты и их обсуждение. По сравнению со средней Обью в нижнем течении разнообразие мор-

фодинамических типов русла (по [Чалов, 2008]) сравнительно меньше: единое русло (от устья р. Иртыша до с. Перегребного) – абсолютно преобладают одиночные разветвления, разделенные прямолинейными вставками, и короткий участок параллельно-рукавного разветвления. Рукава раздвоенного русла образуют излучины или серии излучин, часто осложненные островами у выпуклых берегов и на крыльях, прорванные излучины и, реже, одиночные разветвления. Наиболее распространены на нижней Оби одиночные разветвления с прямолинейными вставками (221 км, 28,4% длины) и свободные излучины в рукавах раздвоенного русла (общее количество – 31, 214 км, 27,5% длины русла); три прорванные излучины имеют суммарную протяженность 32,5 км (4,2%). На Малой Оби есть два участка пойменно-русловых разветвлений, образовавшихся вследствие размыва пойменной перемычки между основным рукавом раздвоенного русла и пойменными протоками, водность которых стала соизмеримой с Малой Обью, которые вместе с ней составляют рукава пойменно-руслового разветвления. У нескольких излучин в привершинной части радиус кривизны r равен или даже меньше ширины русла b_p , т. е. $r < b_p$. Такие излучины приурочены к узлам разделения Малой и Тоготской Оби или к истокам крупных пойменных проток (Нарыкарской и Лапоровской).

На излучинах рукавов раздвоенного русла и рукавов русловых разветвлений чередуются зоны ускорения и замедления течения, соответствующие на пологих и развитых излучинах расположению фронта размыва в верхнем крыле выпуклого берега и в нижнем крыле – вогнутого; аккумуляция наносов и формирование отмелей происходит, наоборот, у вогнутого – в верхнем крыле, а у выпуклого берега – в нижнем. У крутых излучин фронт размыва берега распространяется на вогнутые берега по всей привершинной части излучин. Расположение зон размыва берегов и аккумуляции наносов приводит к продольному или поперечному смещению излучин или узлов разветвления [Чалов и др., 2004; Куракова, Чалов, 2019].

В одиночных разветвлениях образуются изгибы рукавов с соответствующим излучинам полем скоростей течения и положением зон размыва и аккумуляции наносов. Распределение зон ускорения и замедления течения и циркуляционных течений обуславливают размывы оголовка острова и наращивание его в устье. Одновременно происходит размыв противоположных острову берегов в нижней части разветвления и аккумуляция наносов против оголовков островов [Чалов, 2017]. Исключения составляют одиночные разветвления, в которых у оголовков образующих их островов аккумулируются наносы, формируются отмели, а сами острова смещаются регрессивно.

Излучины рукавов в одиночных разветвлениях единого русла Оби, излучины рукавов раздвоенного, старого и нового русел в прорванных излучинах

³ В полевых исследованиях участвовали канд. геогр. н. А.С. Завадский, канд. геогр. н. С.Н. Рулева, аспирант А.А. Камышев.

и излуцинах рукавов одиночных разветвлений Малой, Горной и Тоготской Оби были разделены по степени развитости и типу русла, к которым они относятся (таблица).

В едином русле Оби все излуцины рукавов одиночных разветвлений являются пологими ($l/L=1,1\div1,4$).

На Малой Оби пологие излуцины ($l/L=1,1\div1,4$) преобладают в меандрирующем русле (73%), а также свойственны рукавам одиночных и пойменно-русловых разветвлений (9 и 18%, соответственно); развитые ($l/L=1,4\div1,7$) и крутые ($l/L=1,7\div2,0$) характерны только для меандрирующего русла.

На Горной Оби пологие излуцины ($l/L=1,1\div1,4$) меандрирующего русла составляют 66%, нового русла в прорванных излуцинах – 17%, рукавов одиночных разветвлений – 17%; развитые излуцины ($l/L=1,4\div1,7$) встречаются в меандрирующем русле (63%), новом (12%) и в старых (25%) руслах прорванных излуцин; крутые ($l/L=1,7\div2,0$) излуцины характерны только для меандрирующего русла, петлеобразные излуцины ($l/L>2,0$) – для старого русла прорванных излуцин.

В Тоготской Оби пологие излуцины ($l/L=1,1\div1,4$) встречаются как в меандрирующем русле (80%), так и в новом русле прорванных излуцин (20%); развитые излуцины ($l/L=1,4\div1,7$) характерны только для меандрирующего русла; крутые излуцины ($l/L>2,0$) представлены в основном рукаве раздвоенного русла и старого русла прорванной излуцины (50%).

Степень развитости излуцин вне зависимости от того, являются они самостоятельной формой русла (на нижней Оби – в рукавах раздвоенного русла или пойменно-русловых разветвлениях) или представляют собой излуцины рукавов, огибающих острова в одиночных разветвлениях, определяет скоростное поле потока, расположение и протяженность фронта размыва берегов и его интенсивность. Для оценки этого были использованы данные о средней скорости размыва берегов (C_{cp} , м/год) и степени развитости излуцин (l/L) (рис. 2А), подтвердившие выявленную ранее [Куракова, Чалов, 2019] закономерность как для средней, так и для нижней Оби: при увеличении степени развитости скорость размыва берегов возрастает. При этом точки на графике группируются в соответствии со степенью развитости излуцин: для развитых ($l/L=1,4\div1,7$), крутых ($l/L>1,7$) и пологих ($l/L=1,1\div1,4$) [Чалов и др., 2004]. Для последних, у которых дифференциация поля скорости потока и циркуляционные течения слабо выражены, она проявляется либо по верхней огибающей поля точек ($C_{cp}=11,0/l/L-6,19$), либо прослеживается по группам точек, объединяющихся местными причинами формирования излуцин и разветвлений.

Группа точек I (см. рис. 2А) соответствует излуцинам со степенью развитости больше $l/L>1,7$, которые свойственны преимущественно рукавам пойменно-русловых и сложных трехрукавных разветвлений средней Оби, а также излуцинам меанд-

Таблица

Встречаемость излуцин разной степени развитости в рукавах одиночных разветвлений, рукавах раздвоенного русла, пойменно-русловых разветвлений и прорванных излуцин единого русла Оби от устья р. Иртыша до с. Перегребного, Малой, Горной и Тоготской Оби

Обь, рукава раздвоенного русла	Тип русла [Чалов, 2017]	Степень развитости излуцин, % [Чалов и др., 2004]			
		пологие ($l/L=1,1\div1,4$)	развитые ($l/L=1,4\div1,7$)	крутые ($l/L>1,7$)	петлеобразные ($l/L>2,0$)
Обь от устья р. Иртыша до с. Перегребное (единое русло)	Излуцины рукавов одиночных разветвлений	100	–	–	–
Малая Обь	Излуцины русла	73	100	100	–
	Излуцины рукавов одиночных разветвлений	9	–	–	–
	Излуцины рукавов пойменно-русловых разветвлений	18	–	–	–
Итого		100	100	100	–
Горная Обь	Излуцины русла	66	63	–	–
	Излуцины старого русла в прорванных излуцинах	–	25	–	100
	Излуцины нового русла в прорванных излуцинах	17	12	–	–
	Излуцины одиночных разветвлений	17	–	–	–
Итого		100	100	–	100
Тоготская Обь	Излуцины русла	80	100	–	50
	Излуцины старого русла в прорванных излуцинах	–	–	–	50
	Излуцины нового русла в прорванных излуцинах	20	–	–	–
Итого		100	100	–	100

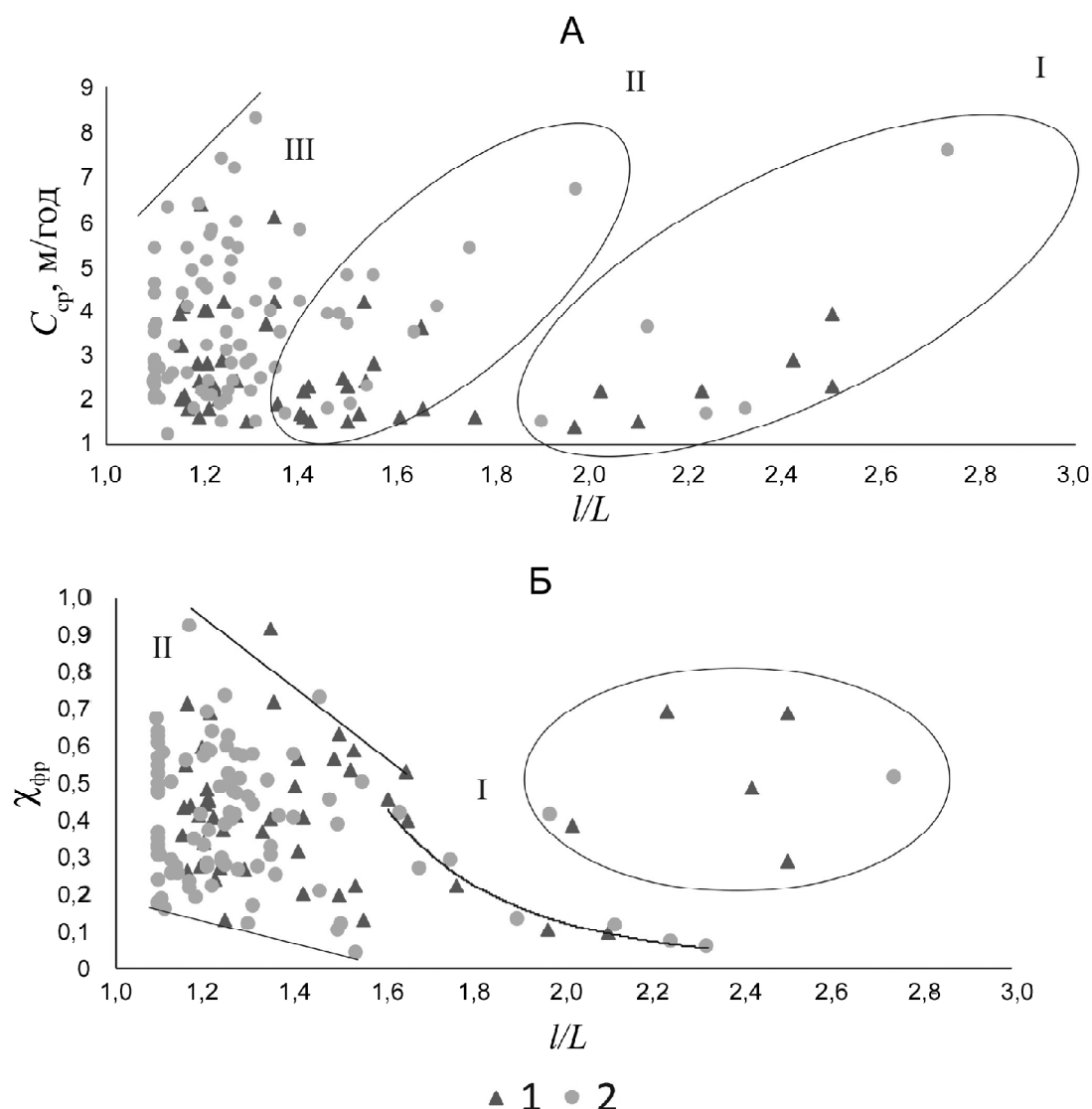


Рис. 2. Зависимость средней скорости ($C_{ср}$, м/год) размыва берегов (А) и отношения протяженности фронта размыва берегов к суммарной длине береговой линии ($\chi_{фр}$) (Б) от степени развитости (l/L) излучин рукавов русловых (островных) разветвлений, основных рукавов раздвоенного русла для нижней (1) и средней (2) Оби. Излучины: I – крутые и петлеобразные; II – развитые; III – пологие

Fig. 2. Dependence of the average rates ($C_{ср}$, m/year) of river banks erosion (A) and the ratio of the length of bank erosion front to the total length of the banks ($\chi_{фр}$) (B) on the degree of meander development (l/L) of the meandering channel, branching channel and bifurcated channel for the Lower (1) and Middle (2) Ob River. Meanders: I – sharp and looplike; II – developed; III – flat

рирующего русла Малой и Тоготской Оби и старых русел прорванных излучин Горной и Тоготской Оби. Их описывает уравнение $C_{ср} = 0,21l/L + 1,77$. В группу II входят развитые излучины ($l/L = 1,4 \div 1,7$) рукавов пойменно-русловых и сложных трехрукавных разветвлений средней Оби, свободные и прорванные излучины рукавов раздвоенного русла нижней Оби ($C_{ср} = 11,4/l/L + 15,4$). Самая многочисленная группа III объединяет пологие ($l/L < 1,4$) излучины рукавов раздвоенного русла и русловых, в основном одиночных, разветвлений средней и нижней Оби. Из-за слабого развития циркуляционных течений и дифференциации скоростного поля, точки, соответствующие этим излучинам, расположены хаотично. Определяющими факторами размыва берегов могут быть наличие побочной и осередков, ответвление

или слияние с пойменными протоками, взаимодействие руслового и пойменного потоков (слив воды с поймы или выход воды на пойму), сопряжение излучин со смежной формой русла и т. д., т. е. условия, определяющие местные воздействия на структуру потока.

Полученные зависимости скорости размыва (отступления) берегов на излучинах с разной степенью развитости (l/L) отражают изменения в форме их развития при переходе от пологих излучин к развитым и от развитых к крутым, от продольного смещения к продольно-поперечным и поперечным.

Связь степени развитости излучин (l/L) и относительной протяженности фронта размыва берега ($\chi_{фр}$), выявленная на средней Оби [Куракова, Чалов, 2019], подтвердилась на нижней Оби (рис. 2Б). При увели-

чении степени развитости излучин происходит удлинение как излучин, так и береговой линии; длина фронта размыва берегов при этом увеличивается медленнее, что определяет обратную зависимость между параметрами. Для разветвлений развитие излучин более многоводного (на нижней Оби – судоходного) рукава неизбежно приводит к перераспределению стока, что соответствует снижению интенсивности деформации и, соответственно, размыва берегов. На графике точки группируются в зависимости от степени развитости излучин: $L/L < 1,6$ (I) и $L/L > 1,6$ (II). Группа I описывается уравнением $x_{\text{фр}} = 6,37/L^{-5,7}$ и включает развитые и крутые излучины. Зависимость для группы II описывается верхней ($x_{\text{фр}} = -0,93/L + 2,07$) и нижней ($x_{\text{фр}} = -0,33/L + 0,55$) огибающими хаотично расположенных точек, соответствующих пологим излучинам.

На графике отдельно выделяется группа точек, соответствующих петлеобразным излучинам в сложном трехрукавном разветвлении на широтном участке средней Оби, а также несколькими свободным и прорванными излучинами Горной и Тоготской Оби. У петлеобразных излучин протяженность фронта размыва берегов связана с их формой, которая представляет собой комбинацию трех сегментных излучин, две из которых сформировались на ее крыльях и одна (средняя) наследует привершинную часть исходной. Это, по-видимому, приводит к удлинению фронта размыва в пределах излучины при увеличении L/L .

Важным морфологическим показателем является радиус кривизны излучины русла или излучин рукавов, огибающих острова (рис. 3А, Б). Поскольку

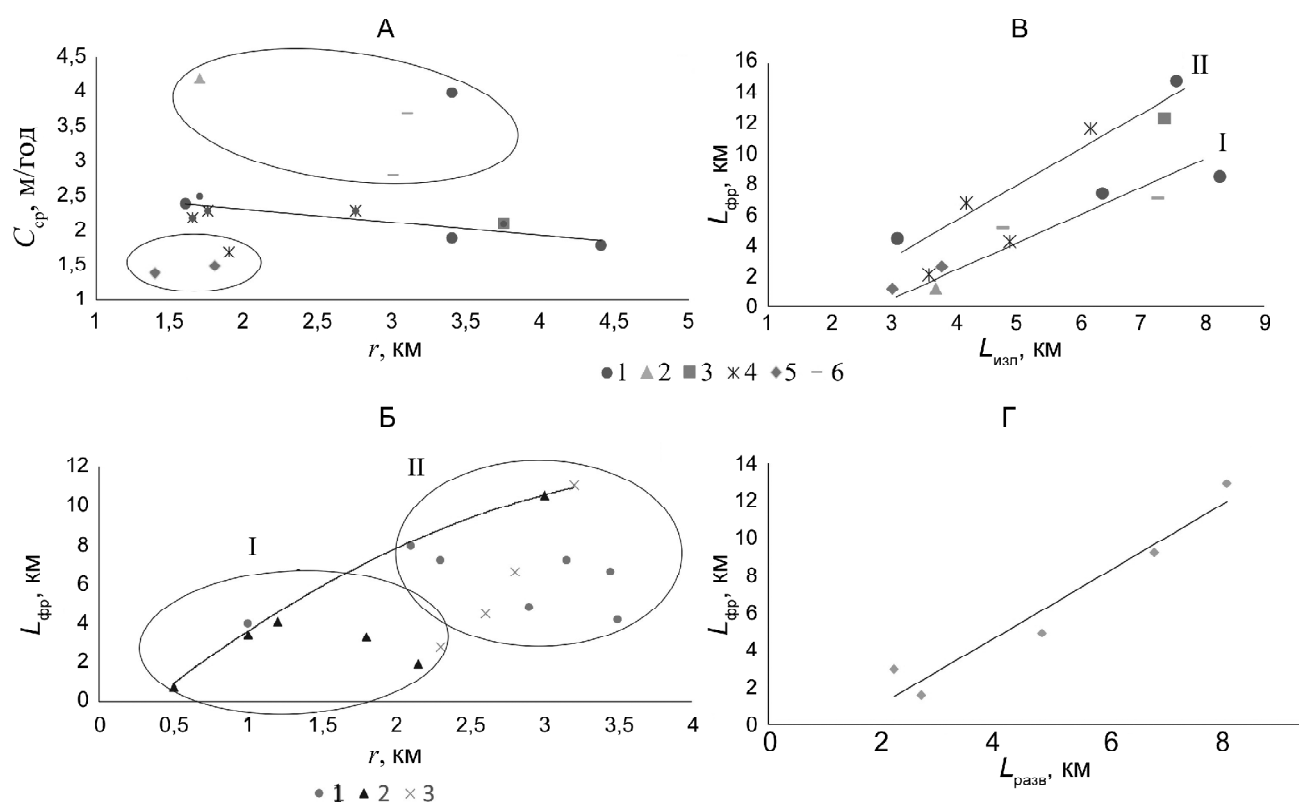


Рис. 3. Зависимость средней скорости ($C_{\text{ср}}$, м/год) размыва берегов на Малой Оби (А), протяженности фронта размыва берегов ($L_{\text{фр}}$, км) на Горной Оби (Б) от радиуса кривизны (r , км) излучин основных рукавов раздвоенного русла и рукавов русловых разветвлений; фронта размыва берегов ($L_{\text{фр}}$, км) на Малой Оби (В) и единого русла Оби (Г) от шага излучины или разветвления ($L_{\text{изл}}$ и $L_{\text{разв}}$, км). А, В – Малая Обь: 1 – до истока Тоготской Оби, 2 – от истока Тоготской Оби до истока Лапорской протоки, 3 – от истока Лапорской протоки до истока протоки Пырсим, 4 – от истока протоки Пырсим до истока протоки Вайсовой, 5 – от истока протоки Вайсовой до устья Тоготской Оби, 6 – от устья Тоготской Оби до истока протоки Большой Нюрик; В – Малая Обь: I – пологие излучин ($L/L=1,1\div1,4$), II – развитые и крутые излучины ($L/L>1,4$); Б – Горная Обь: I – раздвоенное русло, II – единое русло; 1 – до истока правого рукава раздвоенного русла, 2 – русло от истока правого рукава раздвоенного русла до устья Сомутнельской протоки, 3 – русло ниже устья Сомутнельской протоки

Fig. 3. Dependence of the average rates ($C_{\text{ср}}$, m/year) of river banks erosion for the Malaya Ob River (А), the length of bank erosion front ($L_{\text{фр}}$, km) for the Gornaya Ob River (Б) on the curvature (r , km) of the branching channel and bifurcated channel; dependence of the length of bank erosion front ($L_{\text{фр}}$, km) for the Malaya Ob River (В) and the joint Ob River channel (Г) on the wavelength of meander or branching channel ($L_{\text{изл}}$ и $L_{\text{разв}}$, km). А, В – the Malaya Ob River: 1 – upstream the Togotskaya Ob source, 2 – from the source of the Togotskaya Ob to the source of the Laporskaya channel, 3 – from the source of the Laporskaya channel to the source of the Pysim channel, 4 – from the source of the Pysim channel to the source of the Vajsovaya channel, 5 – from the source of the Vajsovaya channel to the Togotskaya Ob mouth, 6 – from the Togotskaya Ob mouth to the source of the Bol'shoj Nyurik channel. В – the Malaya Ob River: I – flat meanders ($L/L=1,1\div1,4$), II – sharp meanders ($L/L>1,4$). Б – the Gornaya Ob River: I – bifurcated channel, II – joint channel. 1 – upstream the source of the right branch of bifurcated channel, 2 – from the right branch of bifurcated channel to the Somutnenskaya channel mouth, 3 – downstream the Somutnenskaya channel mouth

ку данный параметр не является безразмерным, его анализ проводился по участкам с одинаковой водностью, т. е. $k=f(Q)$. Для Малой Оби (см. рис. 3А) при большом радиусе кривизны (излучины более пологие) средняя скорость размыва берегов снижается, так как происходит ослабление поперечной циркуляции, скорости потока выравниваются по ширине русла [Куракова, Чалов, 2019]; связь описывается линейным уравнением $C_{cp} = -0,18r + 2,68$. Отдельно расположились точки выше и ниже зависимости. Первая объединяет пологие излучины русла ($l/L < 1,4$), вторая – излучины русла в местах ответвления пойменных проток (Пырсим и Вайсова). Последняя, забирая 67% стока Малой Оби, является элементом раздвоенного русла этого рукава, соединяющего ее с р. Северной Сосьвой.

Снижение темпов размыва берегов при увеличении радиусов кривизны русла происходит при увеличении протяженности фронта размыва берегов, что объясняется обратной зависимостью радиуса r от степени развитости излучины – $r \sim (l/L)^{-n}$ [Чалов, 2008]. На Горной Оби (см. рис. 3Б) верхняя огибающая описывает поле точек уравнением $L_{фр} = 0,01r^2 + 0,1r + 0,42$. При этом все точки разделились на две группы: I – излучины раздвоенного русла Горной Оби (после отвлечения 42% в Сомутнельскую протоку); II – излучины, расположенные выше и ниже раздвоенного русла, где Горная Обь представляет единое русло.

Длина фронта размыва берегов возрастает с увеличением шага излучин на Малой Оби (см. рис. 3В) или шага в одиночных разветвлениях единого русла Оби. Зависимость описывается линейным уравнением $L_{фр} = \alpha L_{изл} + \beta$, в котором коэффициент α и свободный член β зависят от степени развитости излучин, снижаясь от пологих к развитым и крутым излучинам; при одном и том же шаге излучин (или разветвлений, рукава которых, огибая остров, образуют излучины) фронт размыва у пологих излучин короче, чем у развитых и крутых. I группа включает преимущественно пологие излучины ($l/L = 1,1 \times 1,4$), $\alpha = 0,63$, $\beta = 2,3$; II группа объединяет в основном развитые и крутые излучины ($l/L > 1,4$), у которых $\alpha = 0,46$, $\beta = 1,15$.

Аналогичная зависимость, описываемая линейным уравнением $L_{фр} = 1,4L_{разв} - 2,43$, справедлива для одиночных разветвлений единого русла Оби (см. рис. 3Г) выше его разделения на Малую и Горную Обь. Разветвления образованы в основном элементарными островами (на основе одного осередка при его зарастании) или объединением двух-трех небольших элементарных островов. Самые большие значения шага и протяженности фронта размыва характерны для разветвления у больших островов, представляющего собой «конгломерат» из 8–10 объединившихся элементарных островов [Голубцов, Чалов, 2017]. Графики зависимости скорости размыва берегов (C_{cp} , м/год) от водности рукавов одиночных разветвлений единого русла Оби выше с. Перегребного (рис. 4А) и Малой Оби на ее разных участках (рис. 4Б) показали, что чем боль-

ше расход воды в рукавах во время половодья, тем интенсивнее отступление берега: $C_{cp} = \alpha Q_{пол} + \beta$, где для единого русла Оби выше с. Перегребного $\alpha = 0,0004$, $\beta = -0,36$, для Малой Оби – $\alpha = 0,0002$, $\beta = 1,26$.

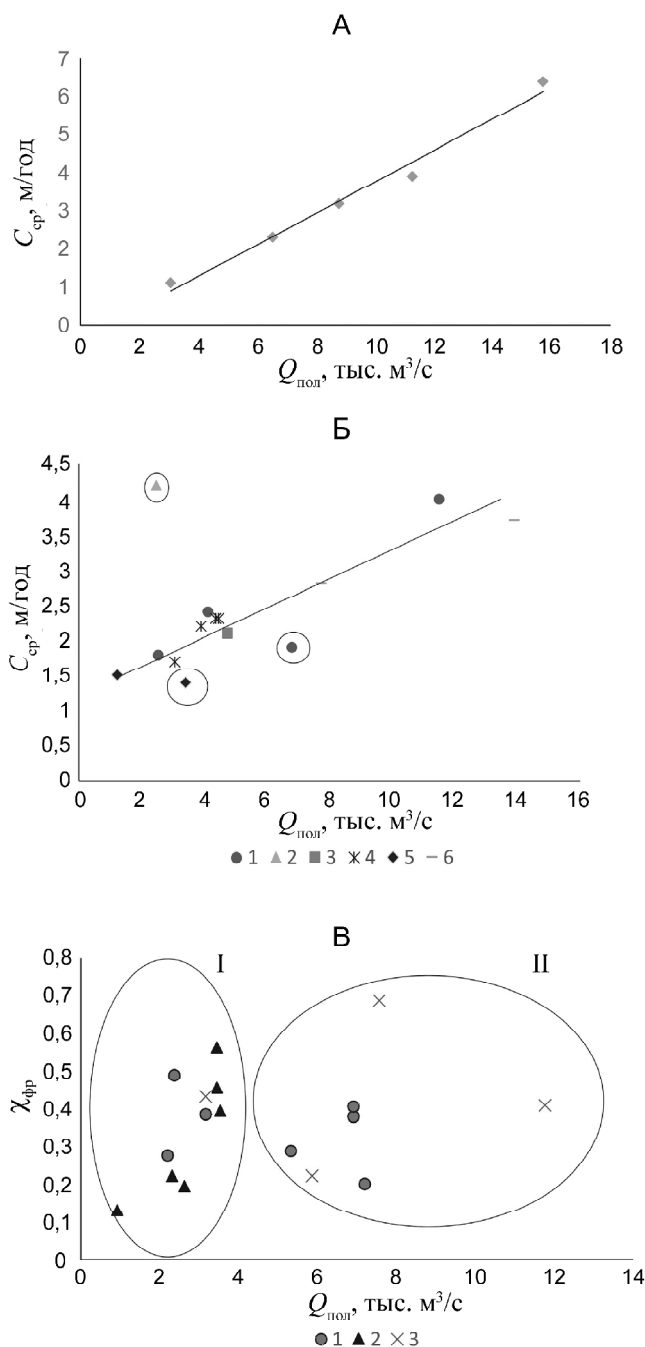


Рис. 4. Зависимость средней скорости размыва берегов (C_{cp} , м/год) в одиночных разветвлениях единого русла Оби (А) и на Малой Оби (Б) и относительной протяженности фронта размыва берегов к суммарной длине береговой линии ($x_{фр}$) на Горной Оби (В) от расхода воды в половодье ($Q_{пол}$, м³/с). Малая Обь (Б) – см. условные обозначения к рис. 3А, Горная Обь (В) – к рис. 3Б

Fig. 4. Dependence of the average rates (C_{cp} , m/year) of river banks erosion for the joint Ob River channel (А), and the Malaya Ob River (Б) and the ratio of the length of bank erosion front to the total length of the banks ($x_{фр}$) for the Gornaya Ob River (В) on high water discharge (Q_{h} , m³/s). The Malaya Ob River (Б) – see legend to Fig. 3А, the Gornaya Ob River (В) – see legend to Fig. 3Б

На графике для Малой Оби (см. рис. 4Б) вне общей зависимости расположились точки, соответствующие пойменно-русовым разветвлениям, забирающим значительную часть стока, и участку, где отходит протока Вайсова, в которую уходит большая часть общего расхода воды рукава.

Связь отношения протяженности фронта размыва берегов к суммарной длине береговой линии ($x_{\text{фр}}$) и расходу воды в половодье на Горной Оби (см. рис. 4В) позволяет разделить все точки на две группы, соответствующие полученным для зависимости $L_{\text{фр}} = f(r)$ (см. рис. 3Б).

Выводы:

– на нижней Оби в однородных геолого-геоморфологических условиях формирования русла размывы берегов являются повсеместным явлением, создавая опасность при освоении территории и водных ресурсов. Поступающие в русло реки наносы, аккумулируясь ниже по течению, создают, наряду с рассредоточением стока по рукавам, дополнительные затруднения для судоходства;

– интенсивность размыва берегов и протяженность фронта размыва на нижней Оби зависят от извилистости рукавов раздвоенного русла и рукавов русловых разветвлений. Для выделенных морфодинамических типов русла нижней Оби характерно наличие излучин как самостоятельных форм русла – рукавов раздвоенного русла, одиночных разветвлений, эквивалентных излучинам русла, либо серии излучин рукавов пойменно-русовых развет-

влений и рукавов прорванных излучин. Параметры излучин рукавов раздвоенного русла или русловых разветвлений определяют структуру скоростного поля потока и циркуляционные течения, влияют на темпы размыва и длину его фронта;

– интенсивность размыва берегов возрастает с увеличением степени развитости и снижения радиусов кривизны излучин рукавов раздвоенного русла или рукавов русловых разветвлений при одновременном сокращении длины фронта размыва. На пологих излучинах, образованных основными рукавами одиночных разветвлений единого русла Оби, наоборот, отмечается снижение скорости размыва берегов и увеличение протяженности размываемого берега. С ростом шага излучин русла Малой Оби или излучин рукавов ее русловых разветвлений и шага одиночных разветвлений единой Оби прослеживается удлинение фронта размыва берегов;

– раздвоение как Оби на самостоятельные рукава, так и рукавов раздвоенного русла – Малой и Горной Оби, приводит к кардинальному рассредоточению стока воды и сказывается на интенсивности размыва берегов. Увеличение водности рукавов раздвоенного русла, рукавов русловых и одиночных разветвлений, старых и новых русел прорванных излучин приводит к активизации размыва берегов; рассредоточение стока по рукавам и пойменным протокам является дополнительным фактором, влияющим на протяженность фронта размыва берегов.

Благодарности. Работа выполнена по планам НИР (ГЗ) кафедры гидрологии и суши и НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке РНФ (проект № 18-17-00086 – размывы берегов рек в разветвленном русле) и РФФИ (проект № 18-05-00487 – экстремальные размывы берегов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Герасимова А.С. Характеристика современных геологических процессов, развитых в долинах нижнего течения рек Оби и Иртыша // Вестн. Моск. ун-та. Сер. Биология, почвоведение, география, география. 1959. № 2. С. 103–111.

Голубцов Г.Б., Чалов Р.С. Острова верхней Оби: морфометрическая характеристика, эволюция и динамика // Геоморфология. 2019. № 1. С. 81–92.

Камалова Е.В. Географические закономерности процессов разрушения берегов на малых и средних реках бассейнов Волги и верхнего Дона: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 1988. 22 с.

Камышев А.А., Рулёва С.Н., Чалов Р.С. Рассредоточение стока воды в разветвлениях русла средней Оби // Географический вестник. 2017. № 3(42). С. 48–53.

Коркин С.Е., Исынов В.А. Многолетний мониторинг русловых деформаций реки Обь на примере ключевого участка «Усть-Вахский» // Эволюция эрозивно-русовых систем, ее хозяйственно-экономические и экологические последствия, прогнозные оценки и учет (Уфа, 3–6 октября 2017 г.). Уфа, Аэтер-на, 2017. С. 156–158.

Куракова А.А., Чалов Р.С. Размывы берегов на широтном участке средней Оби и их связь с морфологией русла // Географический вестник. 2019. № 3(50). С. 34–47.

Махинов А.Н., Чалов Р.С., Чернов А.В. Размывы берегов на среднем Амуре // Геоморфология. 2001. № 2. С. 72–81.

Петров И.Б. Обь-Иртышская пойма (типизация и качественная оценка земель). Новосибирск: Наука, 1979. 136 с.

Попов И.В. Русловые переформирования Волги на участке Волгоград – Астрахань // Труды ГГИ. 1963. Вып. 108. С. 4–67.

Третьяков Е.В. Деформации берегов р. Оби в Тюменской области // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 3. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1973. С. 276–284.

Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Том 3. Антропогенные воздействия, опасные проявления и управление русловыми процессами. М.: КРАСАНД, 2019. 640 с.

Чалов Р.С. Русловые процессы (русловедение). М.: ИНФРА-М, 2017. 569 с.

Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 608 с.

Чалов Р.С. Сложно-разветвленные русла равнинных рек: условия формирования, морфология и деформации // Водные ресурсы. 2001. Т. 28. № 2. С. 166–171.

Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 232 с.

Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В. Речные излучины. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. 371 с.

Чалов Р.С., Сурков В.В., Рулёва С.Н., Беликов В.В., Завадский А.С. и др. Русловые процессы на р. Оби в районе г. Колпашево, размыв города, компьютерное моделирование потока и обоснование оптимального варианта защитных мероприятий // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 18. М.: Геогр. ф-т МГУ, 2012. С. 205–243.

Эберхардс Г.Я. Основные типы и сезонные переформирования берегов малых и средних свободно меандрирующих рек Средней Прибалтики // Геоморфология. 1986. № 3. С. 85–90.

Hemmelder S., Marra W., Markies H., De Jong S.M. Monitoring river morphology & bank erosion using UAV imagery – A case study of the river Bunch, Hautes-Alpes, France. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, no. 73, p. 428–437.

Knighton A.D. *Fluvial Forms and Processes: A New Perspective*. London: Arnold, 1998. 383 p.

Schumm S.A. *The fluvial system*. New York, Wiley, 1977. 338 p.

Поступила в редакцию 11.03.2020

После доработки 15.07.2020

Принята к публикации 06.08.2020

A.A. Kurakova¹, R.S. Chalov²

CHANNEL MORPHOLOGY AND BANK EROSION IN THE LOWER REACHES OF THE OB RIVER (WITHIN THE KHAMAO–YUGRA AUTONOMOUS DISTRICT)

The erosion of river banks is a most dangerous form of channel processes. Besides from creating a threat to settlements and engineering facilities on the banks it affects the channel regime of rivers, and provokes changes of the channel forms, their parameters, flow structure and hydraulics. However the bank erosion in relation to the channel morphodynamics is still poorly explored. The paper provides general description of bank erosion for the Lower Ob River. The banks are relatively homogeneous in terms of lithological composition (sandy-loamy) along the whole length of a branching channel under water distribution over numerous branches and floodplain channels. Using the remote sensing data for different time intervals we calculated the erosion rates and the length of erosion front. The main parameters of the principal channel types of the Lower Ob River, i. e. branching channels, meanders and bifurcated channels, were revealed. The erosion rates increase and the length of erosion front decreases in the meanders with low curvature, and the bank erosion depends on the local situation. The high curvature and wavelength of meander or branching channel provide for a long front of erosion and low rates of river banks erosion. It was found that higher water discharge and water distribution over branches and floodplain channels leads to increasing river banks erosion in the branching and bifurcated channels. Under otherwise equal conditions the intensity of river banks erosion is higher in the branches with greater water discharge.

Key words: channel processes, meanders, branching channels, river bifurcation, erosion front

Acknowledgements. The paper is prepared according to the scientific research plans of the Department of Land Hydrology and the Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes and financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 18-17-00086 – erosion of river banks within channel bifurcations) and the Russian Foundation of Basic Research (project no. 18-05-00487 – bank erosion extremes).

REFERENCES

Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika*. Vyp. 3. Antropogennye vozdejstviya, opasnye proyavleniya i upravlenie ruslovymi processami [Riverbed science: theory, geography, practice, vol. 3. Human impacts, dangerous expressions and management of channel processes]. Moscow, KRASAND Publ., 2019, 640 p. (In Russian)

Chalov R.S. *Geograficheskie issledovaniya ruslovykh processov* [Geographical studies of channel processes]. Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1979, 232 p. (In Russian)

Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika*. Vyp. 1. Ruslovye protsessy: faktory, mekhanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnykh rusel [Riverbed science: theory, geography, practice, vol. 1. Channel processes:

factors, mechanisms, forms and conditions of channel formation]. Moscow, LKI Publ., 2008, 608 p. (In Russian)

Chalov R.S. *Ruslovye protsessy (ruslovedenie)* [Channel processes (riverbed science)]. Moscow, INFRA-M Publ., 2017, 569 p. (In Russian)

Chalov R.S. Slozhno-razvetvlennye rusla ravninnykh rek: usloviya formirovaniya, morfologiya i deformatsii [Intricately braided river channels of lowland rivers: formation conditions, morphology, and deformation], *Vodnye resursy*, 2001, vol. 28, no. 2, p. 166–171. (In Russian)

Chalov R.S., Surkov V.V., Ruleva S.N., Belikov V.V., Zavadskii A.S., Bondarev V.P., Il'iasov A.K., Krylenko I.V., Krylenko I.N., Turykin L.A. [Channel processes on the river Ob in

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, PhD student; *e-mail*: a.a.kurakova@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Professor; Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Chief Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; *e-mail*: rachalov@mail.ru

the Kolpashevo district of the city, the erosion of the city's computer modeling of flow and substantiation of the optimal variant of protective measures], *Eroziya pochv i ruslovyje protsessy* [Soil erosion and channel processes]. Moscow, MSU Faculty of Geography Publ., vol. 18, 2012, p. 205–243. (In Russian)

Chalov R.S., Zavadskii A.S., Panin A.V. *Rechnye izluchiny* [River meanders]. Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2004, 371 p. (In Russian)

Eberhards G.YA. Osnovnye tipy i sezonnye pereformirovaniya beregov mal'kh i srednih svobodno meandriruyushchih rek Srednej Pribaltiki [The main types and seasonal transformation of the banks of small and medium meandering rivers of the Middle Baltic], *Geomorfologiya*, 1986, no. 3, p. 85–90. (In Russian)

Gerashimova A.S. Harakteristika sovremennykh geologicheskikh processov, razvitykh v dolinah nizhnego techeniya rek Obi i Irtysha [Modern geological processes in the valleys of the lower reaches of the Ob and Irtysh rivers], *Vest. Mosk. un-ta. Ser. Biologiya, pochvovedenie, geologiya, geografiya*, 1959, no. 2, p. 103–111. (In Russian)

Golubcov G.B., Chalov R.S. Ostrova verhnjej Obi: morfometricheskaya harakteristika, evolyuciya i dinamika [Islands of the upper river Ob: morphometric characteristic, evolution and dynamics], *Geomorfologiya*, 2019, no. 1, p. 81–92. (In Russian)

Hemmelder S., Marra W., Markies H., De Jong S.M. Monitoring river morphology & bank erosion using UAV imagery – A case study of the river Bulch, Hautes-Alpes, France. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, no. 73, p. 428–437.

Kamalova E.V. *Geograficheskie zakonomernosti processov razrusheniya beregov na mal'kh i srednih rekah bassejnov Volgi i verhnego Dona* [Geographical patterns of coastal destruction processes on small and medium rivers of the Volga and the Upper Don river basins]. Extended Abstract of PhD Thesis in Geography, Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 198, 22 p. (In Russian)

Kamyshchev A.A., Ruliova S.N., Chalov R.S. Rassredotochenie stoka vody v razvetvleniyah rusla srednej Obi [Water flow spreading in the braided reach of the Ob River], *Geograficheskij vestnik*, 2017, no. 3(42), p. 48–53. (In Russian)

Knighton A.D. *Fluvial Forms and Processes: A New Perspective*. London, Arnold, 1998. 383 p.

Korkin S.E., Isypov V.A. [Long-term monitoring of channel deformations of the Ob river (case study Ust-Vakhsky)], *Evolutsiya erozionno-ruslovykh system, eyo khozyajstvenno-ekonomicheskie i ekologicheskie posledstviya, prognozyne otsenki i uchet* [Evolution of erosion-channel systems, its economic and environmental consequences, prognostic estimates and due regard]. Ufa, Aeterna Publ., 2017, p. 156–158. (In Russian)

Kurakova A.A., Chalov R.S. Razmyvy beregov na shirotnom uchastke srednej Obi i ih svyaz' s morfologiej rusla [Shores erosion within latitudinal section of middle Ob and its correlation with morphology of channel], *Geograficheskij vestnik*, 2019, no. 3(50), p. 34–47. (In Russian)

Mahinov A.N., Chalov R.S., Chernov A.V. Razmyvy beregov na srednem Amure [River bank erosion in the middle reaches of the Amur River], *Geomorfologiya*, 2001, no. 2, p. 72–81. (In Russian)

Petrov I.B. Ob'-Irtyshskaya pojma (tipizaciya i kachestvennaya ocenka zemel') [Ob-Irtysh floodplain: typification and land quality evaluation]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979, 136 p. (In Russian)

Popov I.V. [Channel transformations of the Volga River along the Volgograd to Astrakhan section], *Trudy GGI* [Proceedings of the State Hydrological Institute], vol. 108, 1963, p. 4–67. (In Russian)

Schumm S.A. *The fluvial system*. New York, Wiley, 1977, 338 p.

Trepetsov E.V. [Deformation of the banks of the Ob river in the Tyumen region], *Eroziya pochv i ruslovyje processy* [Soil erosion and channel processes], Moscow, MSU Faculty of Geography Publ., vol. 3, 1973, p. 276–284. (In Russian)

Received 11.03.2020

Revised 15.07.2020

Accepted 06.08.2020

УДК 551.4.042

В.Н. Голосов^{1,2,3}, М.В. Кумани⁴, Н.Н. Иванова⁵, В.Р. Беляев⁶, Е.Н. Шамшурина⁷**ЗАИЛЕНИЕ МАЛОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ И УРБАНИЗАЦИИ ВОДОСБОРА (ПОПОВСКИЙ ПРУД, Г. КУРСК)**

Детальные исследования по оценке темпов эрозионно-аккумулятивных процессов и выявления долевого вклада различных источников наносов проведены на водосборе ныне осушенного пруда Поповский, расположенного на северной окраине г. Курска. Темпы аккумуляции наносов в отложениях пруда и балок были определены за два временных интервала с использованием в качестве маркера ¹³⁷Cs Чернобыльского и глобального происхождения. Впервые в России для оценки соотношения вклада различных источников наносов в качестве трассеров использованы жирные кислоты. Установлено, что 97–98% наносов, накопившихся в днище пруда, поступили туда с водосбора в период 1964–1986 гг., а слой сноса с площади бассейна составил 1,7 мм/год. После 1986 г. и до момента осушения пруда в 2010 г. сток наносов с водосбора пруда был минимальным. Его резкое сокращение обусловлено повышением температуры воздуха в зимние месяцы в период после 1986 г., что привело к снижению глубины промерзания почвы и практически полному прекращению стока и смыва в период весеннего снеготаяния. Дополнительным, но менее значимым фактором, стало изменение характера землепользования на водосборе с существенным сокращением пахотных земель и ростом застройки территории, особенно с конца 1990-х гг. Установлено, что основным источником заиления пруда стали наносы, поступившие в него за счет смыва и размыва на пахотных землях. Их доля составляет 50% от общего объема наносов, накопившихся в пруду. Не менее 18% донных отложений сформировались за счет развития оврагов. При этом, вероятно, фактический вклад овражной эрозии может быть выше. Это связано с тем, что, используя в качестве трассеров жирные кислоты, нельзя достоверно отделить наносы, сформировавшиеся за счет размыва оврагов, расположенных под лесом и на границе леса с яблоневым садом, от наносов, образованных за счет смыва почв в саду и в лесу, потому что они характеризуются одинаковым набором жирных кислот.

Ключевые слова: темпы эрозионно-аккумулятивных процессов, источники наносов, методика «отпечатков пальцев» (fingerprinting), изотоп ¹³⁷Cs, жирные кислоты

Введение. Деградация почв в условиях равнин умеренного климатического пояса в основном обусловлена антропогенным воздействием, тогда как в природных ландшафтах сохраняются зональные типы почв. Малые водоемы, расположенные в верхних звеньях флювиальной сети, задерживают поступающие с их водосбора наносы и транспортируемые с ними загрязняющие вещества. Изучение темпов накопления донных отложений и их химического состава позволяет реконструировать динамику стока наносов за период существования водоема [Loska, Wiechula, 2003; Small et al., 2003]. На Европейской территории России надежным маркером, позволяющим определить темпы аккумуляции за последние 60–65 лет, является техногенный изотоп цезия-137 (далее ¹³⁷Cs) глобального и Чернобыльского происхождения [Belyaev et al., 2013]. Для территорий с комплексным землепользованием, изменяющимся во времени, важной задачей является

определение долевого вклада различных источников наносов в заиление водоема, что позволяет идентифицировать основные наносопоставляющие площади водосборного бассейна [Minella et al., 2008]. Эта информация может быть использована для разработки эффективных мер по снижению как темпов эрозионных процессов на конкретных участках водосборов, так и поступления смытого материала в водные объекты. Соотношение объемов наносов, поступающих из различных источников, определяется на основе комплексной методики «отпечатков пальцев» (fingerprinting technique), которая позволяет при помощи наборов трассеров, характерных для каждого потенциального источника, рассчитать их вклад в состав донных отложений или взвешенных наносов [Голосов, 1988; Poulenard et al., 2012; Walling, 2013; Chalov et al., 2017].

В последние годы для выявления долевого вклада различных источников в сток наносов рек и за-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, докт. геогр. н., вед. науч. с.; e-mail: gollossov@gmail.com

² Институт географии РАН, лаборатория геоморфологии, глав. науч. с.

³ Казанский федеральный университет, Институт физики, НИЛ Космозология, глав. науч. с.

⁴ Курский государственный университет, естественно-географический факультет, кафедра географии, докт. сельск.-хоз. н., профессор, e-mail: kumanim@yandex.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, канд. геогр. н., ст. науч. с.; e-mail: nadine_iv@mail.ru

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, канд. геогр. н., вед. науч. с.; e-mail: vladimir.r.belyaev@gmail.com

⁷ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, канд. биол. н., мл. науч. с.; e-mail: shamshyr@mail.ru

илиние водоемов в качестве трассеров стали использоваться жирные кислоты [Mead et al., 2005; Benowetz et al., 2006]. Жирные кислоты распространены повсеместно в почве, поступая в нее из корневых экссудатов, надземной биомассы растений и в результате деятельности микроорганизмов [Badri, Vivanco, 2009; Фарходов и др., 2019; Розенцвет и др., 2019]. Благодаря своей гидрофильности, жирные кислоты частично растворимы в воде и при поступлении в почву вступают в ассоциации с глинистыми минералами, тем самым маркируя их [Williams et al., 2006]. В дальнейшем они переносятся поверхностным стоком совместно с глинистыми минералами. Важным критерием для выбора длинноцепочечных жирных кислот в качестве трассеров для оценки эрозии является их индивидуальное изотопное соотношение $\delta^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$, которое не изменяется со временем [Blessing et al., 2008].

В данной статье проведена оценка динамики и долевого вклада основных источников заиления Поповского пруда, расположенного на окраине г. Курс-

ка, на основе использования набора методов, включая применение жирных кислот и ^{137}Cs в качестве трассеров.

Объект исследования. Пруд Поповский и его водосбор расположены в границах Курска на его северной окраине ($51^{\circ}46'\text{N}$, $36^{\circ}9'\text{E}$) (рис. 1). Он входит в каскад прудов, созданных в верховьях р. Кур в 1964 г., при постройке которых возводились фильтрационные дамбы. Поскольку нет документальных свидетельств о случаях прорыва плотин каскада, можно утверждать, что отложения, накопившиеся на дне пруда за период его эксплуатации, сформировались исключительно на его водосборе площадью $3,86 \text{ км}^2$. За все время существования пруд ни разу не чистился от наносов, а в 2010 г. был спущен. С этого момента бывшая акватория пруда площадью $0,206 \text{ км}^2$ является сушей, осваиваемой наземной растительностью.

Сток воды и наносов с правобережной части водосбора поступает в пруд в основном по днищам

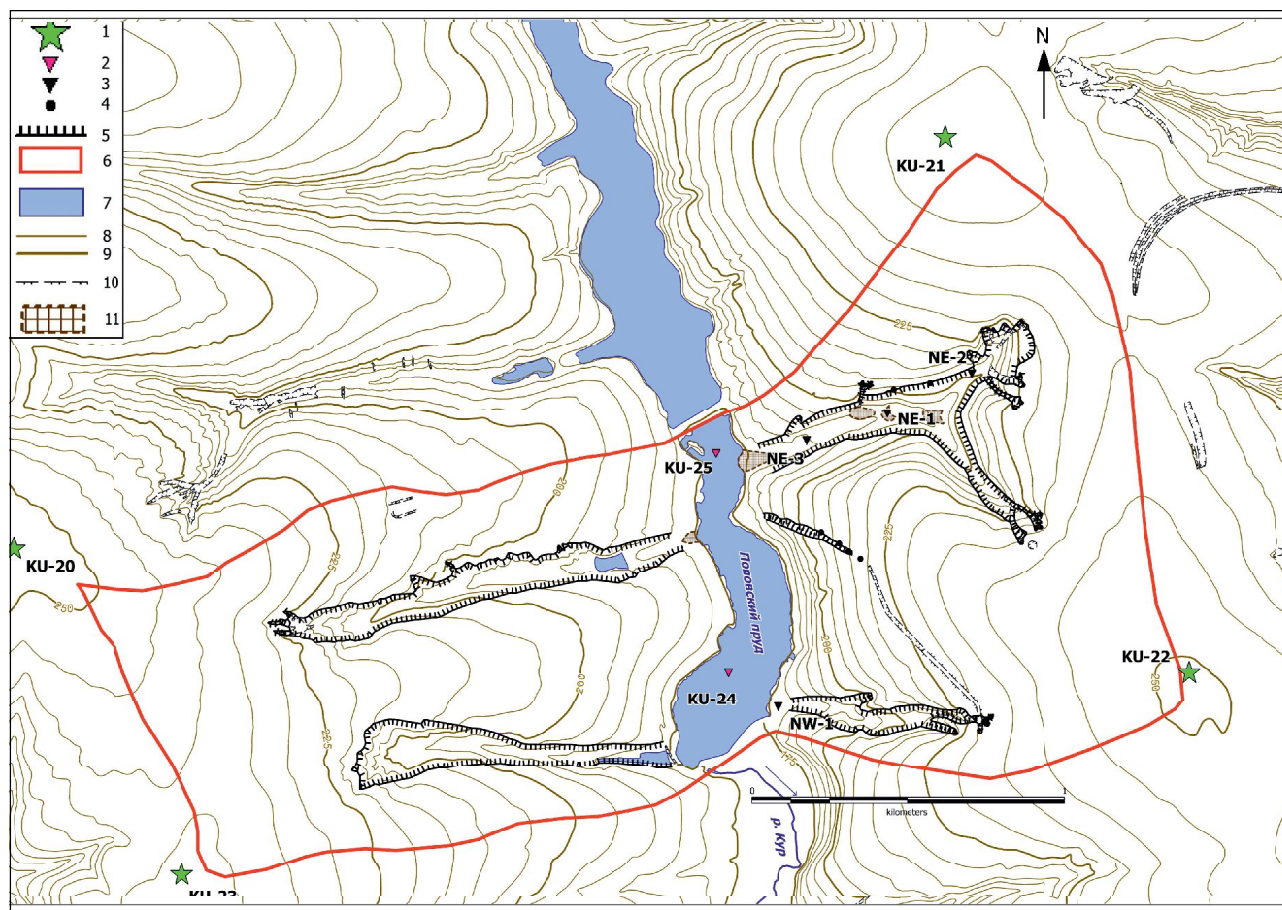


Рис. 1. Схема водосбора пруда Поповского в долине р. Кур и расположение точек отбора образцов на содержание ^{137}Cs . Точки отбора проб: 1 – опорные (интегральные); 2 – аккумулятивные позиции в днище пруда (послойные); 3 – эрозионно-аккумулятивные позиции в днищах балок (послойные); 4 – преимущественно эрозионные позиции в днищах и на бортах оврагов и балок (поверхностные). Прочие обозначения: 5 – бровки балок и оврагов; 6 – граница локального водосбора; 7 – водоемы; 8 – горизонтали (через 5 м); 9 – горизонтали (через 25 м); 10 – антропогенный рельеф (бровки насыпей и канав); 11 – конусы выноса

Fig. 1. Scheme of the catchment basin of the Popovskiy pond in the Kur River valley with ^{137}Cs sampling points. Sampling points: 1 – reference (depth-integrated); 2 – pond bottom deposition (depth-incremental); 3 – alternated erosion and deposition in balka bottoms (depth-incremental); 4 – predominantly erosion of gullies and balkas banks and bottoms (surface). Other signs: 5 – balka and gully banks upper breaks; 6 – pond catchment boundary; 7 – water bodies; 8 – contour lines (5 m interval); 9 – contour lines (25 m interval); 10 – anthropogenic topography (edges of ditches and embankments); 11 – debris fans

двух балок. С более крутых левых склонов долины сток поступает в пруд по днищам двух балок, верхние части которых являются активными оврагами, а также по оврагу антропогенного происхождения, растущему наискосок падения левого склона долины, вдоль канавы, отделяющей здесь залесенную часть водосбора от освоенной.

Коренные породы – мергели мелового возраста – вскрываются оврагами левой части водосбора. В пределах междуречий они перекрываются лессовидными суглинками, а на бортах долины – делювиальными отложениями. Крупность наносов, сформированных за счет склонового смыва, соответствует механическому составу покровных отложений, в которых преобладают частицы пылевой фракции. В овражных выносах также присутствуют обломки мергелей разной крупности, от дресвы до глыб. Однако непосредственно в пруд обломочный материал не поступал.

На всем водосборе пруда и р. Кур преобладают серые лесные среднесуглинистые почвы, преимущественно слабо и средне (на склонах с уклонами более 5°) смытые.

Территория характеризуется умеренным климатом с холодной зимой и теплым летом. С начала 1980-х гг. происходит постоянное повышение среднегодовой температуры воздуха за счет более теплых зим. По данным метеостанции Курска, годовой слой осадков изменяется по десятилетиям в интервале 616–648 мм, с преобладанием в последние годы осадков, выпадающих в виде дождей разной интенсивности. Помимо выпадений ^{137}Cs глобального происхождения с максимумом в 1963 г. в районе исследований произошло загрязнение изотопом цезия после аварии на Чернобыльской АЭС в конце апреля 1986 г., по плотности существенно превышающее величины глобальных выпадений.

С конца 1950-х гг. до 2012 г. землепользование на водосборе пруда Поповский достаточно сильно изменилось (рис. 2). Наиболее существенная трансформация началась на рубеже середины 1990-х гг. В этот период яблоневые сады стали вырубаться, на их месте появились частные дома, постепенно застраивалась и часть земель, ранее использовавшихся в качестве пашни. К 2012 г. сохранился только один массив обрабатываемой пашни, в северной и восточной части водосбора появились участки многоэтажной капитальной застройки (см. рис. 2). Особенно сильное влияние на динамику эрозионно-аккумулятивных процессов на водосборе оказало строительство многоэтажного микрорайона в верховьях северо-восточной балки вдоль проспекта Победы со сплошным асфальтированием внутридворовых проездов.

Методика исследований. Чтобы более четко представить пространственно-временную динамику процессов перемещения вещества на фоне климатических изменений и трансформации типов землепользования за все время существования пруда, в пределах его водосбора были отобраны образцы почв, грунтов и отложений на участках сноса и ак-

кумуляции. Отбор проводился для последующего определения содержания ^{137}Cs и жирных кислот в лабораторных условиях.

Радиоцезиевый метод использовался для определения темпов аккумуляции наносов собственно в пруду и в днищах балок (по их длине) до и после 1986 г. Для определения содержания ^{137}Cs было отобрано и проанализировано 180 образцов (см. рис. 1). В их числе 12 образцов с четырех опорных участков (по три с каждого) для определения вариативности начального выпадения изотопа ^{137}Cs Чернобыльского происхождения; 67 образцов из двух разрезов в днище пруда (образцы отобраны послойно, через каждые 5 см с площади 10×10 см и до глубин 180 и 155 см в южной и северной частях пруда Поповского, соответственно); 90 образцов из днищ балок на левом борту долины (образцы отбирались послойно, каждые 5 см с площади 10×10 см до глубин 90–130 см); 11 образцов с поверхности (0–3 см) эрозионных форм с целью оценки современной концентрации изотопа ^{137}Cs .

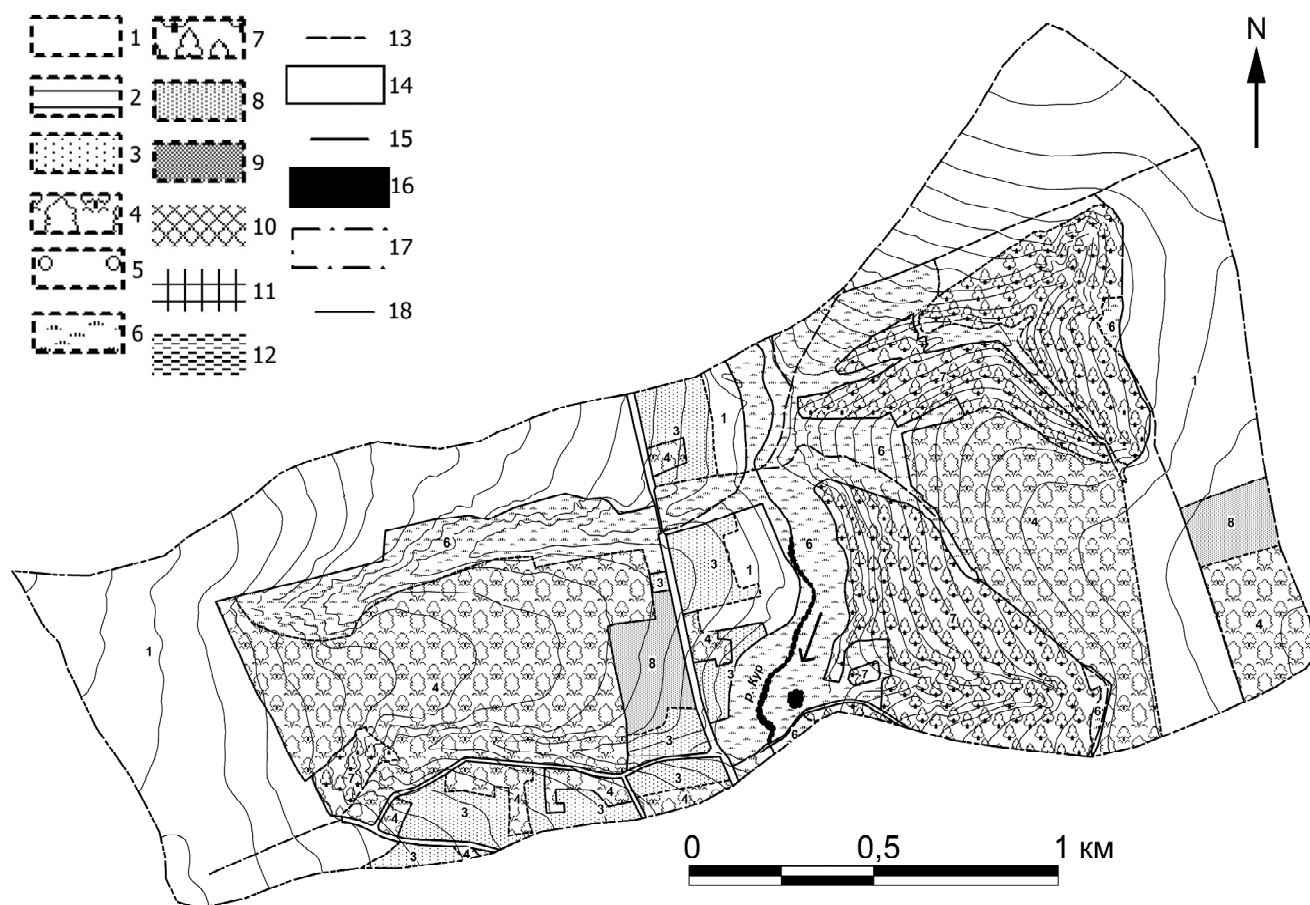
Образцы из днищ правобережных балок не отбирались, поскольку анализ их современной морфологии и особенностей землепользования на водосборах, в частности, наличие дамб и прудов в их низовьях, позволяет предположить отсутствие активного выноса материала после 1986 г. (т. е. после выпадения ^{137}Cs Чернобыльского происхождения).

На опорных участках (см. рис. 1) образцы отбирались для установления пространственной структуры выпадения ^{137}Cs Чернобыльского происхождения в первой половине мая 1986 г., так как «глобальный» ^{137}Cs поступал из атмосферы более равномерно по площади [Golosov, 2002]. Образцы были отобраны на междуречных пространствах, которые являются относительно геоморфологически стабильными, то есть в течение послечернобыльского периода на них не происходили вынос или поступление материала.

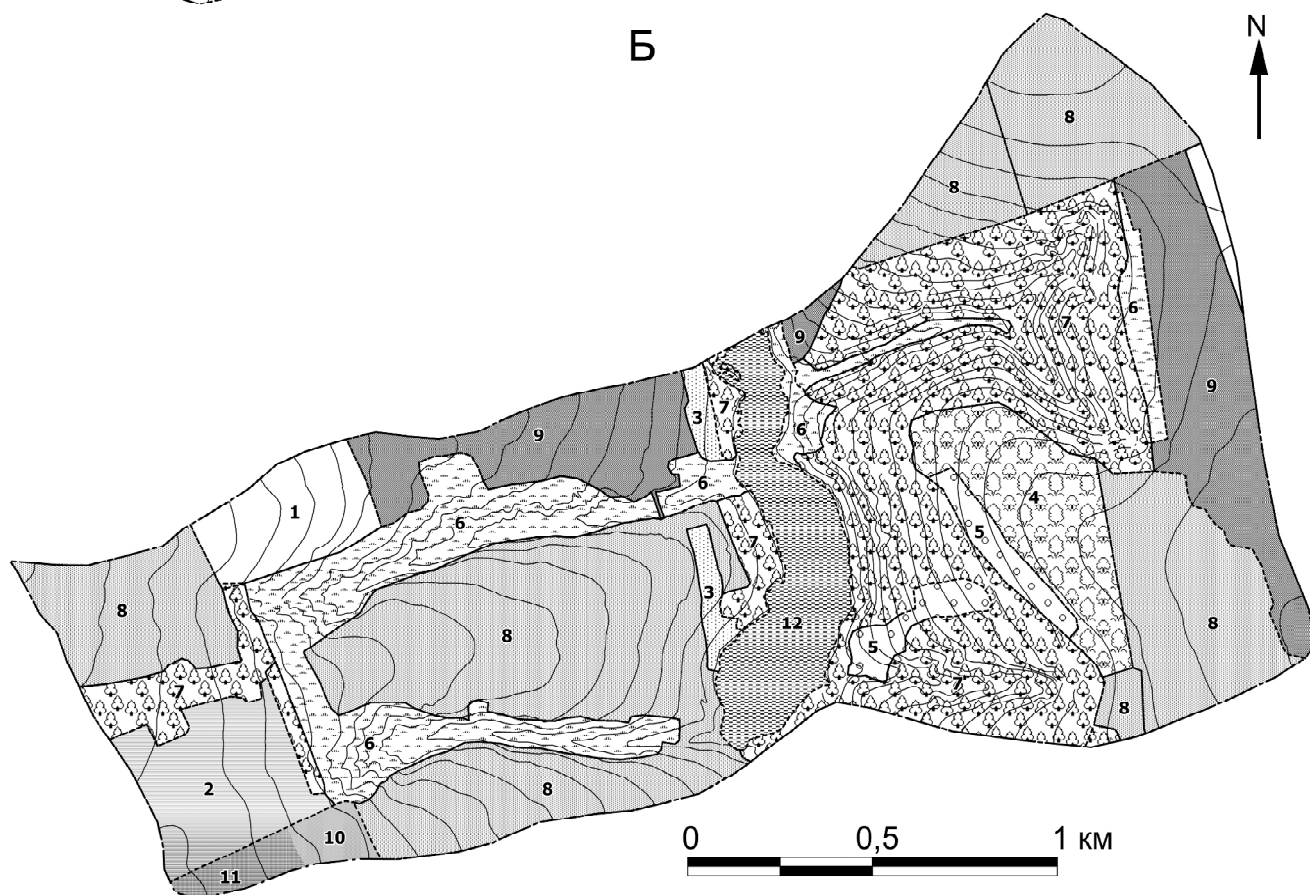
Отобранные образцы отложений доставлялись в лабораторию, высушивались до абсолютно сухого состояния при температуре 105°C и взвешивались. Высушенные пробы размалывали и просеивали через сито с диаметром отверстий 1 мм для гомогенизации образца. Гамма-спектрометрический анализ проб почвы проводили на гамма-спектрометре фирмы ООО НИИП «Грин Стар Инструментс»: СКС-07(09) П-Г-Р, Россия.

В результате анализа особенностей землепользования на водосборе в качестве источников наносов были выбраны следующие виды угодий: пашня, включая заброшенные участки, яблоневые сады, природный вторичный лес и лесопосадки. Отдельно были выделены активные овраги. Для определения содержания жирных кислот в пределах каждого источника наносов по меньшей мере в трехкратной повторности отбирались образцы верхнего слоя почвы (0–2 см) с фиксированной площади на участках потенциального выноса материала. Непосредственно после отбора образцов их высушивали при 50°C, просеивали через сито с диаметром отверстий

А



Б



2 мм и до проведения анализа выдерживали в сухих условиях без доступа света. Образцы, отобранные на каждом виде угодий и на бортах активных оврагов, были объединены в единый интегральный образец, характеризующий данный источник наносов. Отдельно из разрезов, вскрывающих аккумулятивную толщу в днище бывшего пруда, из разных слоев по глубине была отобрана интегральная проба, характеризующая содержание жирных кислот в зоне аккумуляции.

Аналитические исследования проводились в изотопной лаборатории Университета г. Гент (Бельгия). Общая процедура экстракции липидов основывалась на использовании смеси дихлорметан/метанол (DCM/MeOH) в качестве растворителя. Для разделения всех липидов на кислотную и нейтральную фракции использовали твердофазную экстракцию (SPE), заключающуюся в вакуумном элюировании в аминопропиловой колонне (картриджи с силикагелем, Agilent Technologies, Санта-Клара, США). Затем метилированную фракцию жирных кислот повторно растворяли и подвергали газовой хроматографической капиллярной изотопно-долевой масс-спектрометрии (GC-C-IRMS). Жирные кислоты (FAMES) были идентифицированы по времени их хранения с использованием смеси стандартизированных эталонов (FAMES). Для оценки достоверности различий значений $\delta^{13}\text{C}$ одинаковых жирных кислот для разных источников наносов был применен критерий Тьюки (Tukey's HSD test). Он показал, что выделенные источники наносов статистически значимо отличаются друг от друга. Пропорциональный вклад каждого источника наносов в донные отложения пруда оценивался с использованием пакета для анализа стабильных изотопов MixSIAR в среде R [Stock, Semmer, 2013]. Увеличение корреляции между источниками способствует росту уровня неопределенности в выходных данных модели. При этом для анализа используются только те биомаркеры, которые присутствуют как в материале источников сноса, так и в отложениях зоны осадконакопления.

Результаты. Для использования ^{137}Cs в качестве трассера было необходимо установить особенности его начального выпадения после аварии на Чернобыльской АЭС. Полученные данные позволяют выявить незначительный тренд, который прослеживается с ССВ на ЮЮЗ (табл. 1, см. рис. 1). Точка KU-23 немного выпадает из общего тренда, что

Таблица 1

Удельная активность и запас ^{137}Cs
в слое 0–25 см на опорных площадках
(положение площадок показано на рис. 1)

Опорная площадка	Средняя удельная активность, Бк/кг	Средний запас, кБк/м ²
KU-20	54,7	24,4
KU-21	60,5	26,3
KU-22	49,2	21,1
KU-23	37,7	16,1

связано, скорее всего, с механическим воздействием на почву, поскольку образец был отобран в заброшенном саду в пределах городской черты. В целом, можно говорить, что вариабельность начального выпадения по площади есть, но она незначительна и не влияет на проведенные оценки темпов аккумуляции, так как мощность отложений, накопившихся за периоды до и после 1986 г., определялась по положению чернобыльского пика концентраций изотопа цезия, который четко идентифицируется во всех разрезах.

Распределение ^{137}Cs по глубине в отложениях днищ балок левого борта долины р. Кур на участке пруда Поповского свидетельствует о том, что основная масса наносов аккумуляровалась в период до 1986 г., поскольку слои с максимальной концентрацией ^{137}Cs располагаются либо в приповерхностных 5 см (рис. 3Б, Г), либо в горизонте 5–10 см (рис. 3А, В). Слой с максимальной концентрацией ^{137}Cs соответствует поверхности днища в момент его выпадения из атмосферы в начале мая 1986 г. В то же время значимые концентрации ^{137}Cs зафиксированы во всей толще балочных отложений, залегающих на коренных породах, представленных мергелями. Из этого можно сделать вывод, что все наносы отложились в период не ранее 1954 г., когда начались выпадения из атмосферы ^{137}Cs глобального происхождения [Golosov, 2002].

С 1986 по 2012 гг. на конусе выноса и поверхности днища центральной части северо-восточной (верхней по течению) балки накопилось порядка 5 см наносов (см. рис. 3А, В), что соответствует темпам аккумуляции 1,8 мм/год. За предшествующий период 1954–1986 гг. среднегодовые темпы аккумуляции были почти на порядок выше, от 1,1 см/год у

Рис. 2. Структура землепользования исследуемого водосбора на основе топографической карты масштаба 1:10 000 1957 г. (А) и на основе космического снимка спутниковой системы GeoEye 25.09.2012 г. и данных кадастровой карты (Б). 1 – пашня; 2 – залежь; 3 – огороды; 4 – сады; 5 – заброшенные и вырубленные сады; 6 – луга и неудобья; 7 – леса и лесопосадки; 8 – малозатяжная застройка и дачные участки; 9 – капитальная застройка; 10 – промплощадка; 11 – карьер; 12 – территория спущенного пруда; 13 – грунтовые дороги; 14 – асфальтовые дороги и площади; 15 – водотоки; 16 – водоемы; 17 – граница локального водосбора; 18 – горизонтали (интервал – 5 м)

Fig. 2. Land use structure of the catchment under study according to 1:10 000 topographic map of 1957 (A) and from the GeoEye™ satellite image acquired 25.09.2012 and the cadaster map (B). 1 – arable lands; 2 – abandoned fields; 3 – allotment gardens; 4 – apple orchards; 5 – abandoned and cut orchards; 6 – meadows and rugged terrain; 7 – natural forests and forest plantations; 8 – low-storey residential houses and dachas; 9 – permanent residential houses; 10 – industrial sites; 11 – quarry; 12 – dried pond area; 13 – unpaved roads; 14 – paved roads and squares; 15 – streams; 16 – water bodies; 17 – pond catchment boundary; 18 – contour lines (5 m interval)

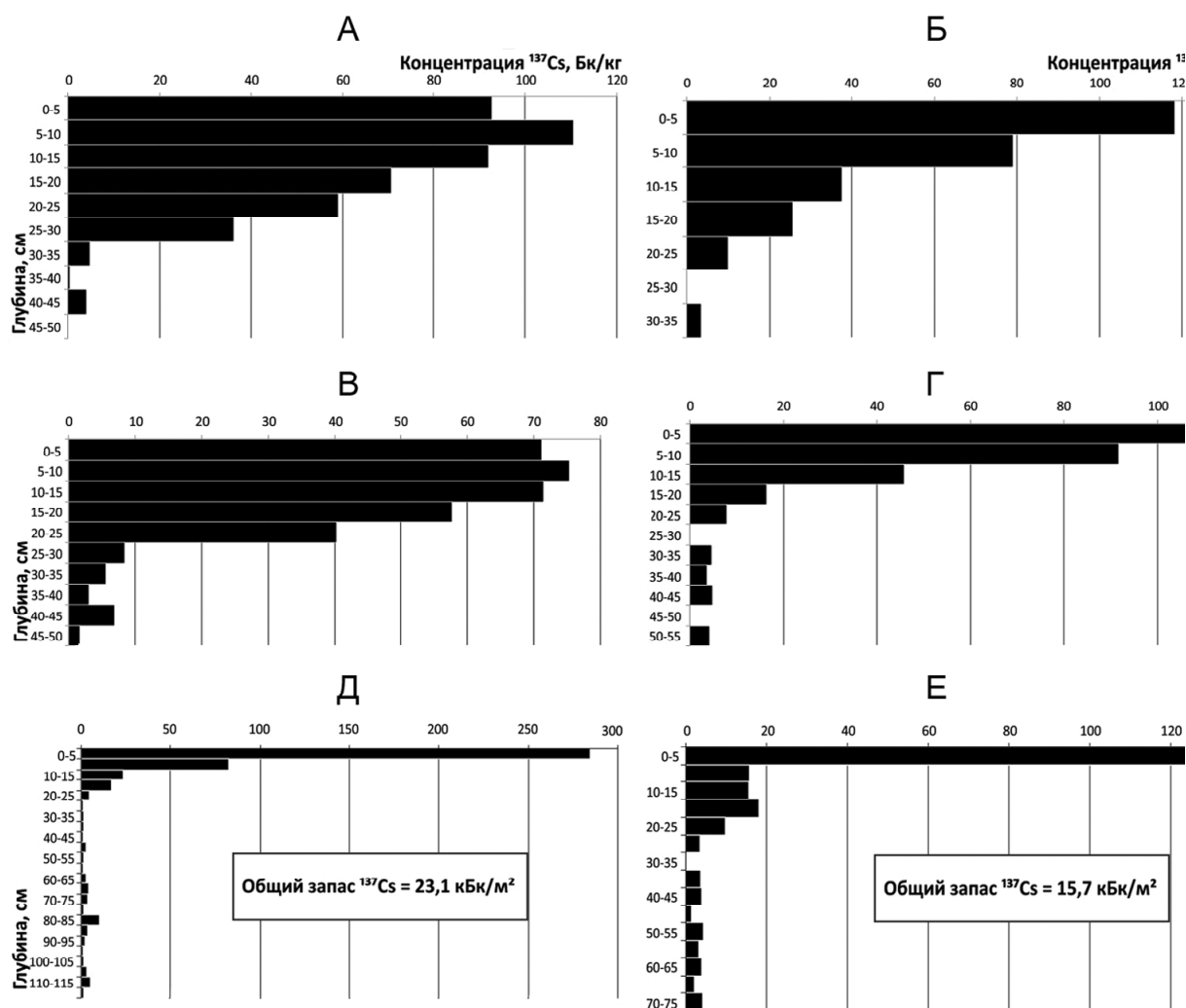


Рис. 3. Вертикальное распределение ^{137}Cs по глубине отложений на различных участках днищ балок, расположенных на левом борту долины (А – разрез NE-1; Б – разрез NE-2; В – разрез NE-3; Г – разрез NW-1) и в днище пруда Поповского (Д – разрез KU-24; Е – разрез KU-25). Положение разрезов см. на рис. 1

Fig. 3. Depth distribution of ^{137}Cs within different parts of balka bottoms on the left slope of the valley (A – section NE-1; Б – section NE-2; В – section NE-3; Г – section NW-1) and in the Popovsky pond bottom (Д – section KU-24; Е – section KU-25). Section locations – see Fig. 1

истоков балки до 1,6 см/год на конусе выноса. При этом фактически они могли быть еще больше, так как вполне возможно, что аккумуляция материала, особенно в верхней части днища балки, началась только после создания пруда в 1964 г. Кроме того, совершенно очевидно, что в период с момента создания пруда и до 1986 г. определенная часть наносов транзитом доставлялась в водоем. После 1986 г. поступление наносов с водосбора обеих левобережных балок практически прекратилось.

Дополнительным подтверждением резкого сокращения поступления наносов с водосбора в пруд является низкая (в интервале 4–42 Бк/кг) концентрация ^{137}Cs в верхних горизонтах отложений незакрепленных растительностью бортов и правых откосов северо-восточной балки, а также верховьев и откосов юго-восточной балки (см. рис. 1). Это существенно ниже, чем концентрация ^{137}Cs в приповерхностном горизонте отложений в днищах балок (см. рис. 3А–Г). Из этого следует, что осыпавшийся

с бортов материал переотложился в основаниях бортов оврагов, и только незначительная его часть была транспортирована ниже по течению, вероятнее всего в первые годы после Чернобыльской аварии.

Эпюры вертикального распределения ^{137}Cs в отложениях пруда также свидетельствуют о том, что после 1986 г. аккумуляция наносов здесь была ничтожно малой (см. рис. 3Д, Е). Максимумы содержания ^{137}Cs находятся в поверхностном пятисантиметровом слое отложений. В нижележащей толще ^{137}Cs прослеживается до глубин 120 и 75 см в разрезах KU-24 и KU-25 соответственно (см. рис. 3Д, Е). Причем в разрезе KU-24 на глубине 80–85 см выделяется второй пик содержания ^{137}Cs , который, вероятно, связан с максимумом выпадения ^{137}Cs глобального происхождения в 1963 г. Аналогичного пика в разрезе KU-25 нет. Нельзя исключать, что при строительстве в 1964 г. земляной плотины пруда, расположенного выше по течению от пруда Поповского (см. рис. 1) использовался грунт с днища

долины р. Кур, что могло привести к срезанию части пойменных отложений, накопившихся до 1964 г. Таким образом, за весь период существования пруда в нем отложилось не менее 75–80 см наносов, причем практически все они, за исключением верхних одного–двух сантиметров, поступили в водоем между 1964 и 1986 гг., то есть темпы аккумуляции достигали 3,2–3,4 см/год. Принимая, что аккумуляция наносов по всей акватории пруда (площадь 0,206 км²) была относительно равномерной, суммарный объем отложений за период 1964–2010 гг. можно оценить в 158–159 тыс. м³, из которых не менее 154 тыс. м³ или 185 тыс. т отложилось в период 1964–1986 гг. Наносы за все время существования пруда (до 2010 г. включительно) поступали только с площади водосбора. Средние темпы эрозии на водосборе за этот период не превышали 1,7 мм/год или 21 т/га в год. После 1986 г. вынос материала с водосбора в пруд резко сократился и соответствовал в период до 2010 г. слою сноса не более 0,03 мм/год.

Было проведено сопоставление набора жирных кислот, характерных для каждого источника наносов, который определяется составом биоценозов рассматриваемых угодий. Соответственно, для растительных сообществ яблоневого сада, естественного леса и лесопосадок эти показатели существенно отличаются, что подтверждается низкой корреляцией между ними или ее отсутствием (табл. 2). Практически нет связи между составом жирных кислот в наносах с перечисленных угодий и в овражных отложениях, так как, независимо от того, где располагается овраг, в его выносах преобладают продукты размыва покровных отложений и коренных пород, а не приповерхностных горизонтов почвы, содержащих жирные кислоты. Относительно высокая степень корреляции между лесопосадками и пашней, а также яблоневым садом и пашней может объясняться тем, что почвы под этими угодьями старопашотные, так как сигнал жирных кислот в верхних горизонтах сохраняется в течение десятилетий и даже столетий. Достаточно хорошая корреляция выявлена между отложениями активных оврагов и наносами с пашни. Концентрация жирных кислот, поступающих из посевных культур, на пахотных угодьях постоянно снижается из-за многократного перемешивания материала верхних 20–25 см. Кроме того, анализ топографических карт 1957 г. показывает наличие большого количества линейных размывов на распахиваемых склонах. Вероятно, активное развитие промоин продолжалось до начала 1980-х гг.

Оценки долевого вклада различных источников наносов в заиливание пруда, полученные на основе использования жирных кислот в качестве трассеров, приведены на рис. 4. Согласно результатам этого метода, примерно половина наносов поступила за счет развития эрозионных процессов на пашне, на долю овражных наносов приходится порядка 18%, а вынос с остальных угодий еще меньше.

Обсуждение. Из основных особенностей водосбора пруда Поповского, определяющих механизм доставки наносов со склонов в днище долины, следует отметить наличие нескольких, ныне разрушенных, земляных плотин в днище одной из правобережных балок, расположенной в юго-западной части водосбора (см. рис. 1). В ее нижней части имеется небольшой водоем, плотиной которого служит насыпь асфальтированной дороги. Можно предположить, что определенная часть наносов, формировавшихся на водосборе балки, переоткладывалась в ее днище, в том числе в многочисленных прудах. В следующей балке, впадающей в пруд в его верхней части, разрушенных земляных плотин нет, но есть небольшой водоем недалеко от устья, плотиной которого также служит автодорога. Однако наличие хорошо выраженного в рельефе конуса выноса на устьевом участке балки указывает на то, что данный водоем сооружен сравнительно недавно, и в нем не могло накопиться значительного количества наносов, транспортируемых по днищу балки при формировании поверхностного стока. Тем не менее, не подлежит сомнению, что часть наносов, смываемых с пашни на водосборе данной балки, переоткладывается в ее днище. Следует отметить, что на карте 1957 г. на левом борту балки вдоль границы пашни показаны многочисленные овражные врезы, что указывает на высокую активность эрозионных процессов в этот период.

Эрозионные формы, расположенные в пределах частично залесенной левобережной части водосбора Поповского пруда, существенно отличаются от балок его правобережной части. Их истоки и верхние участки являются действующими оврагами с незадернованными крутыми склонами и активными вершинами. В среднем течении борта балок на большом протяжении задернованы, но на них местами формируются оползни-сплывы. Северо-восточная балка также имеет несколько растущих правых откосов, активность которых поддерживается поверхностным стоком вдоль асфальтовой дороги, ограничивающей водосбор пруда с севера. Днища этих эро-

Таблица 2

Корреляционная матрица соотношений набора жирных кислот источников наносов, поступавших в пруд Поповский, рассчитанная в моделях микширования из выходных данных пакета SIAR (значения корреляции между источниками находятся внутри полей)

		Лесопосадки (ЛП)	Овраги (ОВ)	Пашня (ПА)
Яблоневый сад (ЯС)	Естественный лес (ЕЛ) 0,1			0,5
			0	0,4
		0,2	0,1	0,2
		0,1	0	0,5

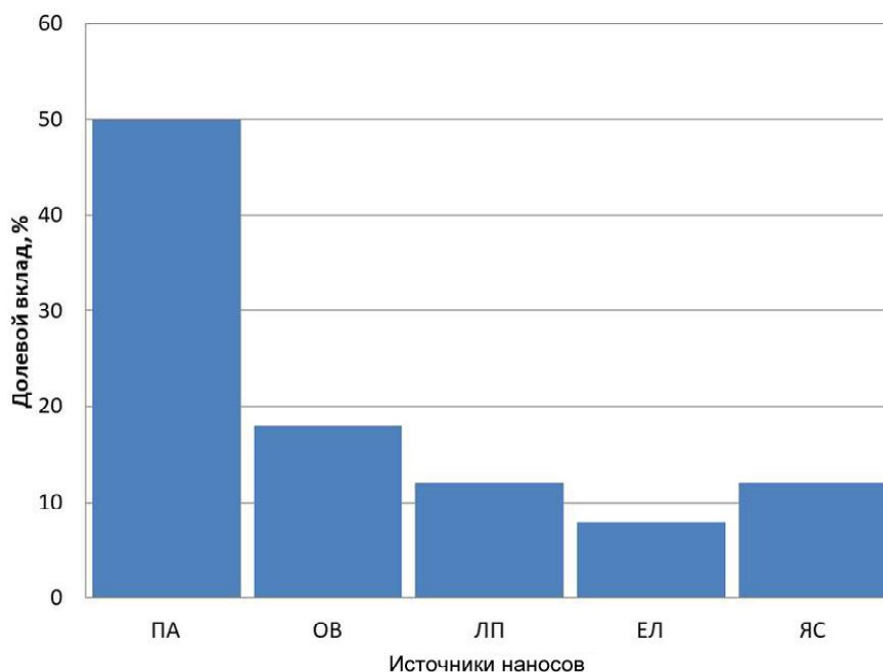


Рис. 4. Долевой вклад различных источников наносов в заиление пруда Поповского, определенный на основе использования жирных кислот в качестве трассера. ПА – пашня, ОВ – активные овраги, ЛП – лесопосадки, ЕЛ – природный вторичный лес, ЯС – яблоневые сады

Fig. 4. Contribution of different sediment sources to the Popovskiy pond siltation, determined with fatty acids as a tracer. ПА – arable lands; ОВ – active gullies; ЛП – forest plantations; ЕЛ – secondary forests; ЯС – apple orchards

зионных форм в настоящее время, в основном, задерживаются, но по-прежнему довольно узкие и имеют значительный уклон. В нижнем течении они расширяются и выполаживаются, что способствует аккумуляции наносов. Конус выноса эрозионной формы, расположенной в юго-восточной части бассейна, перекрывает подножие борта долины и гипсометрически выше бывшей акватории пруда. Следовательно, можно предположить, что значительная часть наносов, формирующихся на водосборе, переотлагалась в днище эрозионной формы и на конусе выноса, не достигая пруда. Совершенно другая ситуация доставки наносов характерна для балки, расположенной в северо-восточной части водосбора: ее конус выноса выходит непосредственно в бывшую акваторию пруда. Здесь также отмечена наибольшая современная активность роста правых и верхних отвершков. Однако и в этом случае большая часть поступающего из них материала остается в пределах довольно крупного и морфологически четко выраженного внутреннего конуса в расширении нижней части днища балки, в районе разреза NE-3 (см. рис. 1, рис. 3В).

Таким образом, анализ характера землепользования и путей транспорта наносов внутри водосбора позволяет утверждать, что в заилении Поповского пруда участвовали наносы, поступавшие с обоих его бортов, при этом в основном в верхнюю часть водоема. Полученные результаты ставят два ключевых вопроса, нуждающихся в обсуждении:

1) Почему поступление наносов с водосбора в пруд практически прекратилось после 1986 г.?

2) Насколько точна оценка долевого вклада различных источников наносов при использовании в качестве трассера жирных кислот?

Основной причиной резкого сокращения поступления наносов с водосбора в пруд Поповский после 1986 г. следует признать практически полное прекращение поверхностного талого стока с сельскохозяйственных угодий в связи с потеплением климата. Это подтверждают изменения объемов стока весеннего половодья на реках Центрально-Черноземного региона, особенно значимые на рубеже 1980–1990 гг., когда существенно сократились максимальные расходы воды [Апухтин, Кумани, 2015]. С конца 1970-х гг. прослеживается ярко выраженный тренд уменьшения расходов воды весеннего половодья в целом в южной половине Восточно-Европейской равнины [Сафина, Голосов, 2018]. Причиной этого стало снижение глубины промерзания почвы в связи с повышением температуры воздуха в зимнее время, что привело к росту стока в зимнюю и летнюю межень за счет увеличения доли подземного стока. В качестве примера приводятся разностно-интегральные кривые максимальных расходов воды в период весеннего половодья на р. Тускарь, которая впадает в р. Сейм в Курске, и глубины промерзания почвы по метеостанции Курск, расположенной в непосредственной близости от восточной границы водосбора пруда Поповский (рис. 5). Уменьшение площади пашни со 134 до 50 га после 2003 г. стало дополнительным фактором, повлиявшим на сокращение эрозии на водосборе. Ведущая роль клима-

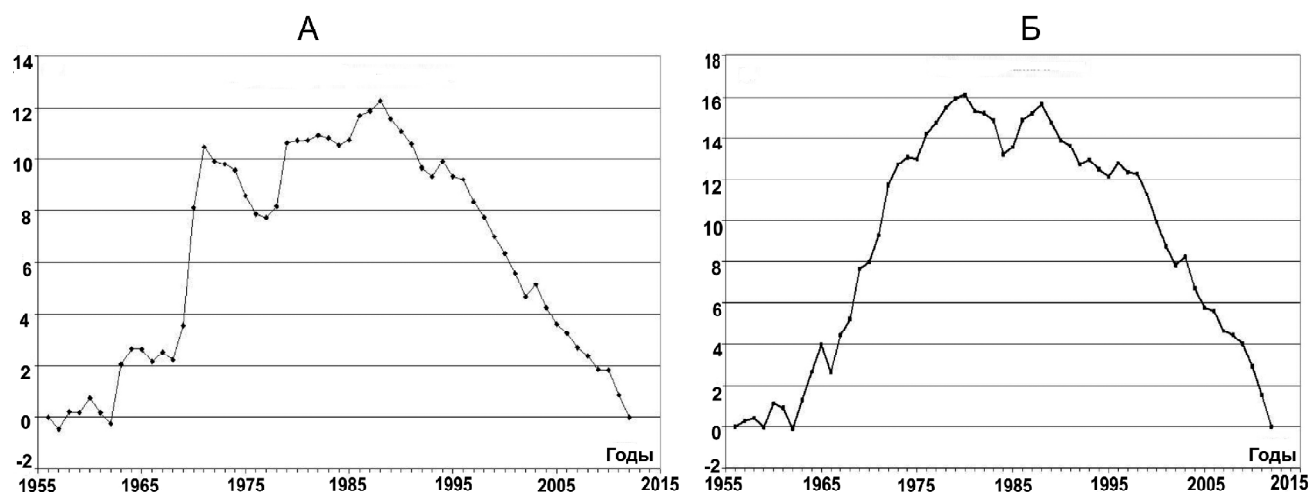


Рис. 5. Разностно-интегральные кривые: А – максимальных расходов весеннего половодья р. Тускарь, г/п Курск; Б – максимальных глубин промерзания почвы (по данным метеостанции г. Курска)

Fig. 5. Cumulative difference curves for: А – peak spring snowmelt flow discharge (the Tuskar River, Kursk gauging station); Б – maximum depth of winter frozen topsoil (Kursk meteorological station)

тических изменений подтверждается отсутствием после 1986 г. аккумуляции в днищах залесенных овражных форм левого борта долины, в верховьях которых на месте пашни возникла капитальная городская застройка с асфальтированием междомовых поверхностей.

Количественная оценка доли наносов, поступающих с различных угодий, проведена на основе сопоставления содержания жирных кислот в почве, которое самым тесным образом связано с характером растительности на разных типах землепользования и в донных отложениях пруда (см. рис. 4). Доминирующая роль продуктов смыва с пашни в заилении водоема не вызывает сомнений. Ситуация с овражными выносами более сложная. Овражные формы могут развиваться в пределах различных угодий. Так, на топографической карте 1957 г. показано большое число небольших овражных врезов на левом борту северо-западной балки, вершины которых выходят к краю пашни. Это указывает на значительный сток и смыв в этот период с пашни, который происходил за счет линейных размывов склоновых ложбин, т. е. по сути в результате оврагообразования. Еще одним подтверждением более существенного вклада овражных выносов в заиление пруда является низкое содержание ^{137}Cs в прудовых отложениях, не затронутых вертикальной миграцией ^{137}Cs Чернобыльского происхождения, а именно с глубины свыше 25 см (см. рис. 3Д, Е). Прослой с полным отсутствием ^{137}Cs , которые прослеживаются в разрезах донных отложений на одних и тех же глубинах (30–35 и 40–45 см), вероятно, связаны с единовременным поступлением значительного объема не содержащих изотопа Cs^{137} продуктов размыва бортов и днищ оврагов в результате мощного эрозионного события. В такой ситуации по данным радиоизотопного метода вынос матери-

ала из оврагов абсолютно доминировал над поступлением наносов из других источников.

Можно предположить, что доля наносов, поступивших с участков водосбора, которые находятся под вторичным березовым лесом, несколько завышена, так как почва в достаточно разреженном лесу хорошо защищена от смыва и размыва травянистой растительностью, в отличие от лесопосадок, где проективное покрытие поверхности почвы травянистой растительностью очень низкое. Поскольку действующие овраги расположены и в лесу, и в лесопосадках, то вполне возможно, что отложения на их бортах, которые при осыпании вовлекались в сток наносов, также частично получали набор жирных кислот, характерный для леса, что привело к завышению доли материала, поступающего с залесенных участков, и, соответственно, к занижению вклада овражных выносов. Фактическая доля наносов, сформированных за счет размыва оврагов, вероятно, лишь немногим меньше объема продуктов эрозии, поступивших с пашни. Таким образом, использование жирных кислот в качестве трассеров для идентификации долевого вклада наносов, поступивших за счет эрозии почв и грунтов с различных типов землепользования, в случае малых водосборов с активным развитием овражной эрозии имеет некоторые ограничения. Метод хорошо оценивает вынос с площадей, занятых разной по составу растительностью (пашня, лес, лесополосы, сады). Но одна овражная система может пересекать различные угодья, а единичные линейные размывы в пределах пашни также встречаются достаточно часто. Все это вносит некоторую неопределенность в достоверность количественной оценки вклада различных видов землепользования, включая пашню (см. табл. 2). Корректировать эту неопределенность помогает использование других методов фингерпринтинга, в частности, радиоизотопного.

Выводы:

– применение независимых методов позволило исследовать динамику заиления и количественно оценить долевого вклад различных источников наносов ныне осушенного пруда Поповского, расположенного на окраине г. Курска. Установлено, что основной объем наносов, поступивших в водоем с его водосбора, сформировался за счет смыва и размыва участков пашни и роста оврагов в период с 1964 по 1986 гг;

– суммарный объем наносов, накопившихся в пруду за этот период, составил не менее 154 тыс. м³. Это соответствует среднегодовому слою сноса материала с площади водосбора в 1,7 мм. После 1986 г. и до момента осушения пруда в 2010 г. поступление наносов в пруд было минимальным. Это связано как с резким сокращением талого стока на склонах водосбора, которое произошло в связи со снижением глубины промерзания почв при повышении зимних температур воздуха начиная с 1980-х гг., так и с уменьшением площади пашни;

– для количественной оценки доли наносов, поступивших в пруд из разных источников, в качестве

трассеров использовались жирные кислоты как один из вариантов метода фингерпринтинга. По данным метода жирных кислот, основной объем наносов, накопившихся в пруду, сформировался за счет продуктов смыва с пашни (50% от общего объема наносов), линейного и площадного прироста оврагов (не менее 18%). Достоверно определить долю наносов, сформировавшихся за счет смыва под вторичным лесом, лесопосадками и в яблоневых садах по набору жирных кислот не представляется возможным, так как действующие овраги расположены внутри этих угодий или граничат с ними. Поэтому при использовании содержания жирных кислот для разделения долевого вклада различных источников наносов на малых водосборах с активным оврагообразованием необходимо привлекать дополнительные методы. Использование нами изотопа Cs¹³⁷ в качестве независимого трассера позволило скорректировать оценки доли каждого из источников наносов, полученные методом жирных кислот, в пользу увеличения вклада овражной эрозии.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Д. Гюйгенсу (Университет г. Гент, Бельгия) за проведение аналитических исследований содержания жирных кислот в образцах почвы и наносов, сотрудникам географического факультета Ю.С. Кузнецовой и Т.С. Кошовскому за участие в полевых работах. Работа подготовлена по госзаданию НИЛ эрозии почв и русловых процессов географического ф-та МГУ, № АААА-А16-116032810084-0» (определение содержания ¹³⁷Cs в образцах, методика) и при финансовой поддержке РФФИ №19-29-05025мк (расчеты и подготовка текста статьи).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Анухтин А.В., Кумани М.В. Многолетняя динамика основных элементов весеннего стока малых и средних рек Центрального Черноземья // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Естественные науки. 2015. Вып. 33. № 21(218). С. 114–120.

Голосов В.Н. Эрозионно-аккумулятивные процессы и баланс наносов в бассейне р. Протвы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 1988. № 6. С. 15–24.

Розенцвейт О.А., Федосеева Е.В., Терехова В.А. Липидные биомаркеры в экологической оценке почвенной биоты: анализ жирных кислот // Успехи современной биологии. 2019. Т. 139. № 2. С. 1–17.

Сафина Г.Р., Голосов В.Н. Влияние изменений климата на внутригодовое распределение стока малых рек южной половины Европейской территории России // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. 2018. Т. 160. Кн. 1. С. 111–125.

Фарходов Ю.Р., Иванов В.А., Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Яшин М.А., Куликова Н.А. Жирные кислоты как биомаркеры типичных черноземов разного вида использования // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2019. № 1. С. 17–22.

Badri D.V., Vivanco J.M. Regulation and function of root exudates. *Plant Cell Environ.*, 2009, no. 32, p. 666–681.

Banowetz G.M., Whittaker G.W., Dierksen K.P., Azevedo M.D., Kennedy A.C., Griffith S.M., Steiner J.J. Fatty acid methyl ester analysis to identify sources of soil in surface water. *J. Environ. Qual.*, 2006, no. 35, p. 133–140.

Belyaev V., Golosov V., Markelov M., Ivanova N., Shamshurina E., Evrard O. Effects of Land Use and Climate Changes on Small Reservoir Siltation in the Agricultural Belt of European Russia. *Proc. Symp. H09 «Considering Hydrological Change in Reservoir Planning and Management»* (July 22–26, 2013, Gothenburg), IAHS Proceedings and Reports, 2013, vol. 362, p. 134–145.

Blessing M., Jochmann M., Schmidt T. Pitfalls in compound-specific isotope analysis of environmental samples. *Anal. Bioanal. Chem.*, 2008, vol. 390, p. 591–603.

Chalov S., Golosov V., Tsyplenkov A., Theuring P., Zakerinejad R., Märker M., Samokhin M.A. Toolbox for sediment budget research in small catchments. *Geography, Environment, Sustainability*, 2017, no. 10, p. 43–68. DOI: 10.24057/2071-9388-2017-10-4-43-68.

Golosov V.N. Special considerations for areas affected by Chernobyl fallout. *Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides*, Kluwer Academic Publishers Dordrecht, 2002, p. 165–183.

Loska K., Wiechuia D. Application of principal component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir. *Chemosphere*, 2003, vol. 51, p. 723–733.

Mead R., Xu Y., Chong J., Jaffé R. Sediment and soil organic matter source assessment as revealed by the molecular distribution and carbon isotopic composition of n-alkanes. *Org. Geochem.*, 2005, vol. 36, p. 363–370.

Minella J.P.G., Walling D.E., Merten G.H. Combining sediment source tracing techniques with traditional monitoring to assess the

impact of improved land management on catchment sediment yields. *J. Hydrol.*, 2008, vol. 348, p. 546–563.

Poulenard J., Legout C., Némery J., Bramorski J., Navratil O., Douchin A., Fanget B., Perrette Y., Evrard O., Esteves M. Tracing sediment sources during floods using diffuse reflectance infrared Fourier transform spectrometry (DRIFTS): a case study in a highly erosive mountainous catchment (Southern French Alps). *J. Hydrol.*, 2012, vol. 414–415, p. 452–462.

Small I.F., Rowan J.S., Duck R.W. Long-term sediment yield in Crombie Reservoir catchment, Angus, and its regional significance within the Midland Valley of Scotland. *Hydrological Sciences*, 2003, no. 48, p. 619–635.

Walling D.E. The evolution of sediment source fingerprinting investigations in fluvial systems. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, vol. 13, p. 1658–1675.

Williams M.A., Myrold D.D., Bottomley P.J. Carbon flow from ¹³C-labeled straw and root residues into the phospholipid fatty acids of a soil microbial community under field conditions. *Soil Biol. Biochem.*, 2006, no. 38, p. 759–768.

Электронный ресурс

Stock B.C., Semmer B.X. MixSIAR GUI User Manual version. 2013. URL: <http://conserver.iugo-cafe.org/user/brice.semmer/MixSIAR>. (дата обращения 04.09.2019)

Поступила в редакцию 06.04.2020

После доработки 14.07.2020

Принята к публикации 06.08.2020

V.N. Golosov^{1,2,3}, M.V. Kumani⁴, N.N. Ivanova⁵,
V.R. Belyaev⁶, E.N. Shamshurina⁷

SILTATION OF A SMALL RESERVOIR UNDER CLIMATIC CHANGES AND URBANIZATION OF ITS CATCHMENT BASIN (THE POPOVSKY POND, KURSK)

The rates of erosion-accumulation processes were estimated and the contribution of various sediment sources was identified for the catchment of the actually drained Popovsky Pond, located in the northern outskirts of Kursk. The rates of sediment accumulation in the pond and dry valley bottoms over two time intervals were determined using ¹³⁷Cs of Chernobyl and global origin as a tracer. Fatty acids were for the first time used in Russia as tracers to assess the contribution of various sediment sources. It was established that 97–98% of sediment accumulated in the bottom of the pond came from the catchment in the period of 1964–1986, and the denudation rate in the catchment area was 1,7 mm/year. Sediment yield from the pond catchment was minimal after 1986 until it was drained in 2010. A sharp decrease in sediment yield results from higher air temperatures in the winter months after 1986, which led to a decrease in the frozen soil depth and an almost complete cessation of surface water runoff and erosion during spring snowmelt. Land-use changes in the catchment area with a significant reduction of arable lands and an increase of urban areas, especially since the late 1990s, was an additional, but less significant factor. It has been established that the sediments eroded from the arable lands were the main source of pond siltation. They account for 50% of the total sediments accumulated in the pond. At least 18% of bottom sediments are produced by gully erosion. Moreover, the actual contribution of gully erosion may be even higher. This is due to the fact that the use of fatty acids as tracers makes it impossible to reliably separate sediments which were formed due the gully erosion under the forest and between the forest and the apple orchard from the sediments which were formed due to soil erosion in the garden and in the forest.

Key words: rates of erosion and accumulation, sediment sources, fingerprinting, ¹³⁷Cs, fatty acids

Acknowledgements. The authors are grateful to D. Huygens (University of Ghent, Belgium) for carrying out analytical studies of the content of fatty acids in soil and sediment samples, and to Yu.S. Kuznetsova and T.S. Koshovsky from the Faculty of Geography for participation in field work. The paper was prepared under the state assignment AAAA-A16-116032810084-0 of the Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, MSU Faculty of Geography, “(determination of ¹³⁷Cs content in samples, methodology); the work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 19-29-05025mk) (calculations and preparation of the text).

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; *e-mail*: golossov@gmail.com

² Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Laboratory of Geomorphology, Chief Scientific Researcher

³ Kazan Federal University, Institute of Physics, Research Laboratory of Space Ecology, Chief Scientific Researcher

⁴ Kursk Federal University, Faculty of Natural and Geographical Sciences, Department of Geography, Professor, D.Sc. in Agriculture; *e-mail*: kumanim@yandex.ru

⁵ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Senior Scientific Researcher, PhD in Geography; *e-mail*: nadine_iv@mail.ru

⁶ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Leading Scientific Researcher, PhD in Geography; *e-mail*: vladimir.r.belyaev@gmail.com

⁷ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Junior Scientific Researcher, PhD in Biology; *e-mail*: shamshyr@mail.ru

REFERENCES

- Apukhtin A.V., Kumani M. V. Mnogoletnjaja dinamika osnovnyh elementov vesennego stoka malyh i srednih rek Central'nogo Chernozem'ja [Longstanding dynamics of basic elements of the spring drain of the small and middle rivers of the Central Chernozem region]. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural sciences*, 2015, vol. 33, no. 21(218), p. 114–120. (In Russian)
- Badri D.V., Vivanco J.M. Regulation and function of root exudates. *Plant Cell Environ.*, 2009, no. 32, p. 666–681.
- Banowetz G.M., Whittaker G.W., Dierksen K.P., Azevedo M.D., Kennedy A.C., Griffith S.M., Steiner J.J. Fatty acid methyl ester analysis to identify sources of soil in surface water. *J. Environ. Qual.*, 2006, no. 35, p. 133–140.
- Belyaev V., Golosov V., Markelov M., Ivanova N., Shamshurina E., Evrard O. Effects of Land Use and Climate Changes on Small Reservoir Siltation in the Agricultural Belt of European Russia. Proc. Symp. H09 «Considering Hydrological Change in Reservoir Planning and Management» (July 22–26, 2013, Gothenburg), IAHS Proceedings and Reports, 2013, vol. 362, p. 134–145.
- Blessing M., Jochmann M., Schmidt T. Pitfalls in compound-specific isotope analysis of environmental samples. *Anal. Bioanal. Chem.*, 2008, vol. 390, p. 591–603.
- Chalov S., Golosov V., Tsyplenkov A., Theuring P., Zakerinejad R., Märker M., Samokhin M.A. Toolbox for sedimentbudget research in small catchments. *Geography, Environment, Sustainability*, 2017, no. 10, p. 43–68. DOI: 10.24057/2071-9388-2017-10-4 -43-68.
- Farhodov Ju.R., Ivanov V.A., Holodov V.A., Jaroslavceva N.V., Jashin M.A., Kulikova N.A. Zhirnye kisloty kak biomarkery tipichnyh chernozemov raznogo vida ispol'zovaniya [Fatty acids as biomarkers of typical chernozems under different management practices]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya Pochvovedenie*, 2019, no. 1, p. 17–22. (In Russian)
- Golosov V.N. Erozionno-akkumulativnye processy i balans nanosov v bassejne r. Protvy [Erosion-accumulative processes and sediment budget in the Protva River basin]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya geografiya*, 1988, no. 6, p. 15–24. (In Russian)
- Golosov V.N. Special considerations for areas affected by Chernobyl fallout. Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides: Kluwer Academic Publishers Dordrecht, 2002, p. 165–183.
- Loska K., Wiechuia D. Application of principal component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir. *Chemosphere*, 2003, vol. 51, p. 723–733.
- Mead R., Xu Y., Chong J., Jaffé R. Sediment and soil organic matter source assessment as revealed by the molecular distribution and carbon isotopic composition of n-alkanes. *Org. Geochem.*, 2005, vol. 36, p. 363–370.
- Minella J.P.G., Walling D.E., Merten G.H. Combining sediment source tracing techniques with traditional monitoring to assess the impact of improved land management on catchment sediment yields. *J. Hydrol.*, 2008, vol. 348, p. 546–563.
- Poulenard J., Legout C., Némery J., Bramorski J., Navratil O., Douchin A., Fanget B., Perrette Y., Evrard O., Esteves M. Tracing sediment sources during floods using diffuse reflectance infrared Fourier transform spectrometry (DRIFTS): a case study in a highly erosive mountainous catchment (Southern French Alps). *J. Hydrol.*, 2012, vol. 414–415, p. 452–462.
- Rozencvet O.A., Fedoseeva E.V., Terehova V.A. Lipidnye biomarkery v ekologicheskoy ocenke pochvennoj bioty: analiz zhirnyh kislot [Lipid biomarkers in the environmental assessment of soil biota: fatty acid analysis]. *Uspehi sovremennoj biologii*, 2019, vol. 139, no. 2, p. 1–17. (In Russian)
- Safina G.R., Golosov V.N. Vliyanie izmenenij klimata na vnutrigodovoe raspredelenie stoka malyh rek juzhnoj poloviny Evropejskoj territorii Rossii [The Effect of Climate Change on the Annual Flow Distribution of Small Rivers in the Southern Half of the European Territory of Russia]. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya Estestvennye nauki*, 2018, vol. 160, no. 1, p. 111–125. (In Russian)
- Small I.F., Rowan J.S., Duck R.W. Long-term sediment yield in Crombie Reservoir catchment, Angus, and its regional significance within the Midland Valley of Scotland. *Hydrological Sciences*, 2003, no. 48, p. 619–635.
- Walling D.E. The evolution of sediment source fingerprinting investigations in fluvial systems. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, vol. 13, p. 1658–1675.
- Williams M.A., Myrold D.D., Bottomley P.J. Carbon flow from ¹³C-labeled straw and root residues into the phospholipid fatty acids of a soil microbial community under field conditions. *Soil Biol. Biochem.*, 2006, no. 38, p. 759–768.
- Web source
- Stock B.C., Semmer B.X. MixSIAR GUI User Manuel version. 2013. URL: <http://conserver.iugo-cafe.org/user/brice.semmens/MixSIAR> (access date 04.09.2019).

Received 06.04.2020

Revised 14.07.2020

Accepted 06.08.2020

УДК 551.467.3(262.81)

Н.А. Яицкая^{1,2}, А.А. Магаева^{3,4}**ЛЕДОВЫЙ РЕЖИМ СЕВЕРНОГО КАСПИЯ**

На основе базы данных натурных наблюдений выполнен анализ ледовых условий в Северном Каспии и их многолетней динамики в зависимости от суровости зимы. Для всех пунктов наблюдений в Северном Каспии характерно преобладание умеренного типа зим, но значительно изменяется во времени количество суровых и мягких зим. Начиная с 1960-х гг., уменьшается количество суровых и возрастает число мягких зим. Показано, что ледовитость Северного Каспия в суровые зимы в среднем составляет около 75%, в умеренные – 65%, в мягкие – 47%. Среднее значение ледовитости за период 1940–2015 гг. составляет 57%, при этом она сократилась на 11%. Среднеголетняя продолжительность ледового сезона составляет 81–124 дня для пунктов Кулалы и Пешной, соответственно. В мягкие зимы ледообразование начинается на две–три недели позже среднеголетних значений (в некоторые мягкие зимы ледовый период может начинаться на месяц позже среднеголетних значений), а в суровые, наоборот, – на одну–две недели раньше. Настоящее исследование показало, что продолжительность ледового сезона за более чем полвека сократилась от 16 дней в Пешном до 6 дней в Астрахани (в сравнении с другими источниками данных). Разработана и выполнена авторская классификация зимних периодов на основе ряда факторов: типа зим для прибрежных ГМС (суровая, умеренная, мягкая); значения и даты минимальной температуры воздуха для прибрежных ГМС за зимний сезон; среднего значения ледовитости Северного Каспия за сезон (%); начала, конца (даты) и продолжительности ледового сезона (дни). Классификация показала, что в регионе Каспийского моря в 1950–1970-х гг. на всех гидрометеостанциях преобладают суровые зимние периоды, а позднее наблюдается тенденция к увеличению умеренных и мягких. При этом суровые зимние периоды встречаются один–два раза за десятилетие.

Ключевые слова: наблюдения, типизация зим, классификация

Введение. Каспийское море – частично замерзающий водоем. Его ледовый режим зависит от термических и динамических условий, что приводит к значительной пространственно-временной изменчивости ледовых условий. Так, в северной части моря ежегодно образуется лед. Его площадь варьируется в зависимости от температуры конкретной зимы – в особо суровые зимы кромка льда может достигать берегов Махачкалы на западном побережье и Форт-Шевченко на восточном [Яицкая, Глущенко, 2010], а в мягкие – льдом покрываются лишь северные и северо-восточные прибрежные районы Каспийского моря. В средней части водоема ледяной покров занимает незначительную площадь и в мягкие зимы совсем не наблюдается. В южной части Каспия лед появляется лишь в исключительно суровые зимы. Например, зимой 1968/1969 гг. припаем были покрыты Северный и часть Среднего Каспия, а в районе Апшеронского полуострова отмечались плавучие льды (а также в зимы 1928/1929, 1949/1950, 1953/1954, 1971/1972 гг.) [Каспийское ..., 1986; Матишов и др., 2014; Матишов, 2015].

Исследованию ледяного покрова Каспийского моря, условиям его образования, развития, характеристике особенностей ледового режима уделено большое количество работ – статей [Валлер, 1970;

Гюль, 1955; Веселова, 1956] и монографий [Каспийское море, 1986; Гидрометеорология ..., 1992]. Особо стоит отметить цикл работ Бухарицина П.И. [Бухарицин, 1983, 1992, 2006], в которых всесторонне освещен ледовый режим Каспийского моря – от многолетней изменчивости ледяного покрова [Бухарицин, 2008] до воздействия ледяных образований на дно Северного Каспия [Бухарицин, 2010]. На современных данных наблюдений базируются работы [Ивкина, Султанов, 2012; Ивкина, Наурузбаева, 2015; Думанская, 2014], где наряду с анализом пространственно-временной динамики параметров ледового режима приводятся оценки происходящих изменений в связи с флуктуациями климата. Отмечено, что для акватории Каспийского моря характерно увеличение повторяемости умеренных и теплых зим [Ивкина, Наурузбаева, 2015], а в датах начала и конца ледового сезона наблюдается сдвиг в сторону более поздних и более ранних соответственно.

В связи с этим целью настоящей работы стало исследование многолетней динамики ледового режима северной части Каспийского моря, в ходе которого на основе данных натурных наблюдений, аэрофотосъемки и результатов дистанционного зондирования Земли выполнена типизация зим по сте-

¹ ФИЦ Субтропический научный центр РАН, заместитель директора по науке, канд. геогр. н.; e-mail: yaitskayan@gmail.com.

² ФИЦ Южный научный центр РАН, лаборатория информационных технологий и математического моделирования, вед. науч. с., канд. геогр. н.

³ ФИЦ Южный научный центр РАН, лаборатория информационных технологий и математического моделирования, мл. науч. с.; e-mail: a.magaeva@mail.ru.

⁴ Южный федеральный университет, Институт наук о Земле, кафедра океанологии, мл. науч. с.

пени суровости, проанализированы основные характеристики ледового режима моря – ледовитость, даты начала, окончания и продолжительность ледового сезона. Разработана и реализована классификация зимних периодов, которая учитывает многолетнюю динамику основных характеристик ледового режима Северного Каспия (значение и дата минимальной температуры воздуха для прибрежных гидрометеостанций (ГМС) за зимний сезон; среднее значение ледовитости за сезон; начало, конец и продолжительность ледового сезона на ГМС), а также суровость зимы. Такой подход позволил получить более объективные оценки многолетних изменений зимних условий в Северном Каспии.

Материалы и методы исследования. Информационной основой исследования ледового режима Каспийского моря служила геоинформационная система (ГИС) «Ледовый режим южных морей России» [Яицкая, Салтановская, 2013; Магаева и др., 2015]. ГИС разработана как уникальная среда для сбора, хранения, накопления, быстрого доступа к данным, их совместного использования и различных манипуляций [Яицкая, Салтановская, 2013]. ГИС содержит информацию о ледовых характеристиках в Азовском, Черном и Каспийском морях за период 1810–2019 гг.:

- картографические данные. Представлены картосхемами и векторными данными (формата *.shp) ледовой обстановки в морях за период 1959–2019 гг. с обозначением положения кромки льда, форм плавающего льда, сплоченности льда в баллах – всего 499 картосхем;

- табличные (численные) данные – результаты многолетних наблюдений (1810–2019 гг.) за характеристиками ледового режима на пяти прибрежных метеопунктах (Астрахань, Пешной, Искусственный, Тюлений, Кулалы).

Пространственно-распределенная информация хранится в базе геоданных, которая поддерживает хранение и управление географической информацией в сводных таблицах стандартных систем управления базами данных.

При исследовании многолетней динамики характеристик ледяного покрова Северного Каспия рассматривались следующие: площадь ледяного покрова (км²); даты начала и конца ледового сезона и его продолжительность на гидрометеостанциях (ГМС) (дни).

Типизация зим по степени суровости. Для определения суровости зим использованы среднесуточные данные наблюдений за температурой воздуха в зимние сезоны (декабрь–март) 1881–2015 гг. (с некоторыми перерывами в периоды Гражданской и Великой отечественной войн) на ГМС: Астрахань, Атырау, Лагань, Тюлений, Форт-Шевченко. Информация получена из открытого архива данных ВНИИГМИ-МЦД [Булыгина и др., 2018].

Для оценки зим по степени суровости использован метод А.Н. Лебедева и Г.П. Писаревой, представленный в [Гидрометеорологический ..., 1962]. Авторы методики для определения критериев суровости зим используют среднемесячные значения

температуры воздуха за зимний период (декабрь–март) на трех прибрежных ГМС Азовского моря: Таганрог, Геническ, Керчь за период 1883–1958 гг. Наибольшие отклонения от средней многолетней суммы температур за зимний период как в сторону максимальных, так и в сторону минимальных делит на три равные части, которые характеризуют мягкие, умеренные и суровые зимы. Рассматриваемая методика является универсальной и может быть использована для других акваторий [Яицкая, Магаева, 2018].

Классификация зимних периодов. В основу классификации положены следующие факторы: 1) среднее значение ледовитости (%) Северного Каспия за сезон; 2) значение и дата минимальной температуры воздуха для прибрежных ГМС за зимний сезон (Астрахань, Атырау, Лагань, Тюлений, Форт-Шевченко); 3) тип зимы для прибрежных ГМС (суровая, умеренная, мягкая); 4) начало, конец (даты) и продолжительность ледового сезона (дни) в пунктах наблюдений Астрахань, Пешной, Искусственный, Тюлений, Кулалы.

Классификация проводилась путём вычисления отклонений от среднемноголетних значений каждого параметра. Наибольшие отклонения как в сторону максимальных, так и в сторону минимальных значений делились на три равные части, которые определяют положительные и отрицательные аномалии, а также значения в пределах нормы. Позже им были присвоены баллы: «1» для положительной аномалии; «0» для значений, находящихся в пределах нормы; «–1» для отрицательной аномалии. Присвоение результирующего класса осуществлялось по суммарному числу баллов (максимум семь). В некоторых случаях при выделении итоговых классов суммарный показатель зимних периодов находился в пределах пограничных значений, что затрудняло присвоение конкретного класса. В таких случаях дополнительно рассматривались данные о суровости зимы в северокаспийском регионе. Подробное описание методики и примеры расчётов представлены в работе [Магаева, Яицкая, 2017].

Результаты и обсуждение. Типизация зим. Оценить межгодовую динамику температурных условий в регионе можно на основе типизации зим по степени суровости. Определение типов зим является ключевым параметром не только при анализе ледового режима морей, но и для оценки климатических изменений. Чередование суровых и мягких зим может говорить о цикличности климата, что отмечается в работах [Матишов и др., 2010; Матишов и др., 2014].

Для всех пунктов наблюдений в Северном Каспии характерно преобладание умеренного типа зим (табл. 1). Значительно изменяется во времени количество суровых и мягких зим. Так, начиная с 1960-х гг., уменьшается количество суровых зим, при этом возрастает число мягких (рис. 1). Такая тенденция наблюдается на ГМС Лагань и Тюлений. В пунктах Астрахань и Атырау, суровые зимы наблюдаются еще реже: с 1990-х гг. примерно раз в 8–12 лет.

Таблица 1

Критерии суровости и количество зим различного типа для пунктов метеонаблюдений в Северном Каспии

Пункт	Суровая			Умеренная			Мягкая		
	$\Sigma t_{\text{взлх.}}, ^\circ\text{C}$	Кол-во зим	Доля зим (%)	$\Sigma t_{\text{взлх.}}, ^\circ\text{C}$	Кол-во зим	Доля зим (%)	$\Sigma t_{\text{взлх.}}, ^\circ\text{C}$	Кол-во зим	Доля зим (%)
Атырау (1892–2015 гг.)	$\leq -31,6$	23	19,3	от $-31,6$ до $-15,2$	66	55,5	$\geq -15,2$	30	25,2
Астрахань (1881–2015 гг.)	$\leq -21,3$	23	17,7	от $-21,3$ до $-5,9$	77	59,2	$\geq -5,9$	30	23,1
Лагань (1959–2015 гг.)	$\leq -10,7$	10	18,2	от $-10,7$ до $0,1$	28	50,9	$\geq 0,1$	17	30,9
Форт–Шевченко (1950–2015 гг.)	$\leq -4,5$	10	15,9	от $-4,5$ до $6,7$	35	55,5	$\geq 6,7$	18	28,6
Тюлений (1959–2015 гг.)	$\leq -3,1$	10	18,6	от $-3,1$ до $6,6$	30	55,5	$\geq 6,6$	14	25,9

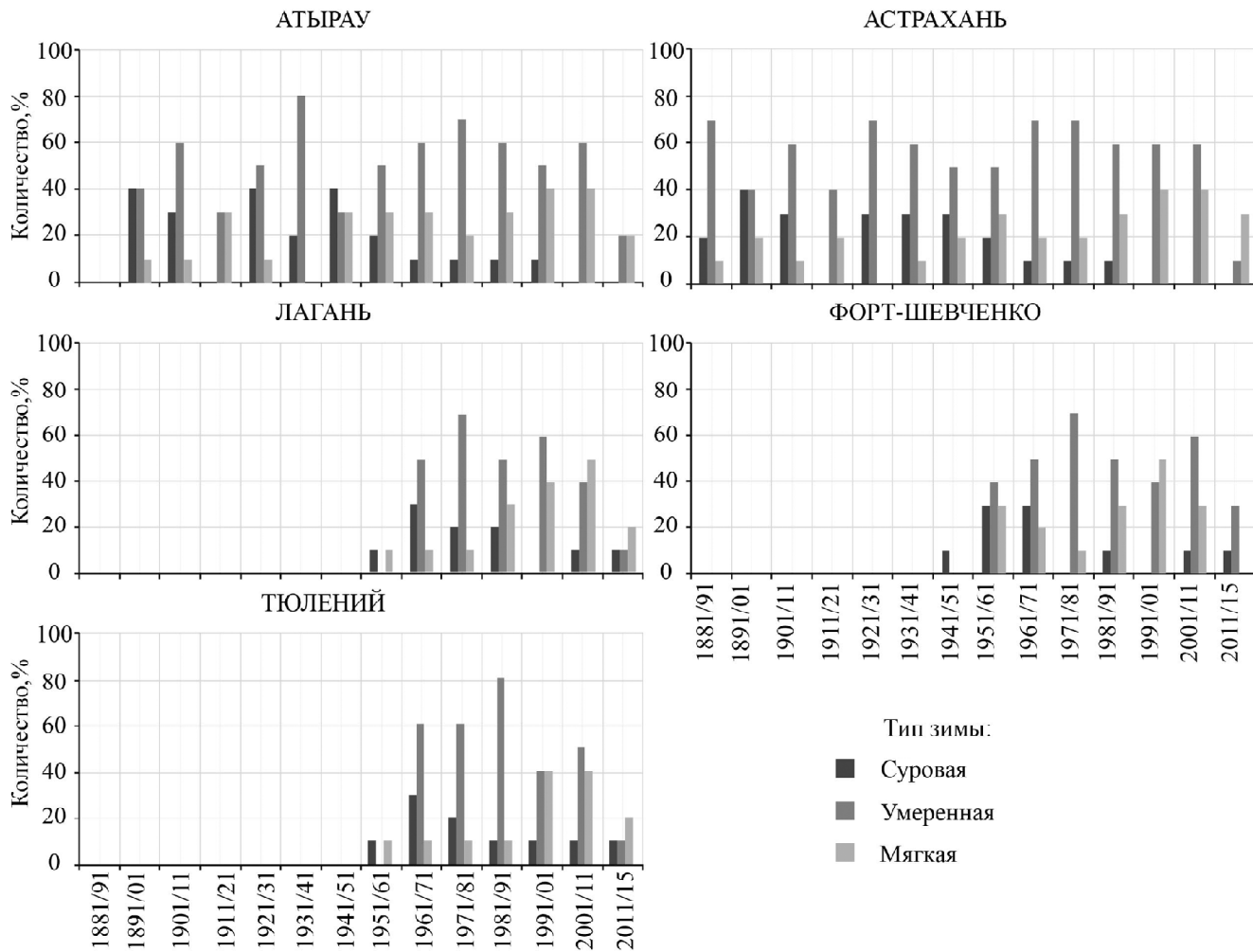


Рис. 1. Междесятилетнее изменение количества зим разной суровости для пунктов наблюдений Северного Каспия

Fig. 1. Interdecadal dynamics of the numbers of winters with different severity for the Northern Caspian observation points

Стоит отметить, что полученные результаты в сравнении с ранее выполненными работами отражают происходящие климатические изменения в регионе. Например, в работе [Бухарицин, 2006] выполнена типизация зим по степени суровости путем расчета суммы градусо-дней мороза за холодный период по п. Астрахань – подсчитана повторяемость очень суровых и суровых зим за период 1924–2006 гг. Было зарегистрировано восемь очень суровых (10%), девять суровых (11%) и 65 мягких и умеренных зим (79%). Таким образом, повторяемость очень суровых зим составила за весь период наблюдений один раз в 10 лет, а повторяемость суровых зим — один раз в 5 лет. Типизация зим, выполненная в ходе настоящего исследования, показала, что количество суровых зим в п. Астрахань за период 1982–2015 гг. составляет двадцать три (19,3%) и сто семь мягких и умеренных (82,3%).

Самой суровой зимой в Северном Каспии за XX–XXI вв. является зима 1953/1954 гг., когда сумма температур составила $-38,4^{\circ}\text{C}$ для Астрахани и $-49,2^{\circ}\text{C}$ для Атырау. Абсолютный минимум температуры воздуха наблюдался в Атырау 2 февраля 1954 г. и составил $-37,4^{\circ}\text{C}$.

Самой мягкой в Астрахани и Атырау была зима 1913/1914 гг. Суммы среднемесячных температур воздуха здесь составили 7,9 и $1,0^{\circ}\text{C}$, соответственно. Абсолютный максимум $24,0^{\circ}\text{C}$ наблюдался в Астрахани 29 марта 1914 г. Для пункта Тюлений самой мягкой стала зима 2003/2004 гг., когда сумма температур составила $14,5^{\circ}\text{C}$; для Лагани – зима 1999/2000 гг. при сумме температур $8,8^{\circ}\text{C}$; для Форт-Шевченко – зима 1965/1966 гг. при сумме температур $15,7^{\circ}\text{C}$.

Увеличение повторяемости умеренных и мягких зим несомненно оказывает влияние на ледовый режим водоема. Так, в работе [Лобанов, Наурызбаева, 2018] показано, что сумма отрицательных значений температуры за холодный период уменьшается, что в результате приводит к уменьшению максимальной толщины льда на Северном Каспии. Необходимо отметить, что такая тенденция не говорит об общем потеплении в регионе, т.к. тип зимы

по степени суровости не является точным показателем ледовых условий. Даже в умеренные и мягкие зимы возникают тяжелые ледовые условия, когда толщина ровного, не наслоенного льда не превышает 10–15 см [Бухарицин, 1984]. Поэтому для более точной оценки выполнен комплексный анализ всех составляющих ледового режима (ледовитость, начало, конец и продолжительность ледового сезона, дата минимальной температуры воздуха и др.).

Ледовый режим. При среднемноголетних климатических условиях процесс ледообразования в Северном Каспии начинается с мелководных прибрежных участков во второй половине ноября в районе о. Пешной (23 ноября) (20 ноября по данным [Думанская, 2014]). Затем лед распространяется на запад, охватывая одновременно мелководные участки и предустьевое взморье р. Волги. В районе о. Искусственный лед появляется в среднем 29 ноября. В течение декабря процесс ледообразования охватывает южные районы Северного Каспия – о. Тюлений – 13 декабря, о. Кулалы – 19 декабря. В Астрахани ледообразование в среднем начинается 14 декабря (табл. 2).

Начало и конец ледового сезона могут сдвигаться как на более ранние, так и на более поздние сроки. Так, во время активности широтных процессов в Европе, в том числе на юге Европейской территории России, Кавказе и Каспийском море, наблюдаются мягкие зимы [Соловьев, 1973]. В такие периоды ледообразование начинается позже обычного на несколько недель (табл. 3). По данным настоящего исследования это зимы 1954/1955, 1980/1981, 2003/2004, 2014/2015 гг.

При меридиональной активности холодный воздух из арктического бассейна чаще проникает далеко к югу, обуславливая резкие и длительные похолодания, снегопады, а также быстрое развитие ледовых процессов [Соловьев, 1973]. Усиление меридиональной циркуляции приводит к увеличению повторяемости суровых зим, как в 1953/1954, 1968/1969, 1984/1985 гг. и др. Первое появление льда в такие зимы отмечается на одну–две недели раньше, чем в умеренные или мягкие зимы (см. табл. 3), а

Таблица 2

Среднемноголетние даты наступления ледовых фаз в пунктах Северного Каспия по данным настоящего исследования

Пункт и период наблюдений	Дата появления льда			Дата очищения ото льда			Продолжительность ледового периода		
	Средняя	Ранняя	Поздняя	Средняя	Ранняя	Поздняя	Средняя	Максимальная	Минимальная
Пешной (1938–2015 гг.)	23,11	17,10	28,12	26,03	1,03	20,04	124	179	43
Искусственный (1941–2015 гг.)	29,11	26,10	11,01	18,03	12,02	17,04	109	155	43
Тюлений (1940–2015 гг.)	13,12	31,10	9,02	12,03	22,01	11,04	90	144	14
Астрахань (1804–2015 гг.)	14,12	13,11	27,01	21,03	25,02	18,04	99	148	31
Кулалы (1959–2015 гг.)	19,12	13,11	26,02	10,03	10,02	1,04	81	129	8

Таблица 3

Среднемноголетние даты наступления ледовых фаз в различные по типу зимы

Пункт	Суровая			Умеренная			Мягкая		
	Начало	Конец	Продолжительность	Начало	Конец	Продолжительность	Начало	Конец	Продолжительность
Пешной (1938–2015 гг.)	13.11	09.04	148	25.11	31.03	127	26.11	12.03	107
Искусственный (1941–2015 гг.)	28.11	04.04	130	29.11	21.03	113	04.12	03.03	91
Тюлений (1940–2015 гг.)	08.12	31.03	115	12.12	16.03	95	21.12	22.02	64
Астрахань (1804–2015 гг.)	09.12	05.04	120	14.12	22.03	99	26.12	06.03	71
Кулалы (1959–2015 гг.)	13.12	29.03	107	15.12	14.03	127	05.12	26.02	53

ледообразование часто происходит при глубоком затоплении арктического воздуха, сопровождающемся резким понижением температуры и штормовыми ветрами северных направлений [Каспийское ..., 1986].

Среднемноголетние значения продолжительности ледового сезона в пунктах наблюдений Северного Каспия по литературным данным различны (в зависимости от длительности ряда наблюдений; табл. 4). Настоящее исследование показало, что продолжительность ледового сезона за более чем полвека сократилась от 16 дней в Пешном до 6 дней в Астрахани (в сравнении с другими источниками данных).

Ледовитость Северного Каспия зависит от термических и динамических условий и изменяется в широком диапазоне от 30 до 85% (зимы 1999/2000 гг. и 1953/1954 гг., соответственно) [Магаева, 2017]. Среднее значение ледовитости за период 1940–2015 гг. составляет 57%.

Настоящее исследование показало, что ледовитость Северного Каспия в суровые зимы в сред-

нем составляет около 75%, в умеренные – 60%, в мягкие – 47% (рис. 2). За период с 1940 по 2015 гг. ледовитость Северного Каспия уменьшилась на 11%.

Классификация зимних периодов. В результате классификации выделено три класса зимних условий, описание которых представлено ниже.

Класс «–1» – суровые зимние условия. Для данного класса характерна увеличенная продолжительность ледового сезона, начало которого является ранним или в пределах среднемноголетних значений. Для всех зимних периодов данного класса характерно позднее очищение акватории ото льда. Минимальные суммы, а также самые низкие отрицательные среднесуточные температуры воздуха соответствуют этому классу. Ледовитость моря достигает максимальных значений и в среднем составляет 74%.

Класс «0» – умеренные зимние условия. Все параметры находятся в пределах среднемноголетних значений или имеют небольшие отклонения от них.

Класс «1» – мягкие зимние условия. Отличительная особенность класса – непродолжительный

Таблица 4

Продолжительность ледового сезона в пунктах наблюдений Каспийского моря

Пункт наблюдений	Продолжительность ледостава, дни			
	По данным [Думанская, 2014]	По данным [Бухарицин, 2008] (период наблюдений не указан)	По данным [Водный ..., 1971] (период наблюдений не указан)	Настоящее исследование
Пешной	н/с	140	126	124 (1938–2015 гг.)
Искусственный	111 (1941–2012 гг.)	106	120	109 (1941–2015 гг.)
Тюлений	85 (1939–2012 гг.)	66	98	90 (1940–2015 гг.)
Астрахань	н/с	97	105	99 (1804–2015 гг.)
Кулалы	89 (1939–2012 гг.)	67	87	81 (1959–2015 гг.)

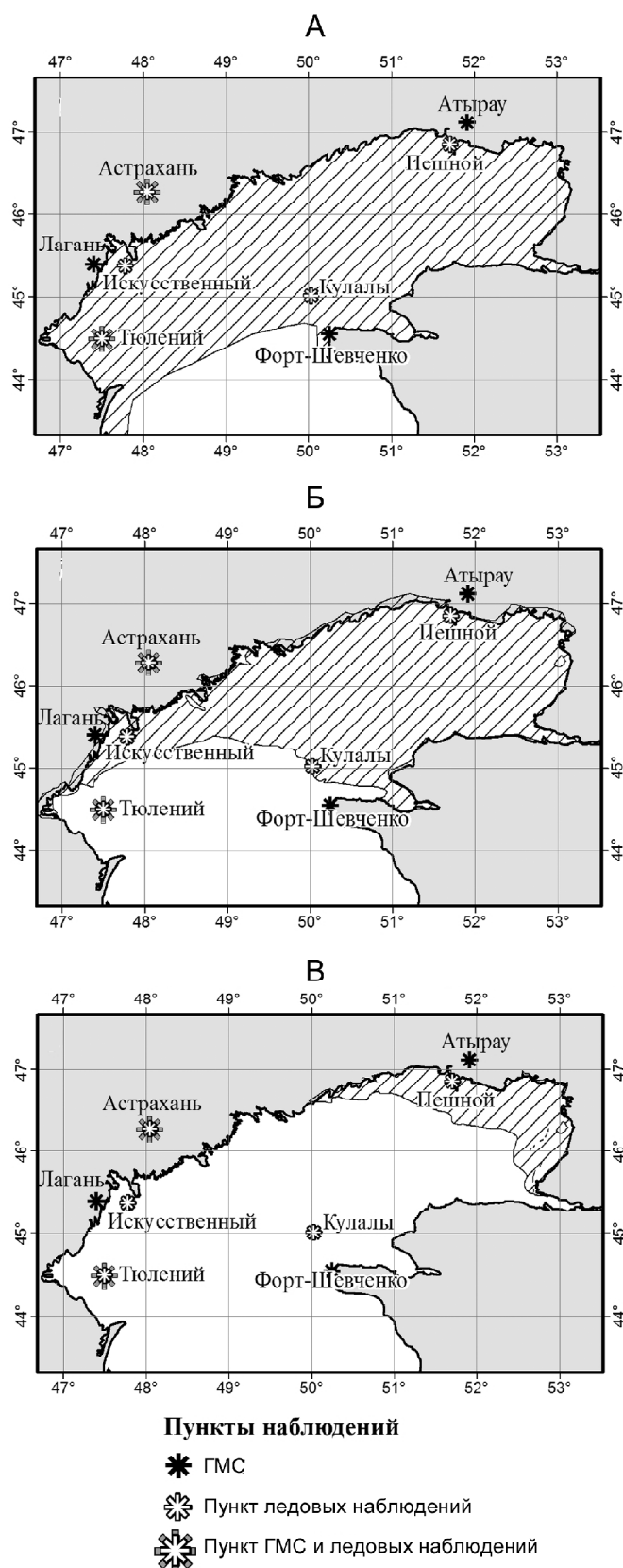


Рис. 2. Картограмма ледяного покрова Северного Каспия (положение кромки льда по данным [Думанская, 2014; <http://www.aari.ru/>]) А – в суровую зиму 1953/1954 гг.; Б – в умеренную зиму 2009/2010 гг.; В – в мягкую зиму 2006/2007 гг.

Fig.2. Schematic map of ice cover of the Northern Caspian (ice edge position according to [Dumanskaya, 2014; <http://www.aari.ru/>]): А – in severe winter 1953/1954; Б – in moderately cold winter 2009/2010; В – in mild winter 2006/2007

период ледового сезона и раннее очищение акватории ото льда. Сумма температур зачастую положительная (в зависимости от рассматриваемого пункта). Максимальные положительные зимние температуры воздуха соответствуют этому классу.

Важно отметить, что для определения итогового класса использовался весь комплекс приведенных выше параметров, при этом их количественные характеристики могли значительно варьироваться. Это свойственно для умеренного класса, когда некоторые ледовые характеристики имели отрицательную аномалию, но с учетом других параметров зимний период относился к умеренному.

За исследуемый период во всех пунктах наблюдений преобладали умеренные зимы (класс «0», табл. 5), варьировалось соотношение суровых (класс «-1») и мягких (класс «1») зим. До 1970-х гг. суровые зимы преобладали везде (рис. 3), а с 1980 по 1989 гг. отмечались в Искусственном, Тюленьем и Кулалы. Затем их количество значительно сократилось в сравнении с остальными десятилетиями. Увеличение количества мягких зим наблюдалось с начала 2000-х гг.

Выводы:

- типизация зим по степени суровости показала, что в целом в Каспийском регионе преобладают умеренные зимы – около 55%. Во второй половине XX в. – начале XXI в. наблюдается сокращение числа суровых зим и увеличение количества мягких. Связь с такими компонентами ледового режима, как ледовитость и продолжительность ледового сезона отражается в изменении этих характеристик в зависимости от типа зимы. Так, ледовитость моря в суровые зимы в среднем составляет около 76%, в умеренные – около 65%, в мягкие – около 47%. Продолжительность ледового сезона в суровые зимы по сравнению с мягкими увеличивается на 39–54 дня (в Искусственном и Кулалы, соответственно);

- среднеегодовое значение ледовитости за исследуемый период составляет 57%, уточнено значение средней продолжительности ледового сезона – 81–124 дня для пунктов Кулалы и Пешной соответственно. Так, по сравнению с литературными источниками [Думанская, 2014; Бухарицин, 2008, Водный ..., 1971] продолжительность ледового сезона сократилась от 16 дней в пункте Пешной до 6 дней в пункте Астрахань;

- выполнена классификация зимних периодов на основе ряда факторов: типы зим для прибрежных ГМС (суровая, умеренная, мягкая); значение и дата минимальной температуры воздуха для прибрежных ГМС за зимний сезон; среднее значение ледовитости Северного Каспия за сезон, %; начало, конец (даты) и продолжительность ледового сезона (дни). Показано, что с 1950 по 1990 гг. в Северном Каспии преобладают суровые зимы, для которых характерны низкие отрицательные среднесуточные температуры воздуха, а также увеличенная продолжительность ледового сезона. Начиная с 1990-х гг., увеличивается количество мягких зим, когда ледовый период непродолжителен.

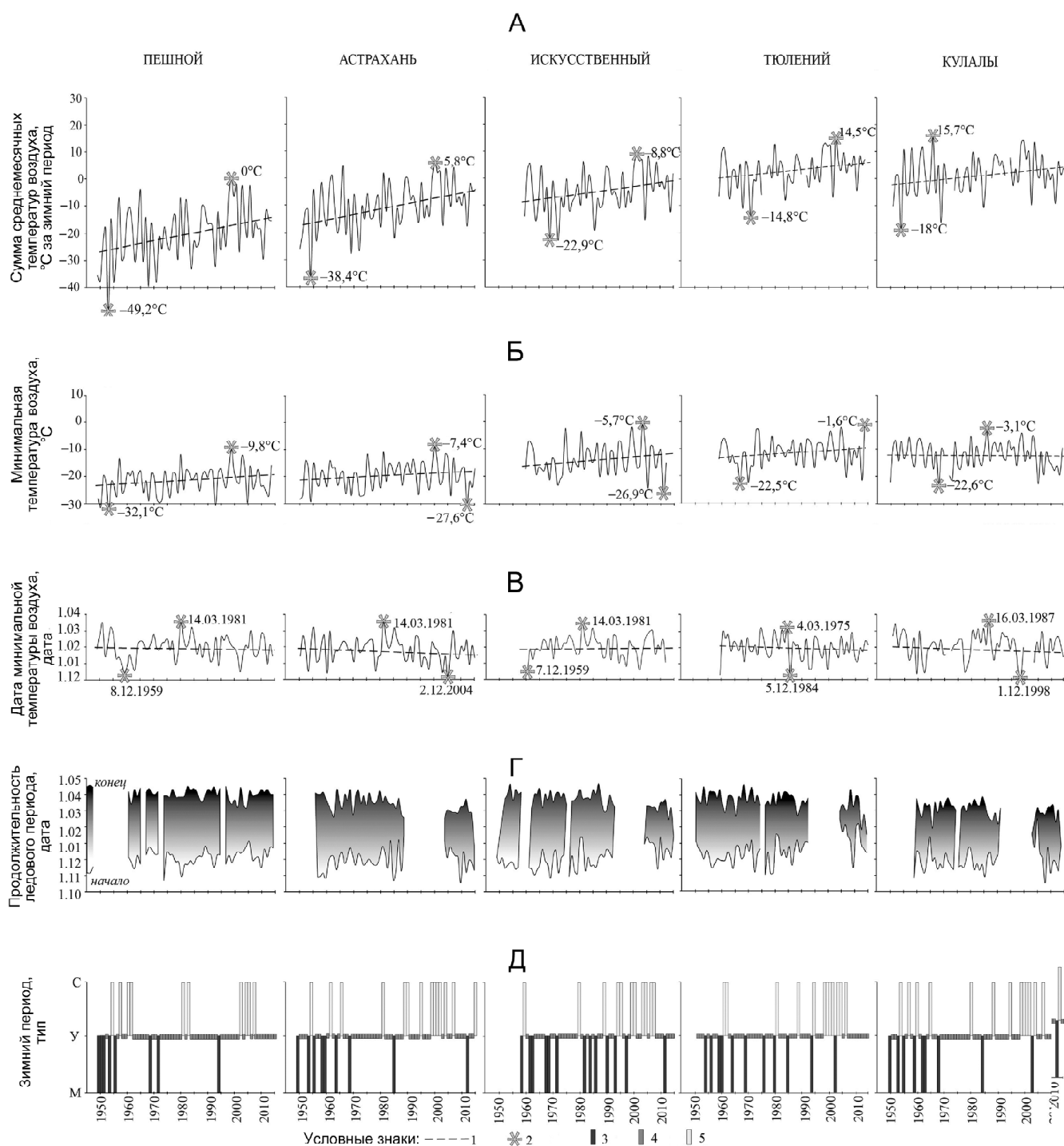


Рис. 3. Классификация зимних периодов по ледовым характеристикам для пунктов Северного Каспия за 1950–2015 гг.: А – сумма средних месячных температур воздуха (°C) за зимний период; Б – минимальная температура воздуха (°C), отмеченная в зимний сезон (декабрь–март); В – дата минимальной температуры воздуха, отмеченной за зимний сезон (декабрь–март); Г – продолжительность ледового периода; Д – класс зимнего периода; 1 – линия тренда, 2 – максимальные и минимальные значения параметров, тип зимнего периода: 3 – суровый, 4 – умеренный, 5 – мягкий

Fig.3. Classification of winter periods by ice characteristics for the Northern Caspian observation points during 1950–2015: А – sum of average air temperatures (°C) for winter period; Б – minimum air temperature (°C) recorded in winter season (December–March); В – date of the minimum air temperature recorded in winter season (December–March); Г – duration of ice period, days; Д – type of winter period; 1 – trend line; 2 – maximum and minimum values of parameters; types of winter: 3 – severe, 4 – moderate, 5 – mild

Таблица 5

Классы зимних периодов прибрежных ГМС Северного Каспия

Класс/Пункт	Пешной (1950–2015)		Астрахань (1950–2015)		Искусственный (1950–2015)		Тюлений (1950–2015)		Кулалы (1950–2015)	
	Кол-во	%	Кол-во	%	Кол-во	%	Кол-во	%	Кол-во	%
Класс «–1»	7	10,8	8	12,3	13	23,6	11	16,9	10	15,4
Класс «0»	48	73,8	43	66,2	31	56,4	42	64,6	41	63
Класс «1»	10	15,4	14	21,5	11	20	12	18,5	14	21,6

Благодарности. Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № гр. проекта 01201363188 и при финансовой поддержке РФФИ и РГО в рамках научного проекта №17-05-41190 РГО_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бухарицин П.И. Влияние дрейфующих льдов на формирование рельефа дна и состава донных отложений мелководных районов Северного Каспия // Научно-технический журнал. Геология, география и глобальная энергия. 2010. № 2. С. 98–101.
- Бухарицин П.И. Сравнительные характеристики многолетней изменчивости ледяного покрова северной части Каспийского и Азовского морей // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2008. № 3. С. 207–213.
- Бухарицин П.И. Ледовые условия на Северном Каспии // Южно-российский вестник геологии, географии и глобальной энергии. 2006. № 5. С. 64–67.
- Бухарицин П.И. Метод расчета и прогноза толщины наслоенного льда в открытых районах Северного Каспия // Водные ресурсы. 1992. № 5. С. 60–64.
- Бухарицин П.И. Особенности процессов торошения ледяного покрова северной части Каспийского моря // Водные ресурсы. 1984. № 6. С. 115–123.
- Бухарицин П.И. Использование снимков ИСЗ «Метеор» для изучения ледовой обстановки на Северном Каспии // Тр. ГМЦ. 1983. Вып. 255. С. 70–75.
- Валлер Ф.И. Некоторые черты ледового режима северной части Каспийского моря // Сб. работ Астрах. ГМО. 1970. Вып. 1. С. 103–112.
- Веселова Л.Е. Ледяной покров Каспийского моря, условия его образования и развития // Труды ГОИН. 1956. Вып. 24. С. 56–127.
- Водный кадастр СССР. Каспийское море, 1971.
- Гидрометеорологический справочник Азовского моря. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 853 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. VI. Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 360 с.
- Гюль К.К. Состояние изученности ледового режима Каспийского моря и перспективы его дальнейшего изучения // Исследования льдов южных морей СССР: Сборник статей. 1973. С. 7–18.
- Думанская И.О. Ледовые условия морей европейской части России // М.: ИГ–СОЦИН, 2014. 605 с.
- Ивкина Н.И., Наурузбаева Ж.К. Изменение характеристик ледового режима казахстанской части Каспийского моря в связи с изменением климата // Гидрометеорология и экология. 2015. № 2 (77). С. 28–35.
- Ивкина Н.И., Султанов Н.К. Особенности ледообразования в северо-восточной части Каспийского моря // Экология. 2012. № 4. С. 42–51.
- Каспийское море. Гидрология и гидрохимия. / Под ред. С.С. Байдина, А.Н. Косарева. М.: Наука, 1986. 261 с.
- Лобанов В.А., Наурузбаева Ж.К. Климатические изменения толщины льда на северном Каспии // Учен. зап. КГМУ. 2018. № 53. С. 172.
- Магаева А.А. Предварительный анализ параметров ледового режима Каспийского моря // XIII Ежегодная молодежная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Исследования и разработки передовых научных направлений»: тезисы докладов (г. Ростов-на-Дону, 17–27 апреля 2017 г.). Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2017. С. 46–47.
- Магаева А.А., Яицкая Н.А. Классификация зимних периодов в зависимости от ледовых условий в Азовском море // Материалы междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Теория и практика современных географических исследований», посвященной 220-летию выдающегося русского мореплавателя, географа, вице-председателя Русского географического общества Ф.П. Литке в рамках XIII Большого географического фестиваля. СПб.: Свое издательство, 2017. С. 84–87.
- Магаева А.А., Яицкая Н.А., Лихтанская Н.В., Дашкевич Л.В. Развитие геоинформационной системы ледового режима южных морей России // Экология. Экономика. Информатика. Сб. статей в 3 т. Т. 3: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2015. С. 269–275.
- Матишов Г.Г. Климат и океанографические исследования северных и южных морей // Вестник Кольского научного центра РАН. 2015. № 2(21). С. 11–19.
- Матишов Г.Г., Дженюк С.Л., Моисеев Д. В., Жичкин А.П. О природе крупных гидрометеорологических аномалий в арктических и южных морях России // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2014. № 1. С. 36–46.
- Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Гарзона Ю.М., Дашкевич Л.В. Замерзание Азовского моря и климат в начале XXI века // Наука Юга России. 2010. Т. 6. № 1. С. 33–40.
- Соловьев Д.В. Некоторые особенности ледообразования на Каспийском море и синоптические процессы, их обуславливающие // Исследование льдов южных морей СССР. М.: Наука, 1973. С. 52–56.
- Яицкая Н.А., Глущенко В.В. Исследование ледовой обстановки Северного Каспия с помощью данных спутникового мониторинга // III конференция «Геоинформационные технологии и космический мониторинг» (8–10 сентября 2010 г.). Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2010. С. 140–146.

Яицкая Н.А., Магаева А.А. Динамика ледового режима Азовского моря в XX–XXI вв. Лед и снег. 2018. № 58(3). С. 373–386. DOI: 10.15356/2076-6734-2018-3-373-386.

Яицкая Н.А., Салтановская Е.В. Геоинформационная система ледового режима южных морей России // Экология, экономика, информатика. Т. 2: Геоинформационные науки и экологическое развитие: новые подходы, методы, технологии. Геоинформационные технологии и космический мониторинг (п. Абрао-Дюрсо, 8–13 сентября 2013 г.). Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2013. С. 217–219.

Электронные ресурсы

Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт. URL: <http://www.aari.ru/> (дата обращения 30.10.2018).

Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швеиц Н.В. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485. URL: <http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных> (дата обращения 25.09.2018).

Поступила в редакцию 22.11.2018

После доработки 16.05.2020

Принята к публикации 06.08.2020

N.A. Yaitskaya^{1,2}, A.A. Magaeva^{3,4}

ICE REGIME OF THE NORTHERN CASPIAN

Ice conditions of the Northern Caspian and their long-term dynamics depending on winter severity were analyzed basing on the observation data. Moderate types of winters prevail, but the number of severe and mild winters varies. Since the 1960s, the number of severe winters decreases, while the number of mild winters is on the increase. Ice covers about 75,5% of the Northern Caspian in severe winters, 65,1% in moderate, and 47,2% in mild winters. Average ice cover for the period 1940–2015 is 57%, however the ice cover decreased by 11%. The average long-term duration of the ice season is 81–124 days for the Kulaly and Peshnoye observation points, respectively. In mild winters ice formation begins few weeks later than the long-term average (sometimes a month later), and in severe winters 1 to 2 weeks earlier. The study showed that the ice season became shorter by 16 days in Peshnoye and 6 days in Astrakhan (in comparison with other data sources). Original classification of winter periods has been elaborated and performed basing on a number of factors: types of winters for coastal station (severe, moderate, mild); value and date of the minimum air temperature for coastal stations during winter season; average value of ice coverage of the North Caspian for the season (%); start and end dates and duration of the ice season (days). The classification suggests that during the 1950s – 1970s severe winter periods prevailed at all weather stations of the Caspian Sea region. After the 1970s moderate and mild winter periods showed an increasing tendency while severe winter periods occurred once-twice a decade.

Key words: observations, winter types, classification

Acknowledgements. The paper was prepared under the framework of the implementation of the state assignment of the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (project no. 01201363188) and financially supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Russian Geographical Society (project no. 1705-41190 PGO_a).

REFERENCES

Buharicin P.I. Ledovye usloviya na Severnom Kaspii [Ice conditions in the Northern Caspian]. *Yuzhno-rossijskij vestnik geologii, geografii i global'noj ehnergii*, 2006, no. 5, p. 64–67. (In Russian).

Buharicin P.I. Metod rascheta i prognoza tolshchiny nasloennogo l'da v otkrytyh rajonah Severnogo Kaspiya [Method for Calculation and Prediction of the Ice Layer Thickness in the Open Areas of the Northern Caspian Sea]. *Vodnye resursy*, 1992, no. 5, p. 60–64. (In Russian)

Buharicin P.I. Sravnitel'nye harakteristiki mnogoletnej izmenchivosti ledyanogo pokrova severnoj chasti Kaspijskogo i Azovskogo morej [Comparative characteristics of the long-term

variability of ice cover in the northern part of the Caspian and Azov seas]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2008, no. 3, p. 207–213. (In Russian)

Buharicin P.I. Vliyanie drejfyuschih l'dov na formirovanie rel'efa dna i sostava donnyh otlozhenij melkovodnyh rajonov Severnogo Kaspiya [Influence of drifting ice on the formation of the bottom relief and composition of bottom sediments of shallow areas of the Northern Caspian]. *Nauchno-tekhnicheskij zhurnal. Geologiya, geografiya i global'naya ehnergiya*, 2010, no. 2, p. 98–101. (In Russian)

Buharicin P.I. Ispol'zovanie snimkov ISZ «Meteor» dlya izucheniya ledovoj obstanovki na Severnom Kaspii [Using the

¹ The Subtropical Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Research, PhD in Geography; e-mail: yaitskayan@gmail.com;

² Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Information Technologies and Mathematical Modeling, Leading Scientific Researcher, PhD in Geography

³ Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Information Technologies and Mathematical Modeling, Junior Scientific Researcher; e-mail: a.magaeva@mail.ru.

⁴ South Federal University, Institute of Earth Sciences, Department of Oceanology, Junior Scientific Researcher

Meteor satellite images to study the ice situation in the Northern Caspian]. *Trudy GMC*, 1983, iss. 255, p. 70–75. (In Russian)

Dumanskaya I.O. *Ledovye usloviya morej evropejskoj chasti Rossii*. [Ice conditions of the seas of the European part of Russia]. Moscow, IG SOTSIN Publ., 2014, 608 p. (In Russian)

Gidrometeorologicheskij spravochnik Azovskogo morya. [Hydrometeorological directory of the Sea of Azov]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1962, 853 p. (In Russian)

Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morej. T. VI Kaspijskoe more. Vypusk 1. Hidrometeorologicheskie usloviya. [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas, vol. VI. Caspian Sea, iss. 1. Hydrometeorological conditions]. Sankt-Peterburg, Gidrometeoizdat Publ., 1992, 360 p. (in Russian)

Gyul' K.K. [The state of knowledge of the ice regime of the Caspian Sea and the prospects for its further study] *Issledovaniya l'dov yuzhnyh morej SSSR* [Investigations of ice in the southern seas of the USSR]. Moscow, Nauka Publ., 1973, p. 7–18. (In Russian)

Ivkina N.I., Naurozbaeva Zh.K. *Izmenenie harakteristik ledovogo rezhima kazhanskogo chasti Kaspijskogo morya v svyazi s izmeneniyem klimata* [Variation of the ice regime characteristics at the Kazakhstan's part of the Caspian Sea by climate change]. *Gidrometeorologiya i ekologiya*, 2015, no. 2(77), p. 28–35. (In Russian)

Ivkina N.I., Sultanov N.K. *Osobennosti ledoobrazovaniya v severo-vostochnoj chasti Kaspijskogo morya* [Specific features of ice formation in the north-eastern part of the Caspian Sea]. *Gidrometeorologiya i ekologiya*, 2012, no. 4, p. 42–51. (In Russian)

Kaspijskoe more. Hidrologiya i gidrokhimiya. [The Caspian Sea: Hydrology and Hydrochemistry]. S.S. Bajdin and A.N. Kosarev (Eds). Moscow, Nauka Publ., 1986, 261 p. (In Russian)

Lobanov V.A., Naurozbaeva Zh.K. *Klimaticheskie izmeneniya tolschiny l'da na severnom Kaspii* [Climate changes of ice thickness on the Northern Caspian]. *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*, 2018, iss. 53, p. 172–187. (In Russian)

Magaeva A.A. [Preliminary analysis of ice regime parameters of the Caspian Sea] *Issledovaniya i razrabotki peredovyh nauchnyh napravlenij* [Research and development works in the advanced scientific fields]. XIII Ezhegodnaya molodezhnaya nauchnaya konferenciya studentov, aspirantov i molodyh uchenykh: tezisy dokladov (g. Rostov-na-Donu, 17–27 aprelya 2017 g.). Rostov-na-Donu, YUNC RAN Publ., 2017, p. 46–47. (In Russian)

Magaeva A.A., Yaitskaya N.A. [Classification of winter periods depending on ice conditions in the Sea of Azov]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Teoriya i praktika sovremennykh geograficheskikh issledovaniy»* [Materials of the international scientific and practical conf. of students, graduate students and young scientists «Theory and practice of modern geographical research»]. Sankt-Petersburg, 2017, p. 84–87. (In Russian)

Magaeva A.A., Yaitskaya N.A., Likhtanskaya N.V., Dashkevich L.V. [Elaboration of a geoinformation system of the Russian southern seas ice conditions]. *Ekologiya, ekonomika, informatika. T. 3: Geoinformatsionnye tekhnologii i kosmicheskij monitoring*. [Ecology, Economy, Informatics. Geoinformation technologies and space monitoring]. Rostov-na-Don, Southern Federal University Publ., 2015, no. 3, p. 269–275. (In Russian)

Matishov G.G. *Klimat i okeanograficheskie issledovaniya severnyh i yuzhnyh morej* [Climate and oceanographic researches of northern and southern Russian seas]. *Herald of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences*, 2015, no. 2(21), p. 11–19. (In Russian)

Matishov G.G., Dzhenyuk S.L., Moiseev D.V., Zhichkin A.P. *O prirode krupnykh gidrometeorologicheskikh anomalij v arkticheskikh i yuzhnyh moryah Rossii* [On the nature of large hydrometeorological anomalies in the West Arctic and southern seas of Russia]. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, 2014, no. 1, p. 36–46. (In Russian)

Matishov G.G., Matishov D.G., Gargopa Yu.M., Dashkevich L.V. *Zamerzanie Azovskogo morya i klimat v nachale XXI veka* [Freezing of the Sea of Azov and climate at the beginning of the XXI century]. *Nauka yuga Rossii*, 2010, vol. 6, no. 1, p. 33–40. (In Russian)

Solov'ev D.V. [Some features of ice formation in the Caspian Sea and synoptic processes causing them] *Issledovaniya l'dov yuzhnyh morej SSSR* [Investigations of ice in the southern seas of the USSR]. Moscow, Nauka Publ., 1973, p. 52–56. (In Russian)

Valler F.I. [Some features of the ice regime of the northern part of the Caspian Sea] *Sbornik rabot Astrah. GMO* [Collection of research works of the Astrahan hydrometeo observatory], 1970, vol. 1, p. 103–112. (In Russian)

Veselova L.E. *Ledyanoy pokrov Kaspijskogo morya, usloviya ego obrazovaniya i razvitiya* [Ice cover of the Caspian Sea, the conditions of its formation and development]. *Trudy GOIN*, 1956, vol. 24, p. 56–127. (In Russian)

Vodnyj kadastr SSSR. Kaspijskoe more. [Water cadastre of the USSR. The Caspian Sea]. Leningrad, Gidrometizdat Publ., 1971. (In Russian)

Yaitskaya N.A., Saltanovskaya E.V. [Geoinformation system of the ice regime of the southern seas of Russia]. *Ekologiya, ekonomika, informatika. T. 2, Geoinformatsionnye nauki i ekologicheskoe razvitiye: novye podkhody, metody, tekhnologii*. Geoinformatsionnye tekhnologii i kosmicheskij monitoring (Abrau-Durso, 8–13 sentyabrya 2013 g.). [Ecology, economics, informatics, vol. 2]. Rostov-na-Donu, YuFU Publ., 2013, p. 217–219. (In Russian)

Yaitskaya N.V., Magaeva A.A. *Dinamika ledovogo rezhima Azovskogo morya v XX–XXI vv.* [Dynamics of the ice regime of the Sea of Azov in the XX–XXI centuries]. *Ice and Snow*, 2018, no. 58(3), p. 373–386. (In Russian) DOI: 10.15356/2076-6734-2018-3-373-386.

Yaitskaya N.A., Gluschenko V.V. [Investigation of ice situation in the Northern Caspian using satellite monitoring data] III konferentsiya «Geoinformatsionnye tekhnologii i kosmicheskij monitoring» [3rd Conference on Geoinformation technologies and space monitoring], Rostov-na-Donu, Russia, 3–7 September, 2010, p. 140–146. (In Russian)

Web sources

Arctic and Antarctic Research Institute URL: <http://www.aari.ru/> (access date 30.10.2018).

Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Trofimenko L.T., Shvec N.V. *Opisanie massiva dannyh srednesyachnoy temperatury vozduha na stanciyah Rossii. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii bazy dannyh no. 2014621485* URL: <http://meteo.ru/data/156-temperature#описаниемассива-данных> (access date 25.09.2018).

Received 22.11.2018

Revised 16.05.2020

Accepted 06.08.2020

ЭВОЛЮЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ

УДК 551.79, 551.34

В.В. Рогов^{1,2}, И.Д. Стрелецкая³, Н.А. Таратунина^{4,5}, А.Н. Курчатова⁶, Р.Н. Курбанов⁷, Т.А. Янина⁸

ПОЗДНЕПЛЕЙСТОЦЕНОВЫЙ КРИОГЕНЕЗ В НИЖНЕМ ПОВОЛЖЬЕ

В статье представлены результаты изучения следов криогенеза в аллювиальных и лёссово-почвенных отложениях Нижнего Поволжья. На примере опорного разреза Средняя Ахтуба впервые для региона установлены четыре этапа развития мерзлотных процессов в позднем плейстоцене. В условиях сезонного и многолетнего промерзания в позднем плейстоцене происходили процессы криогенного преобразования отложений, определявшие состав, структуру и свойства лёссов и палеопочв. Для каждого горизонта проведены криолитологический, гранулометрический и микроморфологический анализы минерального вещества и сделаны описания следов криогенных процессов для оценки палеогеографических условий их образования. Методом оптически-стимулированной люминесценции определен возраст основных этапов развития криогенных процессов в Нижнем Поволжье. Четвертый этап формирования в ходе промерзания происходил в МИС-4 в условиях ательской регрессии Каспия. Третий этап выражен в виде крупных клиновидных структур (псевдоморфоз) на границе лёсса и аллювиальной пачки, формирование которых связано с деградацией ледяных клиньев. В ходе первого и второго этапов промерзания происходили пластические деформации отложений.

Ключевые слова: лёссы, палеомерзлота, криогенное выветривание, коэффициент криогенной контрастности, люминесцентное датирование, клиновидные структуры, псевдоморфозы

Введение. Циклические колебания климата в плейстоцене по оценкам исследователей находят отражение в структуре лёссово-почвенных серий: в теплые межледниковые и межстадиальные эпохи возрастала роль биогенного осадконакопления и формировались почвы; в холодные эпохи, когда происходило значительное расширение площади вечной мерзлоты, накапливались горизонты лёссов и формировались морозобойные трещины [Velichko et al., 2010]. Эти суждения основаны на результатах анализа клиновидных структур, а также многочисленных данных спорово-пыльцевого, микрофаунистического и других видов анализа.

Существуют также представления, основанные, главным образом, на анализе гранулометрического состава лёссов, о весьма холодной обстановке в период их формирования и значительном развитии в это время криогенного выветривания [Попов, 1967; Лёссовые ..., 1986].

Впервые роль морозного выветривания в происхождении лёсса отметил еще в 1882–1889 гг. С. Вуд [Кригер, 1965]. По мнению С. Вуда, лёссовые поро-

ды формировались за пределами развития ледников в районах вечной мерзлоты при сезонном оттаивании, оползании и оплывании верхних слоев почвы. Впоследствии, в том числе и на основании экспериментальных исследований, это послужило основой представлений о криоаллювиальной природе лёссов и их свойств [Сергеев, Минервин, 1960; Попов, 1967; Лёссовые ..., 1986]. Для обоснования четкого критерия оценки влияния перигляциальных условий на формирование лёссов (наличия сезонного и многолетнего промерзания) был предложен конкретный показатель, характеризующий степень участия в формировании отложенного процесса криогенного выветривания [Конищев, Рогов, 1994]. Данный показатель был назван коэффициентом криогенной контрастности (ККК): $KKK = Q_1/F_1 : Q_2/F_2$, где Q_1 и F_1 – содержание кварца и полевых шпатов во фракции 0,05–0,01 мм; Q_2 и F_2 – содержание кварца и полевых шпатов во фракции 0,1–0,05 мм. Величина коэффициента растет с активностью криогенного выветривания, при этом отложения, сформировавшиеся в условиях су-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра криолитологии и гляциологии, профессор, докт. геогр. н.; e-mail: rogovvic@mail.ru

² Институт криосферы Земли Тюменского научного центра, лаборатория криотрасологии, ст. науч. с.

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра криолитологии и гляциологии, доцент, канд. геогр. н.; e-mail: irinastrelets@gmail.com

⁴ Институт географии РАН, отдел палеогеографии четвертичного периода, мл. науч. с., без ученой степени; e-mail: taratuninana@gmail.com

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, НИЛ новейших отложений и палеогеографии плейстоцена, инженер, без ученой степени

⁶ Институт криосферы Земли Тюменского научного центра, лаборатория криотрасологии, ст. науч. с.; e-mail: kanni@mail.ru

⁷ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория новейших отложений и палеогеографии плейстоцена, ст. науч. с.; e-mail: roger.kurbanov@gmail.com

⁸ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, профессор, докт. геогр. н.; e-mail: paleo@inbox.ru

ществования вечной мерзлоты, имеют значения ККК более единицы.

Авторами в 2015–2019 гг. проведены полевые исследования в Нижнем Поволжье, которые позволили выявить разновозрастные посткриогенные структуры (псевдоморфозы, инволюции и др.) – следы реликтового сезонного и многолетнего промерзания. Реконструкция истории криогенных явлений на территории Нижнего Поволжья является важной научной задачей в понимании палеогеографических условий этого региона и причин колебаний уровня Каспийского моря, поскольку регрессивные этапы являются наименее изученными [Янина и др., 2017]. Лёссово-почвенные серии Нижнего Поволжья предоставляют уникальную возможность реконструировать этапы развития ландшафтов в период между хазарской и хвалынской трансгрессиями Каспийского моря. Целью данного исследования является реконструкция истории развития мерзлотных процессов в позднем плейстоцене на основании следов криогенеза в отложениях на территории Нижнего Поволжья.

Материалы и методы исследования. В основу работы положены результаты комплексного изучения разреза Средняя Ахтуба ($H_{\text{абс}}=14,89$ м), расположенного на левом борту Волго-Ахтубинской долины (рис. 1) в 3 км к югу от населенного пункта Средняя Ахтуба (координаты N 48°42'01"; E 44°53'37,1").

В разрезе высотой 18,5 м вскрывается строение нижнехвалынской равнины Северного Прикаспия: реперный горизонт шоколадных глин хвалынской трансгрессии, мощная полифациальная толща ательских континентальных осадков и комплекс отложений эпохи хазарского трансгрессивно-регрессивного этапа Каспия с тремя четко выраженными горизонтами палеопочв (рис. 2). Из континентальных осадков разреза отобрано и проанализировано

25 образцов. Комплексное изучение отложений включало гранулометрический, минералогический, микроморфологический анализы, расчет ККК, датирование методом оптически-стимулированной люминесценции (ОСЛ).

Гранулометрический, минералогический и микроморфологический анализы выполнены в лаборатории криотрасологии Института Криосферы Земли ТЮМНЦ СО РАН. Гранулометрический анализ образцов осуществлен на лазерном гранулометре Mastersizer 3000 (Malvern) с дисперсией в водной среде. Для образцов выполнена стандартная пробоподготовка [Константинов, Еременко, 2012], включающая обработку соляной кислотой; для дополнительной дезагрегации частиц применялась встроенная функция ультразвука.

Лазерные гранулометры и, в частности, используемый Mastersizer 3000, дают шкалу измерения частиц по 100 диапазонам их размера, благодаря чему указанная фракция крупной пыли была разделена на подфракции 0,01–0,025 и 0,025–0,05 мм, что дало возможность проследить, какая часть подфракции преобладает в том или ином образце породы.

Определение минералогического состава выполнено на рентгеновском дифрактометре D2Phaser (Bruker); здесь же получены данные для подсчета ККК. Для этого проведен минералогический анализ двух узких фракций – тонкого песка (0,05–0,1 мм) и крупной пыли (0,01–0,05 мм).

Микростроение лёссов и морфология частиц изучены в образцах ненарушенного сложения и нарушенного состояния при помощи растрового электронного микроскопа Hitachi TM 3000 в комплексе с энергодисперсионным спектрометром Swift 3000 по стандартной методике [Рогов, 2000]. Всего получено более 500 изображений.

Абсолютное датирование отложений выполнено ОСЛ-методом в Скандинавской лаборатории



Рис. 1. Местоположение разреза Средняя Ахтуба

Fig. 1. Location of the Srednyaya Akhtuba section

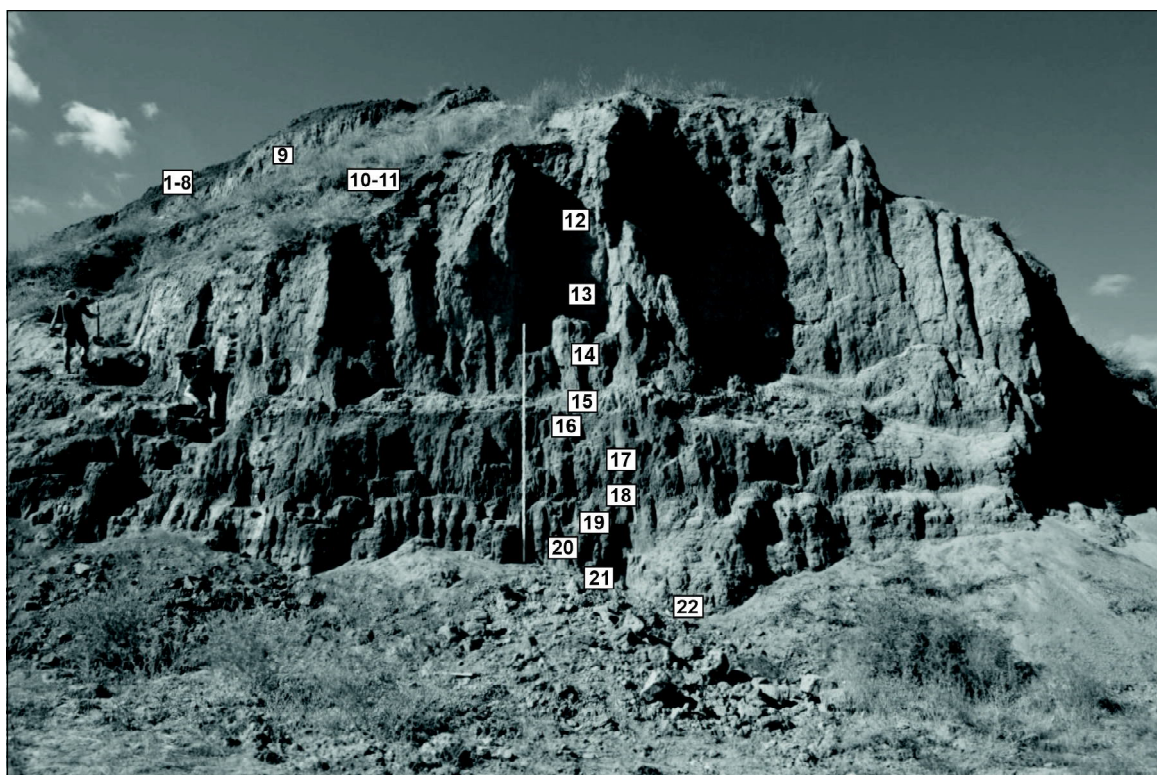


Рис. 2. Общий вид разреза Средняя Ахтуба. Цифры – слои разреза. Описание приведено в тексте

Fig. 2. General view of the Srednyaya Akhtuba section. The numbers mark the layers of the section. Description is given in the text

люминесцентного датирования (Орхусский университет, Дания); детальная характеристика лабораторных измерений и результаты приведены в статье [Янина и др., 2017].

Результаты исследований. Строение разреза. Краткое описание разреза (слои 22-1), его стратификация и результаты абсолютной геохронометрии приведены согласно работе [Янина и др., 2017] (рис. 3). Нижняя часть разреза (слои 22-19) представлена однородными отложениями озерно-лиманного типа, которые подстилаются горизонтом суглинков с прослоями песка. Выше залегает хорошо выраженный горизонт палеопочвы плотной комковатой структуры мощностью 0,4 м (слой 18). Почва перекрывается первым горизонтом лессовидных суглинков (слой 17) мощностью 0,75 м; по ним получена ОСЛ-дата $112,6 \pm 5,4$ тыс. лет (№ 150829). Выше залегающая почва слоя 16 (второй почвенный горизонт) разбита тонкими посткриогенными трещинами, а также включает слабо выраженные криотурбации и датируется $102,5 \pm 5,2$ тыс. лет (№ 150827). Слой 15 – второй горизонт лессовидных суглинков мощностью 0,7 м пестрой серо-коричневой окраски с ржавыми пятнами и затеками, с марганцовистыми и известковыми включениями; датирован в $87,6 \pm 4,1$ тыс. лет (№ 150824). Выше в разрезе (слой 14) залегает хорошо выраженная погребенная почва с псевдоморфозами по вытаявшим ледяным жилам; псевдоморфозы заполнены вышележащим палево-желтым лёссом. Ширина псевдоморфоз клинообразной формы в верхней части 7–18 см, в ниж-

ней – 2–3 мм, в плане они образуют сетку со стороной 45–50 см. На границе почвы и вышележащего лёсса получена дата $68,3 \pm 4,2$ тыс. лет (№ 150822), что позволяет определить время формирования жил началом морской изотопной стадии (МИС) 4.

Выше (слои 13–8) с резкой границей в разрезе залегают разнофациальные (водного и субаэрального генезиса) супесчано-песчаные отложения, представляющие ательскую свиту в стратиграфической схеме Прикаспия [Янина и др., 2017]. В них заключены два слоя (13 и 12) лессовидных суглинков общей мощностью 4,5 м, со столбчатой отдельностью, образующие в разрезе вертикальные стенки. Нижний (слой 13) – мощный (3,5 м) слой лессов равномерной светло-коричневой окраски с редкими марганцовистыми примазками и включениями гипса. Верхний (слой 12) изобилует марганцовистыми примазками и гипсовыми включениями с редкими темными пятнами органики. Возраст горизонта (в верхней части) датирован в $48,7 \pm 3,1$ тыс. лет (№ 150814). Выше залегают слои 11 и 10, представленные песком мелко- и среднезернистым, косослоистым, с прослоями лёсса, признаками почвообразования, известковыми включениями и марганцовистыми примазками. Для верхней части горизонта получена дата в $36,8 \pm 3,0$ тыс. лет (№ 150812). Перекрывают эти отложения слоем песка (слой 9), для нижней части которого получена дата $35,5 \pm 2,8$ тыс. лет (№ 150810). Верхняя часть ательской свиты (слой 8) представлена слоем (0,5 м) плотных неслоистых лессовидных суглин-

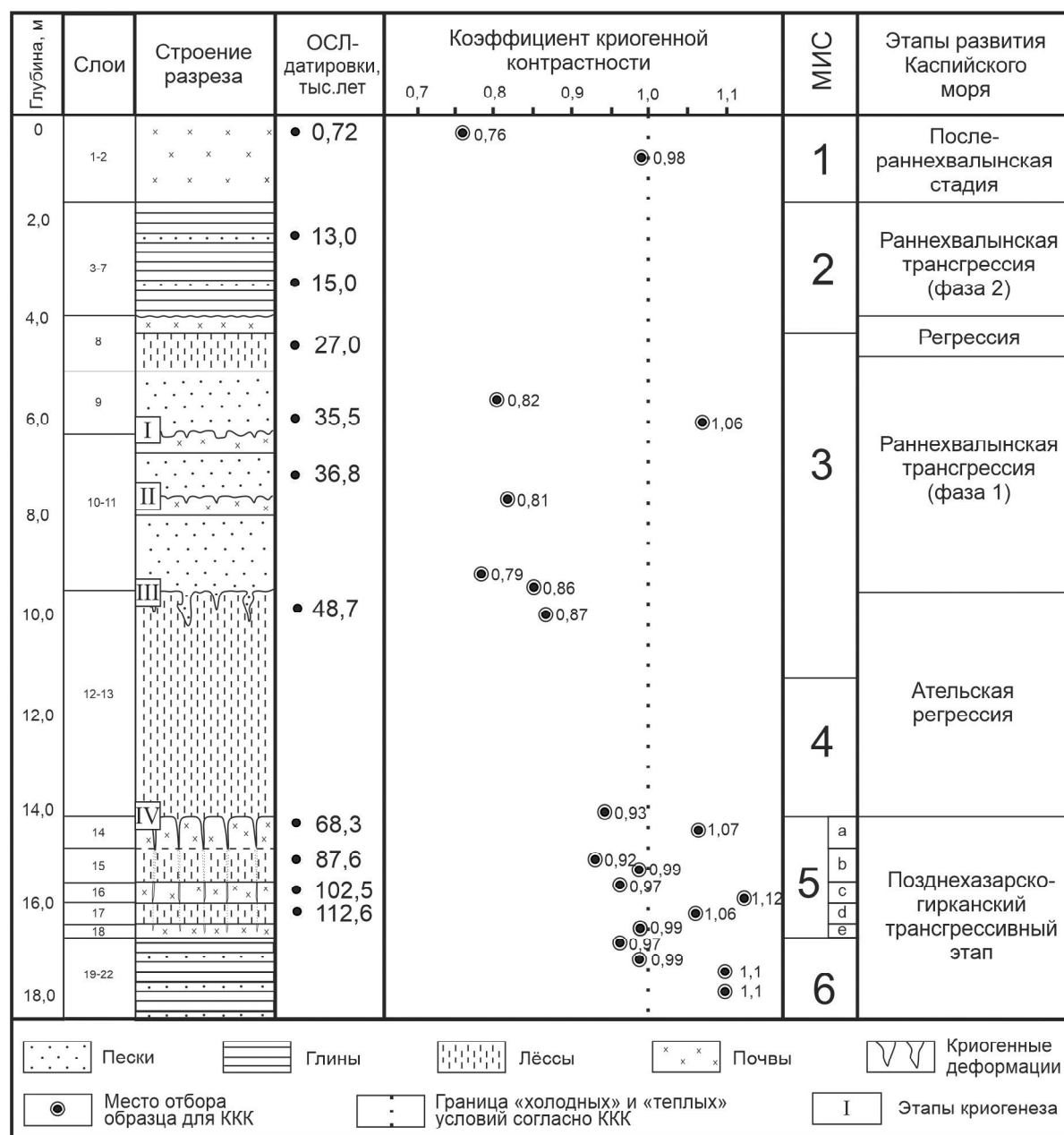


Рис. 3. Схема разреза Средняя Ахтуба со значениями ККК, данными ОСЛ-датирования

Fig. 3. The scheme of the Srednyaya Akhtuba section (with CCC values, OSL data)

ков равномерной светло-бежевой окраски, образующих в разрезе вертикальные стенки, и маломощной палеопочвой. Верхняя часть горизонта лёсса датируется в $27,0 \pm 1,6$ тыс. лет (№ 150809). С резким несогласием и характерными элементами размыва над палеопочвой выделяется горизонт морских шоколадных глин.

Выше располагается мощная толща (слои 7–3) каспийских нижнехвалынских осадков, включающая: прослой суглинков и глин с крупной оскольчатой призматической отдельностью и прослой песка (слои 5 и 6); два слоя шоколадной глины (слой 4) с тонкими прослойками (от 0,5 до 3 см) тонкозернистого песка (здесь получена дата $13,0 \pm 0,5$ тыс. лет, № 150806); слой супеси темно-бежевого цвета с редкими прослойками тонкозернистого песка

(слой 3). В своей верхней части разрез представлен современной почвой, развитой по субэвразальным голоценовым супесчаным отложениям (слои 1–2), по которой получена датировка в 720 ± 70 лет (№ 150801).

Уникальной особенностью разреза Средняя Ахтуба является наличие реликтовых мерзлотных образований – криотурбаций, полигональных клиновидных структур (как псевдоморфоз по полигонально-жильным льдам, так и изначально грунтовыми жил), мелкополигональных трещинных образований. В разрезе установлены следы четырех этапов криогенеза.

Первый и второй этапы приурочены к горизонтам слабо развитых палеопочв внутри аллювиальной пачки (МИС-3). В разрезе они представляют

собой нарушения пластичного характера (криотурбации и инволюции). В этих двух горизонтах интенсивность проявления криогенных процессов различна, однако носит схожий характер. Это преимущественно нарушения в виде мелких грунтовых клиньев глубокого сезонного протаивания и последующего промерзания. Верхние, вертикальной протяженностью до 30 см, заполнены вышележащим слоистым аллювиальным материалом с высолами по границам, слоистая структура которых частично сохраняется внутри деформаций; форма конусовидная, корытообразная; границы неровные, волнообразные. Нижние деформации представлены инволюциями, турбирующими подстилающую почву; заполнены они вышележащим аллювиальным материалом. Вертикальная протяженность 30 см, горизонтальная – до 20 см. Формы последних схожи с теми, что наблюдаются в структуре «пятен-медальонов» в современной криолитозоне. Нехватка данных абсолютного датирования не позволяет точно определить время образования инволюций нижнего уровня в интервале 40–28 тыс. л. н., верхний горизонт был затронут криогенными явлениями около 30 тыс. л. н.

Третий этап формирования криогенных явлений приурочен к верхней части лессового горизонта (слой 12, МИС-3). В нем обнаружены довольно крупные псевдоморфозы шириной до 40 см, вертикальной протяженностью 1,0–1,2 м, с неровными краями, «плечиками», «перематым» материалом. Жилы заполнены вышележащим аллювиальным песком, отвечающим второй половине МИС-3 (слой 11). Полученные датировки указывают на то, что формирование этих криогенных форм происходило в подстадию МИС-3b (около 45–42 тыс. л. н.).

Следы четвертого этапа выражены в почвенном горизонте слоя 14, отвечающем МИС-5a. Он представляет собой клиновидные структуры, наиболее ярко выраженные в этой почве, пронизывающие и два нижележащих уровня погребенных почв (слои 16–18). Их ширина в верхней части – 12–20 см, высота – от 0,8 до 2,5 м; расстояние между грунтовыми клиньями 40–60 см. Заполнены клиновидные структуры более светлым вышележащим материалом лёсса. Клинья имеют относительно широкий раструб по верху, быстро сужаются и продолжают в виде ветвящихся хвостов, иногда распадающихся на два–три отдельных. Очевидно, выражены только нижние части клиньев; основное растрескивание и рост жил происходили при формировании вышележащих лёссов, при однородности материала и его цвете следы криогенной трансформации отложений выявить трудно.

Гранулометрический состав. Изучение гранулометрии лёссов ведется уже длительное время, и имеется ряд обобщающих работ, констатирующих основные характеристики крупности частиц и распределения их по размеру. В них отмечается, что характерным отличием гранулометрического состава лёссов является высокая доля частиц пылеватой размерности [Лёссовые ..., 1986]. Отложения в

разрезе Средняя Ахтуба представлены чередованием горизонтов глин, лёссов, лессовидных опесчаненных пород, прослоев среднезернистых хорошо сортированных песков и почв (рис. 4).

Результаты гранулометрического анализа в целом показывают типичное для лёссов распределение фракций. Однако для более подробной характеристики размера частиц анализ тонкопесчаной (0,1–0,05 мм) и крупнопылеватой (0,05–0,01 мм) части лёссов сделан более подробно: обычный диапазон этих фракций был поделен надвое – на более тонкую и более грубую. В горизонтах лёссов наблюдалось преобладание фракции крупной пыли (до 60%), незначительное присутствие частиц размером более 0,25 мм и небольшое содержание глинистой фракции (<0,001 мм) – не более 1,5–2,5%. При этом в лёссовых пачках максимум содержания частиц принадлежит большеразмерной части (0,025–0,05 мм) фракции крупной пыли. Некоторыми авторами такая особенность трактуется как показатель формирования лёссовой толщи в холодных и сухих условиях [Deng et al., 2010]. Гранулометрический состав почвенных горизонтов, разделяющих лёссовые толщи, с одной стороны, более песчанистый, но и глинистой составляющей в них больше, чем в лёссах.

Минералогический состав отложений. Чтобы более точно оценить влияние криогенеза на изучаемые породы, их минералогия была детально проанализирована для основных гранулометрических фракций лёссов – тонкого песка и крупной пыли, и был рассчитан коэффициент криогенной контрастности (ККК). Минералогический состав песчаной и пылеватой фракций для горизонтов расчетов ККК весьма разнообразен – основную часть составляют кварц (50–70%), альбит (10–16%), микроклин (10–17%), ортоклаз (6–8%), мусковит (4–12%), авгит (2–5%), каолинит (2–4%) и др.

Значения ККК по разрезу Средняя Ахтуба (см. рис. 3) колеблются в достаточно широком диапазоне, они фиксируют как затронутые криогенезом горизонты, так и не несущие его видимых следов. Величина ККК в отложениях голоценового этапа (МИС-1, слои 2 и 1) уменьшается от 0,98 до 0,76, соответствуя переходу от холодных фаз валдайского оледенения к более теплomu периоду голоцена. Этап накопления аллювиальной толщи, отвечающий второй половине стадии МИС-3 и ранней фазе раннехвалынской трансгрессии Каспия (слои 11–8), характеризуется в его начале и завершении невысокими значениями ККК (0,82), достигая на границе 9 и 10 слоев максимума ККК (1,06) в песках, накопившихся в середине этапа. Такое значение позволяет говорить о коротком, но весьма холодном времени с наличием вечной мерзлоты, о полигональном растрескивании грунтов, поскольку в указанном слое были встречены псевдоморфозы по мерзлотным клиньям.

Этап ательской регрессии характеризуется невысокими значениями ККК: слой 12 имеет значения 0,86–0,87, слой 13 отражает более холодные условия накопления. Эти значения не предполагают

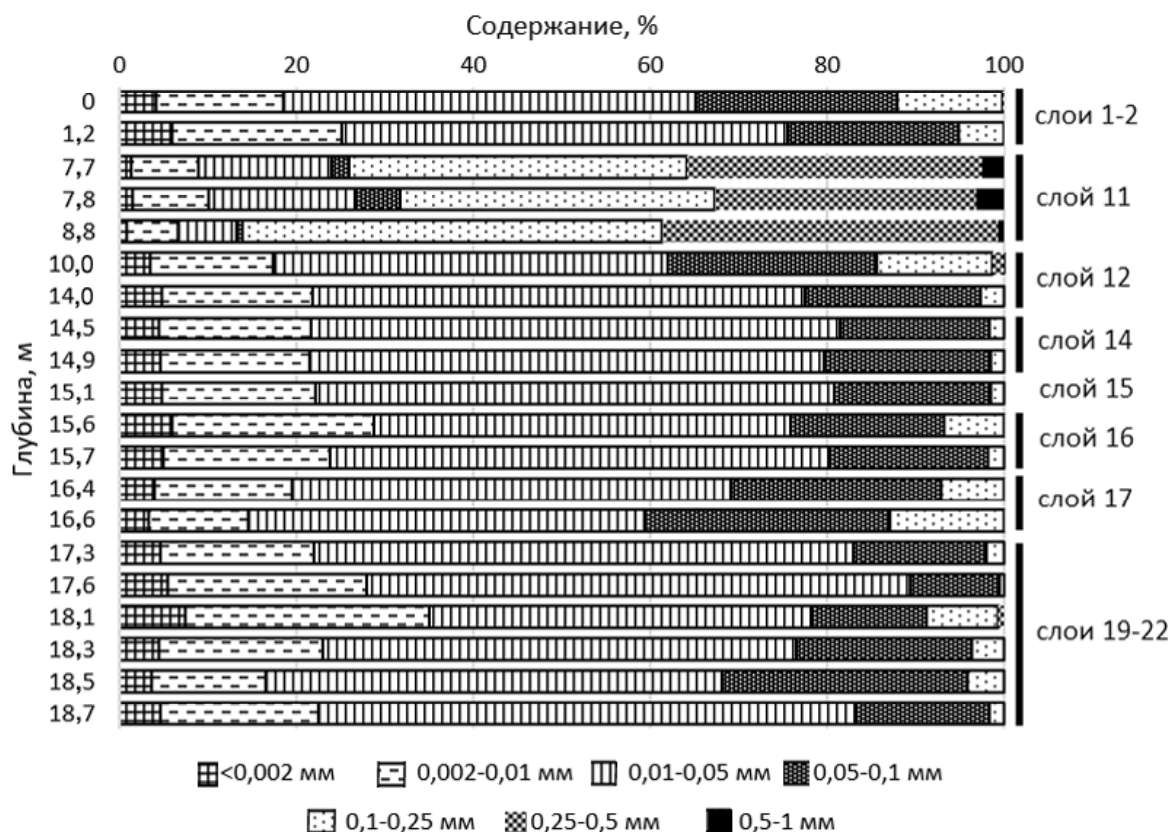


Рис. 4. Гранулометрический состав отложений Средней Ахтубы

Fig. 4. Particle size distribution for the Srednyaya Akhtuba sediments

наличие вечной мерзлоты, они свидетельствуют о глубоком сезонном промерзании отложений.

В серии осадков, отвечающей позднехазарскому трансгрессивно-регрессивному этапу в Каспии (МИС-5), в составе и строении отложений четко прослеживается влияние криогенеза на фоне существования вечной мерзлоты с процессами полигонального морозного растрескивания. Наиболее преобразованными пачками оказались слои 4 (МИС-5а, ККК=1,07) и 16 и 17 (МИС-5с, -5д) со значениями ККК 1,06 и 1,12. Эти горизонты оказались подвержены криогенному изменению в достаточно холодных условиях МИС-4 во время существования на изучаемой территории вечной мерзлоты.

ККК отражает, прежде всего, не низкие отрицательные температуры, а развитие криогенного разрушения при образовании льда в микротрещинах частиц скелета в условиях достаточной влажности грунта. В сухие этапы лёссонакопления (ательский лёсс) более низкие значения ККК можно объяснить существованием морозных (сухих) пород в условиях недостаточного увлажнения.

Наиболее холодная палеомерзлота реконструируется в то время, когда почва МИС-5а закончила свое формирование. При достаточном увлажнении в МИС-4 произошло значительное растрескивание горизонтов с образованием ледяных жил, замещенных в дальнейшем (МИС-3) псевдоморфозами. Далее следует МИС-3 с короткими фазами потепле-

ния и, вероятно, увлажнения в периоды формирования горизонтов палеопочв вследствие поднятия уровня Каспия [Янина и др., 2017]. Увеличившееся влагосодержание в толще отложений позволило в условиях высокотемпературной мерзлоты (либо непродолжительного низкотемпературного похолодания) сформироваться полупокровной слабообразованной островной мерзлоте.

Микростроение лессово-почвенной толщи. Изучение микростроения лёссов также имеет давнюю историю, и в ряде работ дано освещение развития этого направления в изучении лёссов [Ларионов, Штерн, 1971; Коломенский, 1988; Григорьева, 2001]. Однако следует отметить, что большинство исследований микростроения направлено на изучение его инженерно-геологических свойств и, прежде всего, просадочности, при этом исследований микростроения, направленных на оценку условий седиментации и генезиса отложений, крайне мало.

В разрезе Средняя Ахтуба микростроение лёссов ненарушенного состояния изучалось по сколам небольших образцов ($1,0 \times 2,0 \times 0,5 \text{ см}^3$). Микростроение лёссов и почв практически по всей толще, согласно классификации И.Ю. Григорьевой [2001], следует отнести к агрегативному типу (рис. 5). Такое микростроение обусловлено не только наличием глинистой фракции, которая, конечно, способствует агрегации частиц, но и, прежде всего, значительным участием таких мощных структурообразователей,

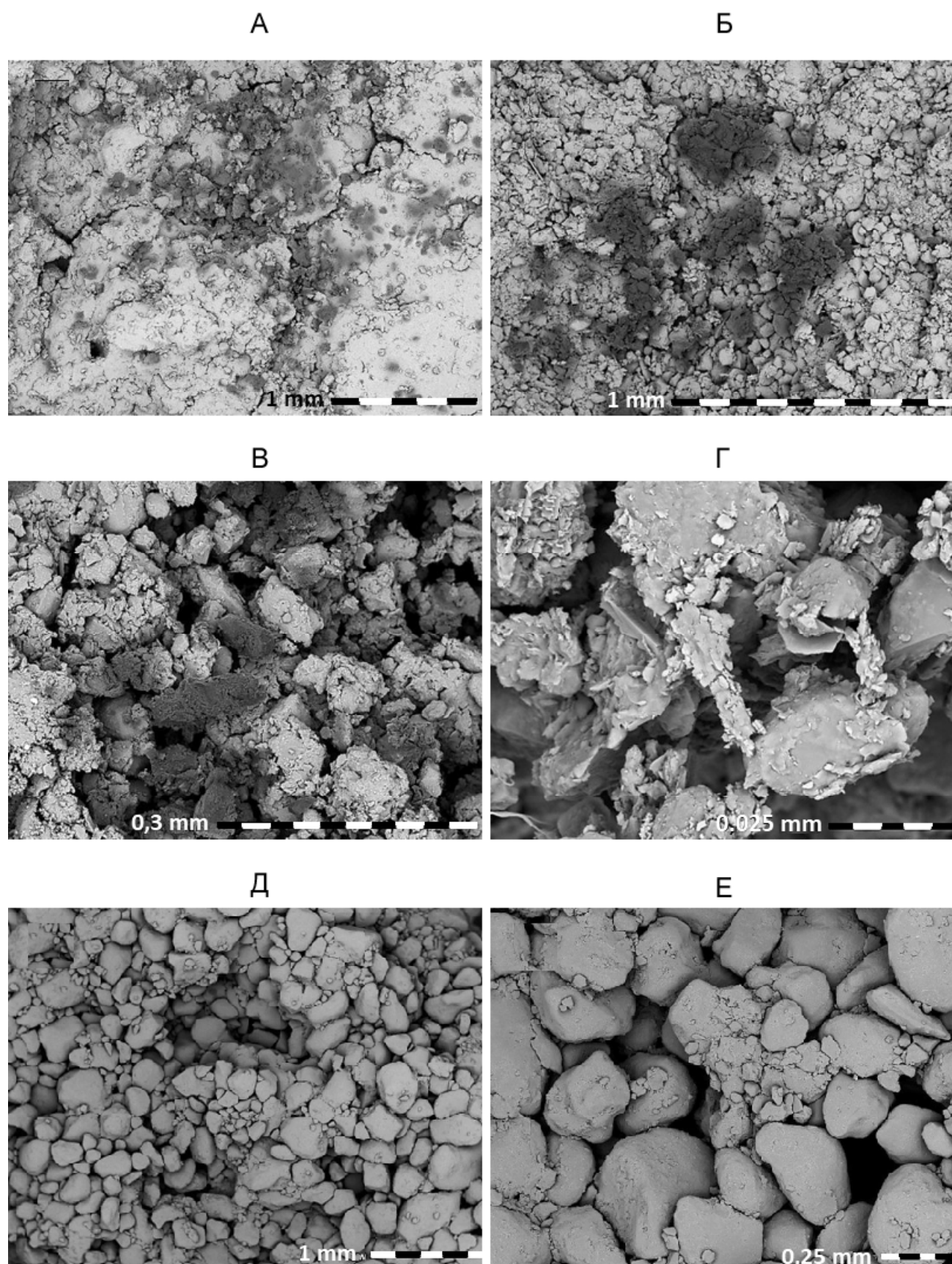


Рис. 5. Микростроение лёссов и почв в разрезе Средняя Ахтуба: А–Г – микростроение лёссов при разных увеличениях; Д, Е – микростроение песчаного горизонта (глубина 7,7 м)

Fig. 5. Microstructure of loess and soils in the Srednyaya Akhtuba section: А–Г – microstructure of loess under different magnifications; Д–Е – microstructure of sand horizon (at the depth of 7,7 m)

как гипс и карбонат кальция. Основу составляют крупные агрегаты (1–3 мм) разной степени слитности. Эти агрегаты разделяются трещинами извилистой конфигурации и изометричными порами неправильной формы размером 0,1–0,3 мм и составлены частицами разной крупности и состава – от остроугольных частиц кварца тонкопесчаной размерности до слитной массы включений («примазок») сложного состава, содержащих железо, кальций и кремний. Кроме этого, внутри агрегатов встречаются сгустки окристаллизованного кальция.

Интересную особенность микростроения лёссов, отмечаемую многими исследователями, составляют трубчатые поры почти идеально круглой формы в сечении (рис. 6А, Б, глубина 10,5 м). Диаметр таких пор в образцах лёссов составляет 0,4–0,6 мм, на стенках наблюдается уплотнение грунтовой массы, в котором участвуют пылеватые частицы силикатов, распределение которых часто образует заметное «кольцо». Вокруг каналов заметны радиальные трещины. В ряде случаев, как на рис. 6А, распределение частиц ближе к шестиугольнику, а не к окружности. Обращая внимание на такие особенности морфологии пор, можно предположить, что их формирование могло быть связано с образованием включений льда в период промерзания толщи.

Морфология частиц песчаной фракции. Во многих работах, посвященных генезису рыхлых отложений, появляется все больше информации о размере, форме и характере поверхности частиц кварца песчаной составляющей. Считается, [Woronko, Pisarska-Jamrozy, 2015], что эти показатели позволяют судить о генезисе отложений. Морфология песчаных кварцевых частиц (см. рис. 5Д, Е, глубина 7,7 м; см. рис. 6В, Г, глубина 17,3 м) в исследуемом разрезе весьма разнообразна и отражает условия формирования отложений в разных слоях лёссов. Хорошо окатанные, с гладкой и слабоэродированной поверхностью, частицы характерны для песчаного заполнения клиньев в почвах, что говорит о преобладании эолового переноса в период их формирования, но, в целом, в образцах лёсса по всему разрезу более половины частиц представлены угловатыми зернами с многочисленными сколами и острыми краями, что указывает на криогенный механизм их разрушения (см. рис. 6В–Г).

Морфология агрегатов пылеватой фракции (0,05–0,005 мм). Как известно, лёссы обладают структурной связностью и состоят из структурных отдельностей различного размера, составляющих сложную иерархическую систему – от столбчатых отдельностей, хорошо отражающихся в стенках разрезов, до агрегатов микроскопических размеров. Особое внимание было уделено агрегатам пылеватой фракции, составляющим главную особенность состава лёссов и привлекающим наибольшее внимание исследователей лёссов, – микроагрегатам, поскольку ряд исследователей предполагает их криогенный генезис [Сергеев, Минервин, 1960; Попов, 1967; Конищев, 1981].

В лёссах рассматриваемого разреза встречаются агрегаты различного типа – как по размеру, так и по структуре. Крупные агрегаты рыхлого строения размером 0,5–0,1 мм обычно составлены десятком или более частиц пылеватой фракции, контактирующих между собой через глинистые «мостики», формируя внутриагрегатные поры 0,005–0,01 мм. Форма их изометричная или слегка вытянутая. В агрегатах меньшего размера преобладают тонкопылеватые и глинистые частицы; внутриагрегатные поры в них меньше и имеют уплощенную форму. Большая часть агрегатов образована объединением пылеватых и глинистых частиц цементом железо-карбонатного состава (см. рис. 6В–Г). Встречаются агрегаты, образованные исключительно кристаллами карбоната кальция (см. рис. 6Д–Е, глубина 17,6 м). Агрегаты достаточно прочны, не разрушаются при промывке водой и воздействию ультразвука.

Аутигенные минералы в образцах лёссов представлены многочисленными друзами кристаллов карбоната кальция (рис. 7А, глубина 8,5 м), включениями гипса (см. рис. 7В, глубина 5,4 м). Железо представлено аморфными пленками на поверхности частиц, конкрециями сидерита и редкими новообразованиями магнетита и титано-магнетита (см. рис. 7Г). На глубине 14 м встречены кристаллы витерита (см. рис. 7Б). Состав аутигенных минералов свидетельствует о криоаридных условиях формирования горизонтов лёссов в разрезе Средняя Ахтуба.

По современным представлениям лёссово-почвенные серии формируются в условиях динамики климата, причем горизонты лёссов образуются в этапы похолодания [Величко и др., 2015]. При этом эоловый фактор стал общепризнанным главным источником материала. Наиболее изученные регионы лёссонакопления – долины рек Дуная, Рейна, Хуанхэ – свидетельствуют о том, что формирование мощных толщ лёссово-почвенных серий связано с поступлением материала из крупных аллювиальных систем [Stevens et al., 2016]. Отмечается, что доминирующим является именно локальный перенос материала (в пределах десятков километров), иными словами, ветер переносит затронутые мерзлотными процессами отложения, формируя мощные толщ лёссов. При этом криогенное преобразование материала продолжается, окончательно формируя типичные особенности лёссов (пылеватый состав, строение и микроморфология минерального скелета). Такое предположение согласуется с полученными данными по Нижней Волге, где в холодный и относительно сухой этап ательской регрессии Каспия формировались мощные горизонты лёссов (в разрезе Средняя Ахтуба мощность составляет более 7 м).

Изучение микроморфологии лёссовых толщ показывает значительную роль их криогенного преобразования, особенно это заметно по морфологии частиц песчаной фракции, представленной угловатыми формами с многочисленными сколами и острыми краями, раковистыми изломами.

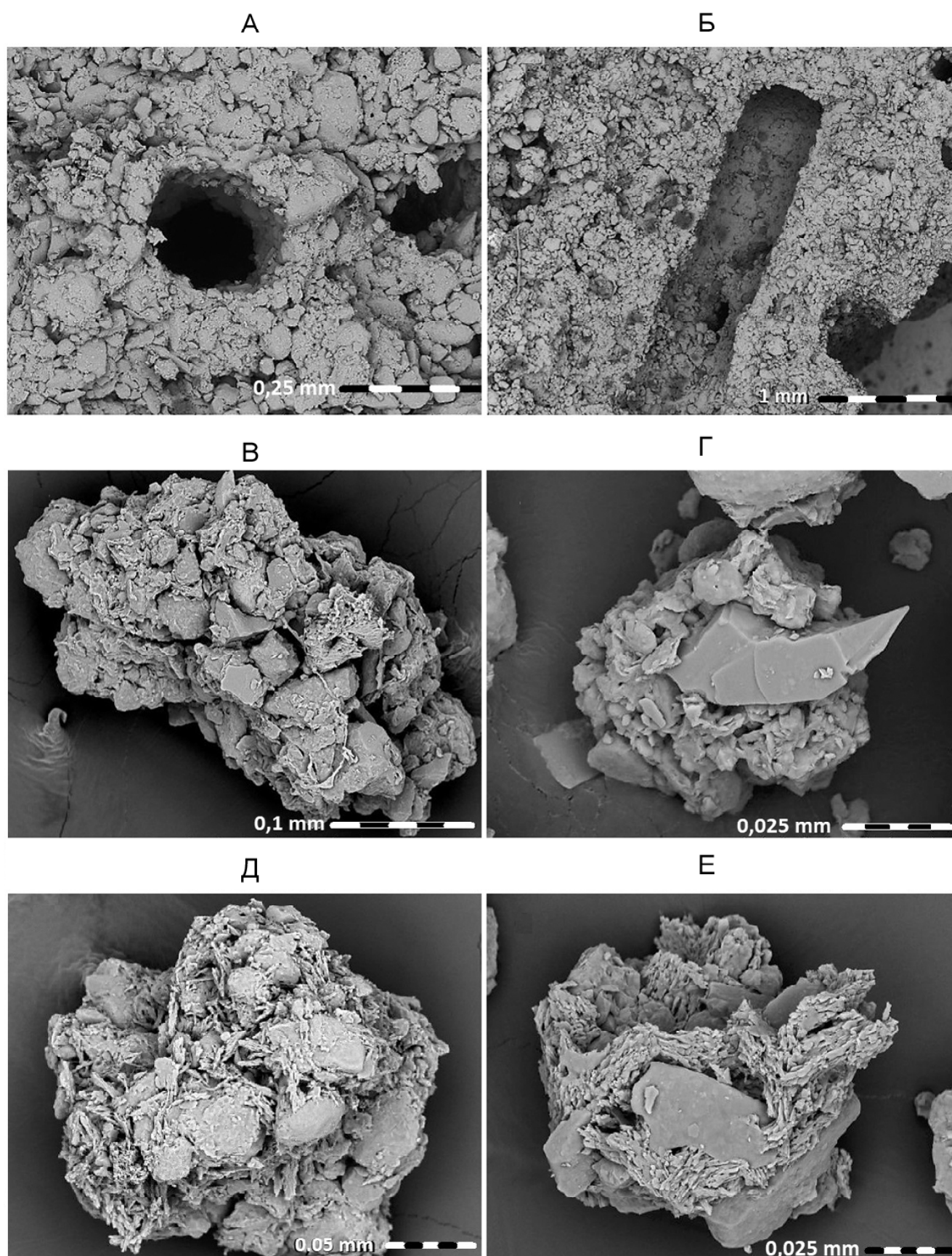


Рис. 6. Микростроение лёссов в разрезе Средняя Ахтуба: А, Б – трубчатые поры в микростроении лёссов; В, Г – агрегаты с железно-карбонатным цементом; Д, Е – сложные агрегаты с кальцитовым цементом

Fig. 6. Microstructure of loess in the Srednyaya Akhtuba section: А–Б – tubular pores in loess microstructure; В–Г – aggregates with iron-carbonate cement; Д–Е – complex aggregates with calcite cement

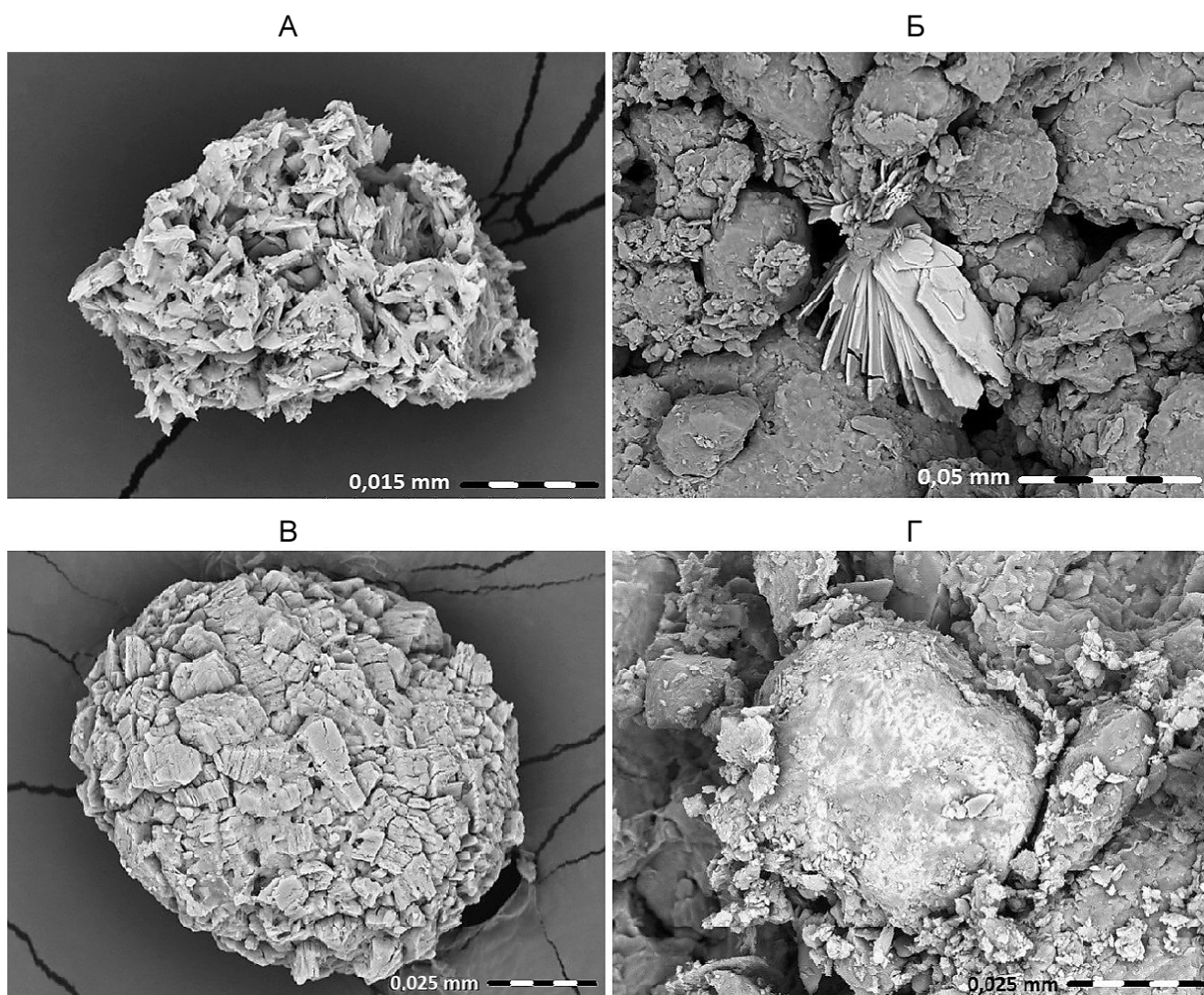


Рис. 7. Аутигенные минералы: А – агрегат кальцита (CaCO_3); Б – новообразования витерита (BaCO_3); В – агрегат гипса (CaSO_4); Г – титано-железистые конкреции

Fig. 7. Authigenic minerals: А – calcite aggregate (CaCO_3); Б – neo-aggregates of witherite (BaCO_3); В – gypsum aggregate (CaSO_4); Г – titanium-iron concretions

Обсуждение результатов. Полученные результаты позволили реконструировать этапы развития криогенеза в позднем плейстоцене на территории Нижнего Поволжья:

1. Четвертый этап формирования криогенных явлений происходил в завершающий этап ранневалдайской ледниковой эпохи (МИС-4) в условиях ательской регрессии Каспия. Произошло значительное растрескивание горизонтов с образованием ледяных жил. Тонкие жилы большой мощности (до 2,5 м) секут два горизонта палеопочв, отвечающих эпохам потепления (МИС-5а,с), и внедряются в микулинскую межледниковую почву (МИС-5е). Жилы расположены на расстоянии 40–45 см друг от друга, образуя регулярную сетку.

2. Третий этап выражен в виде псевдоморфоз, глубоко вдающихся в горизонт ательских лёссов. Формирование криогенных форм происходило в подстадию МИС-3b (около 45–42 тыс. л. н.) в услови-

ях, когда в результате начавшегося подъема уровня Каспийского моря в долине Волги образовался эстуарий и в районе разреза формировались аллювиальные отложения. Само формирование клиньев, по-видимому, связано с затоплением прилегающей равнины водами Волги, увлажнением лёссов и их растрескиванием в результате развития криогенных явлений.

3. Криогенез первого и второго этапов затронул осадконакопление в условиях усиливающегося похолодания и аридизации климата: второй этап отмечается около 40–28 тыс. л. н., первый – около 30 тыс. л. н. Такие образования характерны для современной тундры в структуре пятен-медальонов, которые, вероятно, активно развивались в указанные этапы формирования аллювиальной пачки.

В позднем плейстоцене развитие криогенеза в Нижнем Поволжье происходило в холодные периоды МИС-3 и 4, при этом основным фактором, опре-

делявшим характер многолетней мерзлоты, являлось увлажнение территории. Следы возможного криогенеза, отвечающего наиболее холодной, поздневалдайской фазе оледенения (МИС 2), в разрезе отсутствуют. По-видимому, они были уничтожены абразией хвалынского бассейна, как и верхняя часть палеопочвы (слой 8).

Выводы:

– в Нижнем Поволжье в лессовидных и аллювиальных отложениях встречаются многочисленные следы древнего криогенеза, выраженные в виде грунтовых клиньев, псевдоморфоз и инволюций.

– в позднем плейстоцене установлены четыре этапа криогенеза. Наиболее ярко выражен криогенез времени максимума калининского оледенения МИС-4 (~70–65 тыс. л. н.), развивавшийся в криоаридных условиях. В нестабильных климатических

условиях межстадиального потепления (МИС-3) в регионе отмечались три коротких криособытия (45–42, 40–35 и ~30 тыс. л. н.).

– в северной части Нижнего Поволжья тип и масштабы криогенеза контролировались преимущественно условиями увлажнения, в то время как температурный режим имел подчиненное значение.

– методика криолитологического анализа минерального вещества перспективна для оценки палеогеографических условий времени его накопления. На примере разреза Средняя Ахтуба показано, что как в пределах многолетней перигляциальной криолитозоны, так и в условиях сезонного промерзания, в плейстоцене происходили процессы криогенного преобразования отложений, которые участвовали в формировании состава и строения лёссов.

Благодарности. Полевые исследования и абсолютное датирование выполнено при поддержке гранта РНФ (проект № 16-17-10103), литологические исследования – при поддержке гранта РФФИ (проект № 18-05-00376), криолитологические – при поддержке гранта РФФИ (проект № 18-35-00619). Авторы выражают благодарность рецензентам этой статьи за ряд ценных замечаний и рекомендаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Величко А.А., Борисова О.К., Захаров А.Л., Карпухина Н.В., Кононов Ю.М., Константинов Е.А., Курбанов Р.Н., Морозова Т.Д., Панин П.Г., Семенов В.В., Тесаков А.С., Тимирева С.Н., Титов В.В. Лёссово-почвенная формация юга Восточно-Европейской равнины и ее соотношение с морскими азово-черноморскими отложениями // *Фундаментальные проблемы квартера, итоги изучения и основные направления дальнейших исследований: материалы IX Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода* (Иркутск, 15–20 сентября 2015 г.) Иркутск: ин-тут географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2015, с. 86–87.
- Григорьева И.Ю. Микростроение лессовых пород. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. 148 с.
- Коломенский Е.Н. О формировании структурно-текстурных особенностей лессовых пород // *Инж. геология*. 1988. № 4. С. 3–17.
- Конищев В.Н. Формирование состава дисперсных пород в криолитосфере. Новосибирск: Наука, 1981. 197 с.
- Конищев В.Н., Рогов В.В. Методы криолитологических исследований. М.: Изд-во МГУ, 1994. 135 с.
- Константинов Е.А., Еременко Е.А. Значение метода лазерной дифракционной гранулометрии при изучении лёссов (на примере разреза Мелекино, Северное Приазовье) // *Отечественная геология*. 2012. № 3. С. 47–54.
- Кригер Н.И. Лесс, его свойства и связь с географической средой. М.: Наука, 1965. 254 с.
- Ларионов А.К., Штерн Л.Я. Результаты изучения тонкой структуры лессовых пород ненарушенного сложения на СЭС // *Вестник ЛГУ. Геология, география*. Вып. 1. 1971. № 5. С. 31–40.
- Лёссовые породы СССР. Том I. Инженерно-геологические особенности и проблемы рационального использования / Под ред. Е.М. Сергеева, А.К. Ларионова, Н.Н. Комиссаровой. М.: Недра, 1986. 232 с.
- Попов А.И. Лёссовые и лессовидные породы как продукт криолитогеоза // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр.* 1967. № 6. С. 43–48.
- Рогов В.В. Особенности морфологии частиц скелета криогенного элювия // *Криосфера Земли*. 2000. Т. 4. № 3. С. 67–74.
- Сергеев Е.М., Минервин А.В. Сущность процесса облессования в подзолистой зоне // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. геологическая*. 1960. № 3. С. 3–14.
- Янина Т.А., Свиточ А.А., Курбанов Р.Н., Мюррей А.С., Ткач Н.Т., Сычев Н.В. Опыт датирования плейстоценовых отложений Нижнего Поволжья методом оптически стимулированной люминесценции // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр.* 2017. № 1. С. 21–29.
- Deng J., Wang L., Zhang Z.Z., Bing H. Microstructure characteristics and forming environment of late Quaternary Period loess in the Loess Plateau of China. *Environ. Earth Sci.*, 2010, no. 59, p. 1807–1817.
- Stevens T., Buylaert J., Lu H., Thiel C., Murray A., Frechen M., Yi Sh., Zeng L. Mass accumulation rate and monsoon records from Xifeng, Chinese Loess Plateau, based on a luminescence age model. *Journal of Quaternary Science*, 2016, vol. 31, p. 391–405.
- Velichko A., Catto N., Tesakov A., Titov V., Morozova T., Semenov V., Timireva S. The structure of Pleistocene loess-paleosol formation in southern Russian plain based on data from eastern Azov sea region. *Abstract volume INQUA-SEQS 2010* (Rostov-on-Don, Russia, June 21–26, 2010). Rostov-on-Don, Russia, 2010, p. 184–187.
- Woronko B., Pisarska-Jamroz M. Micro-scale frost weathering of sand-sized quartz grains. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2015, no. 27, p. 109–122.

Поступила в редакцию 18.02.2020

После доработки 16.06.2020

Принята к публикации 06.08.2020

V.V. Rogov^{1,2}, I.D. Streletskaia³, N.A. Taratunina^{4,5},
A.N. Kurchatova⁶, R.N. Kurbanov⁷, T.A. Yanina⁸

LATE PLEISTOCENE CRYOGENESIS IN THE LOWER VOLGA RIVER REGION

The article presents the results of studying the evidences of cryogenesis in alluvial and loess-soil deposits of the Lower Volga River region. Four stages of the development of permafrost processes during the Late Pleistocene were newly recognized for the region through the example of the Srednyaya Akhtuba reference section. The processes of cryogenic transformation of sediments under seasonal freezing and the existence of perennial permafrost during the Late Pleistocene predetermined the composition, structure and properties of loess and paleosoils. Cryolithological, particle size and micromorphological analyzes of mineral matter were carried out for each horizon and the evidences of cryogenic processes were described to evaluate the paleogeographic conditions of their formation. The age of the main stages of cryogenic processes in the Lower Volga River region was determined by the optically stimulated luminescence method. The fourth stage of cryogenic processes took place during MIS-4 under the Atelian regression of the Caspian Sea. The third stage is expressed as large wedge-shaped structures (pseudomorphoses) on the border of loess and alluvial horizon; their formation relates to the degradation of ice wedges. During the first and second stages of freezing plastic deformations of sediments occurred.

Key words: loess, paleopermafrost, cryogenic weathering, coefficient of cryogenic contrast, luminescent dating, wedge-like structures, pseudomorphs

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 16-17-10103 – field works and absolute dating) and the Russian Foundation for Basic Research (projects no. 18-05-00376 – lithological studies, and 18-35-00619 – cryolithological studies). The authors are grateful to the reviewers of the paper for valuable comments and recommendations.

REFERENCES

Deng J., Wang L., Zhang Z.Z., Bing H. Microstructure characteristics and forming environment of late Quaternary Period loess in the Loess Plateau of China, *Environ. Earth Sci.*, 2010, no. 59, p. 1807–1817.

Grigoryeva I.Yu. *Mikrostroyeniye lessovykh porod* [Microstructure of loess soils]. Moscow, MAIK «Nauka / Interperiodika» Publ., 2001, 147 p. (in Russian)

Kolomenskiy E.N. O formirovaniy strukturno-teksturnykh osobennostey lessovykh porod [On the development of structural textural specifics of loess soils]. *Inzhenernaya geologiya*, 1988, no. 4, p. 3–17. (in Russian)

Konishchev V.N. *Formirovanie sostava dispersnykh porod v kriolitosfere* [Formation of the composition of dispersed grounds in the cryolithosphere]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981, 197 p. (in Russian)

Konishchev V.N., Rogov V.V. *Metody kriolitologicheskikh issledovaniy* [Methods of cryolithological investigations]. Moscow, MSU Publ., 1994, 135 p. (in Russian)

Konstantinov E.A., Eremenko E.A. Znachenie metoda lazernoy difraktsionnoy granulometrii pri izuchenii lessov (na primere razreza Melekino, Severnoye Priazov'ye) [Significance of the laser diffraction grain size analysis in the study of loess (for example Melekino section, the Northern Azov Sea region)]. *Otechestvennaya geologiya*, 2012, no. 3, p. 47–54. (in Russian)

Kruger N.I. *Less, ego svoystva i svyaz' s geograficheskoy sredoy* [Loess, its properties and relation to the geographical environment]. Moscow, Nauka Publ., 196, 254 p. (in Russian)

Larionov A.K., Shtern L.Y. Rezultaty izucheniya tonkoi strukturi lessovykh porod nenarushehnogo slozheniya na SEM [The results of fine structure analysis of undisturbed loess soils]. *Vestnik LGU. Geologiya, geografiya*, vol. 1, 1971, no. 5, p. 31–40. (in Russian)

Lessovye porody SSSR, Tom 1. Inzhenerno-geologicheskiye osobennosti i problemy ratsional'nogo ispol'zovaniya [Loess soils of the USSR, vol. 1. Engineering-geological features and the problems of sustainable use]. E.M. Sergeev, A.K. Larionov, N.N. Komissarova (Eds). Moscow, Nedra Publ., 1986, 232 p. (in Russian)

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Cryolithology and Glaciology, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: rogovvic@mail.ru

² Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre SB RAS, Laboratory of Cryotraceology, Senior Scientific Researcher

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Cryolithology and Glaciology, Associate Professor, PhD in Geography; e-mail: irinastrelets@gmail.com

⁴ Institute of Geography RAS, Departament of Quaternary paleogeography, junior, researcher, no academic degree; e-mail: taratuninana@gmail.com

⁵ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Recent Deposits and Pleistocene Paleogeography; e-mail: taratuninana@gmail.com

⁶ Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre SB RAS, Laboratory of Cryotraceology, Senior Scientific Researcher; e-mail: kanni@mail.ru

⁷ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Recent Deposits and Pleistocene Paleogeography, Senior Scientific Researcher, PhD in Geography; e-mail: roger.kurbanov@gmail.com

⁸ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: paleo@inbox.ru

Popov A.I. Lessovye i lessovidnye porody kak produkt kriolitogeneza [Loess and loess-like rocks as products of cryolithogenesis]. *Vestnik MGU, seriya geograficheskaya*, 1967, no. 6, p. 43–48. (in Russian)

Rogov V.V. Osobennosti morfologii chastits skeleta kriogenogo elyuvia [Features of morphology of particles of a skeleton cryogenic eluvium]. *Kriosfera Zemli*, 2000, vol. 4, no. 3, p. 67–74. (in Russian)

Sergeev E.M., Minervin A.V. Sushhnost' processa oblessovaniya v podzolistoj zone [Nature of the process of loessivation in the podzol zone]. *Vestnik MGU. Seriya geologicheskaya*, 1960, no. 3, p. 3–14. (in Russian)

Stevens T., Buylaert J., Lu H., Thiel C., Murray A., Frechen M., Yi Sh., Zeng L. Mass accumulation rate and monsoon records from Xifeng, Chinese Loess Plateau, based on a luminescence age model. *Journal of Quaternary Science*, 2016, vol. 31, p. 391–405.

Velichko A., Catto N., Tesakov A., Titov V., Morozova T., Semenov V., Timireva S. The structure of Pleistocene loess-paleosol formation in southern Russian plain based on data from eastern Azov sea region. *Abstract volume INQUA-SEQS 2010* (Rostov-on-Don, Russia, June 21–26, 2010), Rostov-on-Don, Russia, 2010, p. 184–187.

Velichko A.A., Borisova O.K., Zakharov A.L., Karpukhina N.V., Kononov Yu.M., Konstantinov Ye.A., Kurbanov R.N., Morozova T.D., Panin P.G., Semenov V.V., Tesakov A.S., Timireva S.N., Titov V.V. [Loess-soil formation of the south East-European Plain and its relationship with marine Azov-Black Sea sediments] *Fundamentalnye problem kvartera, itogi izucheniya i osnovnye napravleniya dalnejshih issledovanij* [Fundamental problems of Quaternary, results and main trends of future studies] (Irkutsk, September 15–20, 2015). Irkutsk, V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS Publ., 2015, p. 86–87. (in Russian)

Woronko B., Pisarska-Jamrozy M. Micro-scale frost weathering of sand-sized quartz grains. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2015, no. 27, p. 109–122.

Yanina T.A., Svitoch A.A., Kurbanov R.N., Murray A.S., Tkach N.T., Sychev N.V. Opyt datirovaniya pleystotsenovykh otlozheniy Nizhnego Povolzh'ya metodom opticheskii stimulirovannykh lyuminescentsii [Paleogeographic analysis of the results of OSL dating of Pleistocene deposits of the Lower Volga area]. *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2017, no. 1, p. 21–29. (in Russian)

Received 18.02.2020

Revised 16.06.2020

Accepted 06.08.2020

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 314.742

М.С. Савоскул^{1,2}

ИММИГРАЦИЯ В ФРГ ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XX ВЕКА

В статье рассмотрены основные этапы международной миграции населения в Германии во второй половине XX в. За этот период можно выделить три этапа миграции. Первый – послевоенный период и 1960-е гг. В это время происходили возвратные миграции и были заложены меры миграционной политики, привлекающие трудовых мигрантов в страну. Второй этап (1970–1980-е гг.) – формирование потоков трудовых мигрантов в Германию, составивших основные группы иностранцев в стране. В это время сформированы основные подходы к политике интеграции мигрантов и направления исследований международных мигрантов. Третий этап миграций (1990–2010-е гг.) определен сменой политической системы в Восточной Европе, распадом СССР, а также формированием единого Европейского рынка труда. В результате международных миграций за 60 лет доля иностранных граждан в Германии выросла практически до 10% от населения страны и составляет более 8 млн человек. Германия лидирует среди стран Западной Европы по количеству прибывающих мигрантов. В статье рассмотрены трансформации характера миграционного процесса, проведено сопоставление изменения миграционной ситуации с основными направлениями исследования международной миграции населения, сделан акцент на трансформацию научного дискурса вокруг миграционных исследований в ФРГ. Рассмотрено изменение отношения научного сообщества и государства к вопросу интеграции мигрантов в Германское общество в зависимости от масштабов и структуры миграционного потока.

Приведены характеристики каждого этапа миграции, основные черты интеграционной политики и основная тематика исследований. Прослежен тренд на расширение проблематики исследований по мере роста доли и численности мигрантов. Показана современная география международных миграций в Германии. В заключении рассмотрена возможность применения «уроков» миграционного опыта ФРГ для современной миграционной ситуации в России, которая относительно недавно стала страной, активно привлекающей международных трудовых мигрантов.

Ключевые слова: международная миграция населения, миграционная политика, интеграция мигрантов, Германия

Введение в проблематику. Германия является страной, привлекающей мигрантов, но по характеру миграционного прироста и по иммиграционной истории отличается и от стран, обладавших значительным числом колоний, и от стран, население которых формировалось за счет постоянного миграционного притока. Численность иностранцев, проживающих в ФРГ более 6 месяцев, составила в 2018 г. 10 млн человек, что составляет 12,2% от всего населения страны.

Миграционная история Германии более чем за 50 лет позволяет проследить цикличность процесса миграции, выявить изменение географии стран-доноров трудовых мигрантов. В стране во второй половине XX в. несколько раз менялись структура потоков мигрантов, направления миграционной и интеграционной политики и отношение властей страны к мигрантам, научный дискурс отношения к мигрантам и тематика исследований.

Германия прошла несколько стадий отношения к вопросам интеграции международных мигрантов. От превалирования позиции о первоочередной интеграции мигрантов на рынке труда, а в социальном

отношении обеспечения условий проживания, когда вопросы культурной интеграции не считались первостепенными, до осознания важности вопросов культурной, религиозной и политической интеграции мигрантов как полноценных участников социальных процессов в стране.

Для России, которая с недавнего времени активно принимает международных трудовых мигрантов, опыт Германии может быть полезен во многих отношениях. В отечественной научной литературе не так много обобщающих работ, касающихся миграционной политики и изучения мигрантов в Германии. Еще меньше работ, касающихся специфики изучения международных мигрантов. Опыт Германии важен, прежде всего, с точки зрения проблематики социально-экономической и культурной интеграции мигрантов в принимающее сообщество.

В статье представлены основные этапы приема внешних трудовых мигрантов в ФРГ, проанализированы этапы миграции во второй половине XX в., сделан акцент на специфике миграционного научного дискурса в стране.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра экономической и социальной географии России, докт. геогр. н., доцент, зав. кафедрой; e-mail: savoskul@yandex.ru

² Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, исследователь

Обзор отечественных исследований. Среди отечественных публикаций не так много работ, посвященных миграционной ситуации в Германии или адаптации мигрантов в Германии. Можно отметить публикации Т.Н. Войлоковой [2013], Л.Б. Карачуриной [2008], характеризующие миграционную политику Германии, В.С. Малахова [2015], затрагивающие общие вопросы интеграции мигрантов. Больше работ по интеграции российских немцев или других мигрантов из России и бывшего СССР в Германии [Зевелева, 2014; Савоскул, 2015], по особенностям учета мигрантов, в том числе в Германии [Денисенко, 2012; Потапова, 2017].

Источники информации и методы исследования. Источниками информации послужили данные миграционных отчетов Германии и статистики министерства внутренних дел Германии, публикуемые в открытых статистических источниках на сайтах www.bamf.de, www.bmi.de, www.destatis.de. Рассматриваемый в статье временной период затрагивает 1951–2014 гг. до начала нового этапа международной миграции в ФРГ, связанного с массовым притоком беженцев и вынужденных переселенцев, который еще не получил достаточного освещения в научной литературе и требует отдельного исследования. Статистические данные приведены до 2018 г. Структура мигрантов по странам рассмотрена с 1967 г., так как более ранние сведения не удалось найти в открытых статистических источниках. До 1967 г. приведена общая информация, характеризующая международную миграцию. Часть статистических данных взята из работ других авторов. В статье использованы публикации немецких и российских

ученых, основным методом исследования стал анализ статистических данных и научной литературы.

Обсуждение результатов. Этапы международной миграции в Германии. Начиная с конца 1940-х гг. и до начала 2000-х гг. можно выделить три этапа приема иностранных граждан в Германии, отличающихся друг от друга по масштабам миграции, ее причинам, структуре и географии мигрантов, миграционной политике и научному миграционному дискурсу. В статье сознательно не выставлены жесткие границы рассматриваемых этапов с указанием до конкретного года, поскольку миграционный процесс растянут во времени и его характер, причины миграции, структура миграционного потока меняются постепенно за исключением всплесков миграции.

За более чем 60 лет Германия стала страной, активно привлекающей международных мигрантов, доля иностранцев в населении страны как один из индикаторов масштабов миграции выросла от 1% в начале 1950-х гг. до почти 10% к началу 2000-х гг. (рис. 1). Численность постоянно (более 6 месяцев) проживающих в стране иностранных граждан выросла от 500 тыс. до более чем 8 млн человек.

Помимо въезда трудовых мигрантов, Германия во второй половине XX в. стала страной, куда направлялось большое количество беженцев и вынужденных переселенцев (рис. 2).

За весь рассматриваемый период миграционный прирост иностранного населения характеризуется цикличностью, наблюдаются периоды снижения и роста сальдо миграции иностранных граждан. Средняя продолжительность миграционного цикла 10–12 лет (рис. 3). Но при этом Германия стабиль-

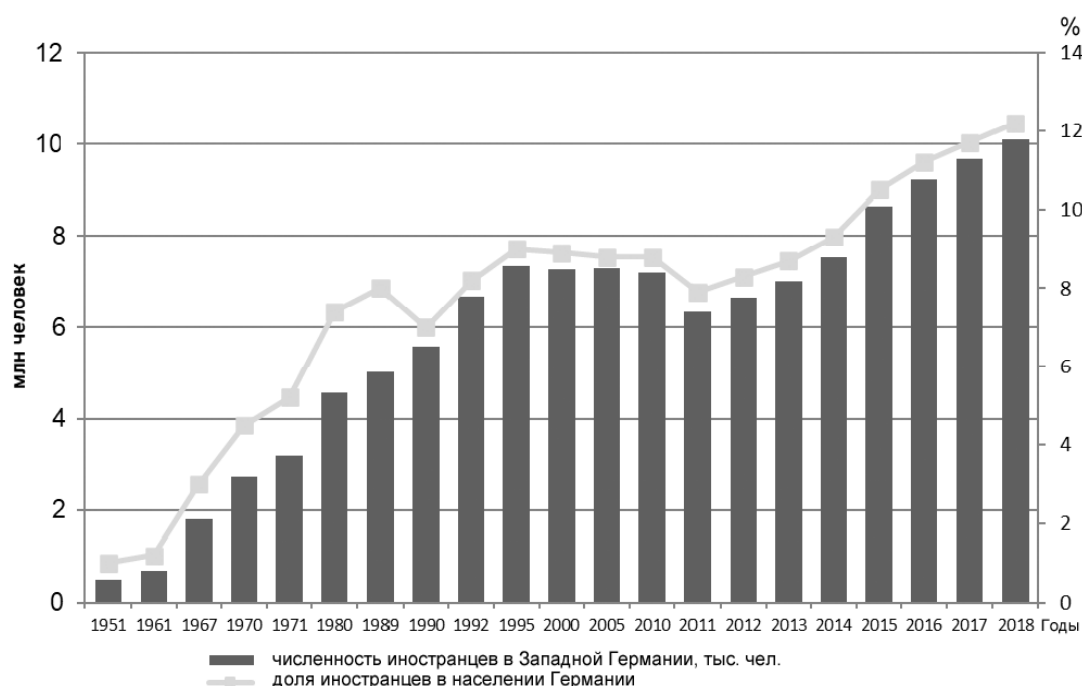


Рис. 1. Динамика численности и доли иностранцев в Германии (до 1990 г. без территории ГДР) [Migrationbericht ..., 2018]

Fig. 1. Dynamics of the number and proportion of foreigners in Germany (the data before 1990 – without the GDR territory) [Migrationbericht ..., 2018]

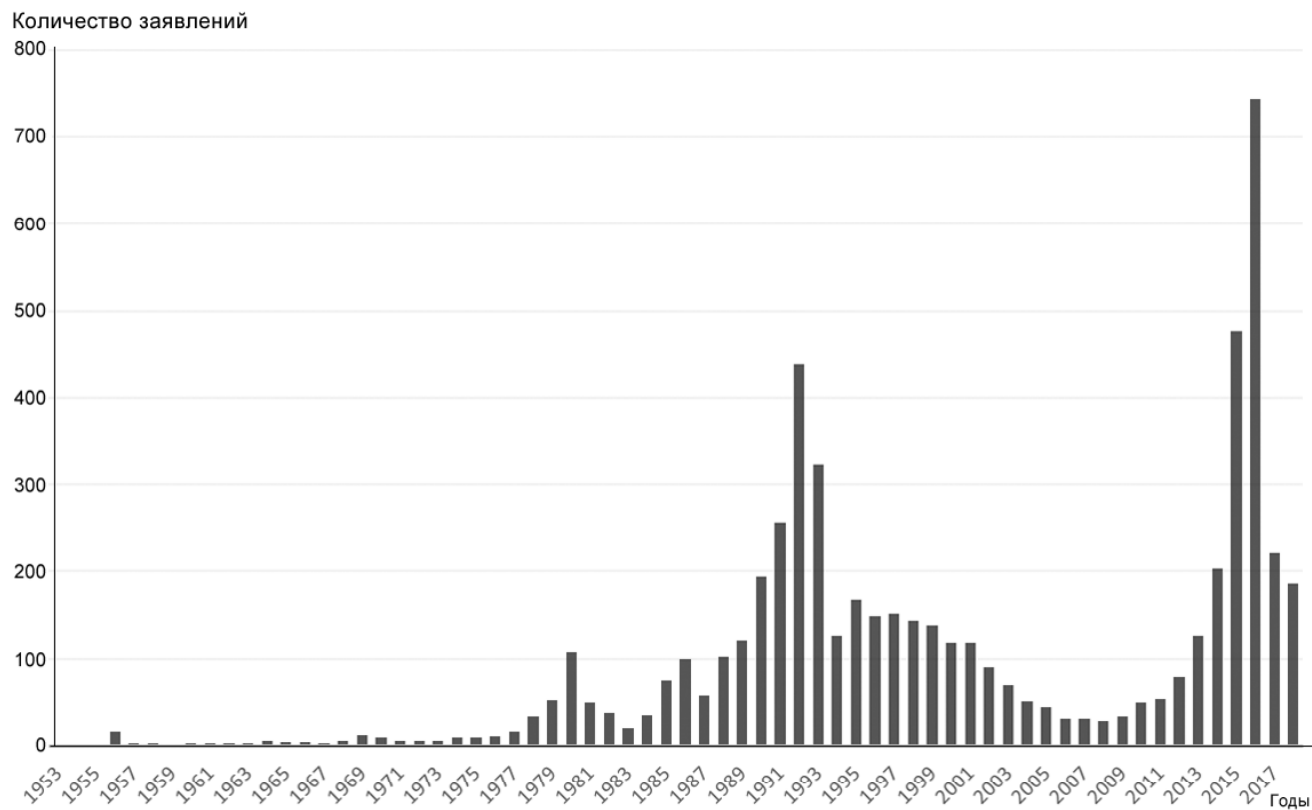


Рис. 2. Количество заявлений на получение статуса беженца в Германии в 1953–2018 гг. [Database ..., 2020]

Fig. 2. Number of applications for refugee status in Germany, 1953–2018 [Database ..., 2020]

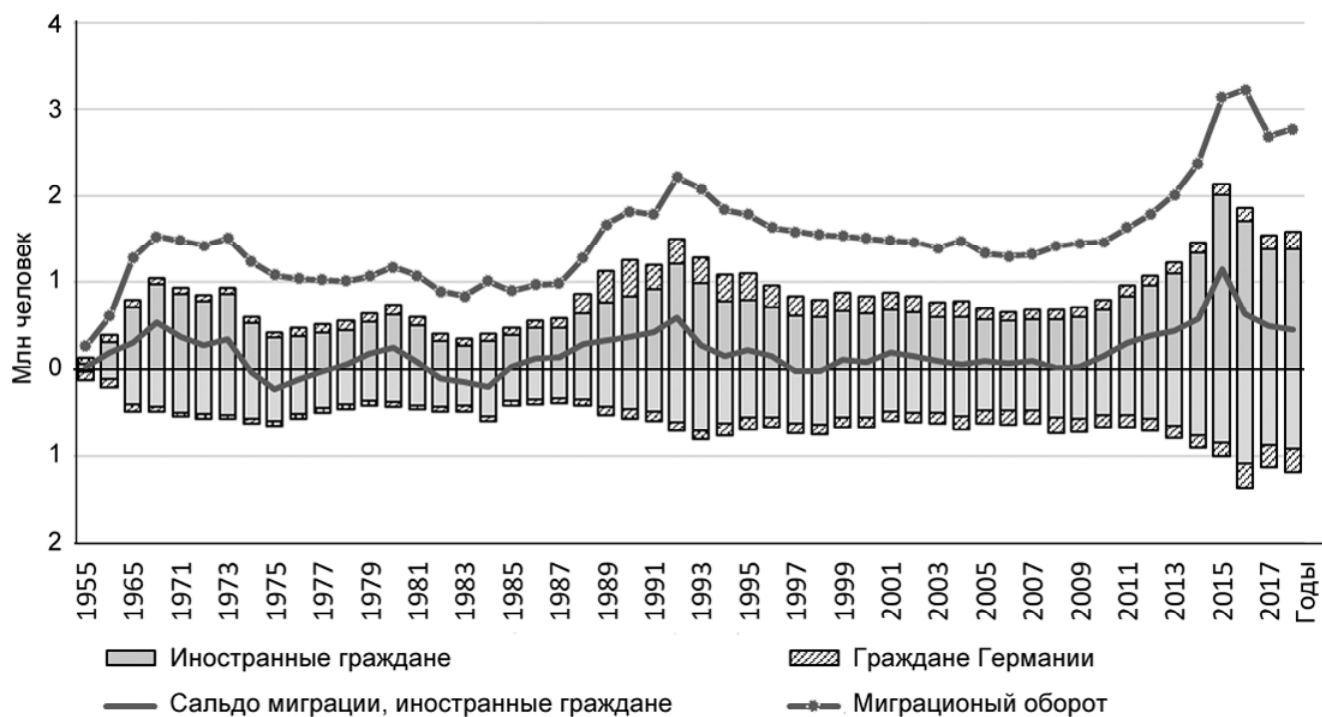


Рис. 3. Въезд и выезд иностранных граждан и граждан Германии в 1955–2018 г. (до 1990 г. данные без территории ГДР) [Migrationbericht ..., 2018]

Fig. 3. Entry and exit of foreign citizens and German citizens in 1955–2018, thousand people. (the data before 1990 – without the GDR territory) [Migrationbericht ..., 2018]

но наращивала число и долю иностранных граждан в населении страны.

Первый этап (1950–1960-е гг.) характеризуется, с одной стороны, возвратными миграциями немцев, с другой – началом формирования стабильного потока трудовых мигрантов в Германию. В первое десятилетие после 1945 г. в Германию возвращались беженцы, приезжали этнические немцы из других стран.

После образования ФРГ в 1949 г. в стране была принята программа интеграции мигрантов, первоочередная цель которой состояла в облегчении социальной напряженности на рынке труда и в жилищной сфере.

Интеграционная политика была выдвинута под лозунгом общей национальной идеи, основанной на необходимости нести общее бремя страны и распределить все лишения на всех немцев [Rogge, 1959]. Интеграция данной миграционной когорты оказалась менее проблематичной, чем предполагалось, и была обеспечена в достаточно короткий период после окончания войны [Bommes, 2010].

С 1955 г. Германия в рамках политики «экономического чуда» начинает привлекать трудовых мигрантов. Этот год можно считать началом активной международной миграции в ФРГ. С 1955 г. по 1968 г. Германия привлекает мигрантов из Италии (1955 г.), Испании и Греции (1960 г.), Турции (1961 г.), Марокко (1963 г.), Португалии (1964 г.), Туниса (1965 г.), Югославии (1968 г.). Среди мигрантов преобладали мужчины от 20 до 40 лет, только позже началась миграция родственников трудовых мигрантов [Migration und Integration, 2014].

В 1960-е гг. наблюдалась активная возвратная миграция трудовых мигрантов из Италии, Испании и Греции обратно в свои страны. Ведущими группами иностранных граждан в ФРГ становятся граждане Турции и Югославии.

Исследования миграции в Германии на данном этапе не велись в рамках определенной теоретической концепции. Термин «интеграция» использовался в различных значениях и контекстах.

Среди преобладающих направлений исследований международной миграции в этот период можно отметить работы, посвященные *стадиям интеграции*. В. Аккерманн [Ackermann, 1990] пишет, что в 1959 г. исследователи предложили теорию, которая описывала три стадии интеграции иммигрантов: на первом этапе мигранты должны были найти работу и жилье, на втором – необходим был социальный успех и рост безопасности. Оба условия рассматривались как необходимые и предшествовавшие третьей стадии – культурной интеграции, предполагавшей трансформацию культурной идентичности мигрантов.

Исследования влияния миграции на рынок труда. В 1950-е гг. структурные трансформации на рынке труда привели к решению проблем занятости для многих беженцев и переселенцев.

Теоретическая концепция «методологического национализма». В работах М. Бома и А. Кара-

зек-Лангера отмечается, что политические рамки этих структурных изменений в экономике создавала новая послевоенная национальная идея Германии, которая была сформулирована как «национальное сообщество общей судьбы» (nationale Schicksalsgemeinschaft) [Boehm, 1959; Karasek-Langer, 1959]. Государство виделось посредником между индивидуальными стратегиями мигрантов и общественными интересами.

Обязательным условием вхождения мигрантов в общество было то, что они становились участниками государственного строительства и полноправными гражданами принимающей их страны. Подход получил название «методологического национализма» и часто критикуется в современных публикациях [Tenbruck, 1989].

Развитие идей государства социального благосостояния в связи с вхождением мигрантов в общество. В 1960–1970-х гг., в связи с развитием в Германии идеи социальной рыночной экономики (social market economy) [Ференбах, 2001], начинают меняться акценты изучения иммиграционных процессов. Многие исследования проводятся в рамках развития концепции социального государства (welfare state). Разрыв поколений между исследователями отчетливо прослеживается при сравнительном анализе тематики работ по миграциям в 1950–1960-х гг. и последующим периодом 1970–1980 гг., что определяется миграционной ситуацией этих периодов.

Первый этап миграции в Германии можно считать временем адаптации государства и научного сообщества к появлению международных мигрантов в стране. В этот период закладываются основные подходы к изучению международной миграции населения, оформляются основные исследовательские темы. Количество работ и исследовательских центров международной миграции населения еще относительно не велико. Во многом это обусловлено самой миграционной ситуацией в этот период, так как ФРГ только наращивает масштабы трудовой миграции в стране.

К концу первого этапа в 1970 г. в стране насчитывается менее 3 млн постоянно проживающих иностранных граждан и их доля составляет около 4% от всего населения ФРГ.

Второй этап (1970-е – 1980-е гг.). Резкий рост иностранного населения Германии начинается с середины 1980-х гг., до середины 1990-х гг. В конце 1980-х гг. в Германию въезжает значительное количество этнических немцев из Польши (табл. 1). К концу этого этапа Германия уже принимает значительное количество беженцев (см. рис. 2).

Данный этап стал периодом активного притока трудовых мигрантов и членов их семей в страну из разных стран. Трудовые мигранты закрепляются в стране, многие начинают получать немецкое гражданство. Формируется многочисленная исламская диаспора в основном вследствие активной миграции из Турции. Мигранты становятся частью повседневной, общественной и экономической

Таблица 1

Численность иностранных граждан в Германии и доля стран среди всех иностранцев в 1960–2000-е гг.

Страна	1967		1979		1989		1999		2009	
	тыс. человек	%	тыс. человек	%	тыс. человек	%	тыс. человек	%	тыс. человек	%
Турция	172	9,5	1268	30,6	1613	33,3	2054	28,0	1658	24,8
Югославия*	141	7,8	621	15,0	610	12,6	737	10,0	499	7,5
Италия	413	22,9	594	14,3	519	10,7	616	8,4	517	7,7
Греция	201	11,1	297	7,2	294	6,1	364	5,0	278	4,2
Испания	177	9,8	182	4,4	127	2,6	130	1,8	104	1,6
Австрия	116	6,4	169	4,1	171	3,5	186	2,5	175	2,6
Португалия	24	1,3	110	2,7	75	1,5	133	1,8	113	1,7
Нидерланды	98	5,4	106	2,6	101	2,1	110	1,5	135	2,0
США	48	2,7	74	1,8	86	1,8	112	1,5	99	1,5
Великобритания	25	1,4	73	1,8	86	1,8	113	1,5	96	1,4
Франция	38	2,1	65	1,6	78	1,6	107	1,5	107	1,6
Польша	54	3,0	51	1,2	220	4,5	292	4,0	399	6,0
Иран	15	0,8	21	0,5	81	1,7	116	1,6	52	0,8
Россия	0	0,0	0	0,0	0	0,0	98	1,3	189	2,8
Остальные страны	285	15,8	513	12,4	785	16,2	2176	29,6	2274	34,0
Всего	1807	100	4144	100	4846	100	7344	100	6695	100

*Данные за 2009 г. приведены суммарно по странам бывшей Югославии. Составлено автором по [Statistisches Bundesamt, 2020].

кой жизни страны, что находит отражение в работах этого времени. Расширяется число исследований и их тематика.

С середины 1980-х гг. число публикаций возросло настолько, что стало невозможно в одной работе единичному исследователю сделать обобщение и проанализировать поле миграционных исследований как единое целое. Трайбел [Treibel, 1988] отмечает, что в 1970–1985 гг. в Германии вышли более 400 публикаций, которые принимали во внимание только социологические подходы к анализу миграций.

Миграционные исследования этого периода «выросли» из направления, которое именовалось «исследование гастарбайтеров» (Gastarbeiterforschung), но вскоре они получили более широкое название «исследование иностранцев» (Ausländerforschung). И только к середине 1980-х гг. эти работы стали приобретать характер общих миграционных исследований (Migrationforschung).

Государство продолжало рассматриваться исследователями как структура, определяющая рамочные условия для изучения иммиграционных про-

цессов, исследования проводились с точки зрения государственных задач [Bommers, 2010].

Социально-историческое направление исследования международных миграций. В 1980-х гг. появились социально-исторические работы, посвященные послевоенным иммиграциям и интеграции иммигрантов в немецкое общество [Bade, 1992]. Они проводятся уже новым поколением германских исследователей [Hoffmann-Nowotny, 1973; Esser, 1981, 1986] в контексте культурных и политических настроений, следовавших за событиями 1968 г.

Преобладающей темой миграционных исследований становится *социальная интеграция мигрантов*. Определения и значения понятия «интеграции» в большом количестве источников тесно связаны с перспективами развития Западной Германии как социального государства. З. Вилперт [Wilpert, 1984] отмечает, что для большей части исследователей 1970-х гг. с точки зрения социальной теории трудовые иммигранты и их семьи воспринимались как внешний для германского общества элемент, который необходимо адаптировать к общественным структурам, а не как часть общества.

Этнические аспекты изучения миграции. В этом историческом периоде Германия столкнулась со значительным количеством этнических трудовых мигрантов и членов их семей. В силу историко-политических причин преобладало рассмотрение проблем всех этнических мигрантов в качестве единой общей проблемы иностранцев без учета этнокультурных особенностей их различных групп. Вопросы интеграции мигрантов не рассматривались в этническом контексте.

Рассмотрение мигрантов как этнических меньшинств не получило широкого распространения не только потому, что это не нашло отклика у государства и исследователей, но и потому, что мигранты сами себя не артикулировали с позиции этнических меньшинств.

Теоретический подход «методологический индивидуализм» был предложен Х. Эссером [Esser et al., 1979]. Ученый предполагает, что социальная интеграция иммигрантов зависит от успеха культурных, структурных и социальных ассимиляционных процессов. Иммигранты понимались Х. Эссером как рациональные акторы, реализующие собственные цели в порядке максимизации своих субъективных преимуществ. Взаимодействие между иммигрантами и общественными структурами было определено как решающее в ходе процесса социальной интеграции и ассимиляционных усилий иммигрантов, что делало их вхождение в общество успешным или неудачным.

Роль сетевых структур мигрантов в их интеграции. Противоположную позицию представлял Г. Элwert [Elwert, 1982]. Суть дискуссии была в следующем: являются ли сетевые структуры иммигрантов «барьером» или, наоборот, «мостом» для интеграции иммигрантов в принимающее общество.

Изучение социализации детей мигрантов. Весомым вкладом в миграционные исследования в этот период стала работа коллектива под руководством А. Шрадера «Второе поколение. Социализация и аккультурация иностранных детей в Федеральной Республике» [Schrader et al., 1976]. Авторы, основываясь на эволюционной модели культурной социализации, полагали, что дети иммигрантов, попавшие в Германию в дошкольном возрасте, будут легче воспринимать нормы и ценности принимающего сообщества, следовательно, будут способны к культурной ассимиляции и смогут легче справляться с трудностями интеграции. Эта модель обрела большую популярность в педагогике Германии, которая старалась обеспечить образовательную систему механизмами ухода от социальных вызовов интеграции иностранцев.

Мультикультурализм как подход в изучении международных миграций. Многие предыдущие концепции стали критиковаться с позиции так называемого мультикультурного подхода, который возник, исходя из политических и социальных условий в стране. С точки зрения образования и социальной работы это выражалось в утверждении, что культуры различны, но равноценны. Этот подход критико-

вал предыдущие за односторонность и игнорирование того, что система образования и другие институты не учитывают неизбежность работы не в монокультурном обществе [Leggewie, 1990]. Мультикультурализм, который обрел популярность уже в 1990-е гг., обратил внимание на эти особенности предшествующего периода и стал развивать взаимную общественную толерантность.

Структурно-функционалистский подход (structural functionalist approach) Г.-Дж. Хоффманна-Новотного [Hoffmann-Nowotny, 1973] строился на превалировании престижа власти как фундаментальном структурном условии «социальных подсистем». Ученый различает уровни систем от национальных подсистем различных размеров до международных и общемировых систем. Миграции в этой теории понимались как механизм компенсации и передачи структурных тенденций в/между социальными системами, уравнивания несоответствие ресурсов статуса, власти, престижа. Эффект от трудовой миграции проявился в появлении новых классов у основания существовавшего ранее классового общества. Этот подход стал одним из самых влиятельных теоретических подходов в миграционных исследованиях на более чем 30 лет.

Марксистские теории рынка труда в миграционных исследованиях. Трудовые миграции в рамках неомарксизма рассматривались с точки зрения международных классовых отношений как проявление международной эксплуатации, приводящее к неравенству социальных отношений. К. Досе [Dohse, 1981] рассматривал теорию буржуазного общества и описывал миграционную политику Германии в XIX и XX вв. как конфликтное взаимодействие между капиталистической рыночной экономикой и государством, заинтересованным в воспроизводстве его властной базы.

К этому направлению также можно отнести работы К. Баде [Bade, 1996] и Ф.-О. Радтке [Radtke, 1990], которые рассматривали культуру мигрантов как одну из важных переменных их социально-структурных позиций в новом обществе с точки зрения их жизненных шансов. Неомарксисты обращают внимание на структурные характеристики общества и положение мигрантов на рынке труда с позиции формирования общественного неравенства. После 1989 г. марксистские подходы в Западной Германии стали частью новых миграционных теорий, например, теории сегментированного рынка труда [Piore, 1979].

До конца 1980-х гг. международные трудовые мигранты и члены их семей в Германии были исключены из политической и гражданской жизни Германии. Эти вопросы не затрагивались и в исследованиях мигрантов. В политическом отношении наблюдался устойчивый отказ от участия иммигрантов в жизни страны и от того, чтобы передавать им политические права в дальнейшем.

На втором этапе международных миграций в Германию мигранты становятся неотъемлемой и многочисленной частью общества. В стране к концу 1980-х гг. насчитывается более 5 млн трудовых

мигрантов и членов их семей. Они составляют 8% населения Западной Германии. После объединения Германии этот процент снижается, но потом в 1990-е гг. быстро выходит на прежний уровень. Отличительной чертой данного этапа становится рост числа турецкого населения в ФРГ, за 1967–1979 гг. количество граждан Турции, проживающих в Германии, выросло от 172 тыс. до 1 млн 268 тыс. человек (табл. 2). Также произошел существенный рост количества мигрантов из Югославии (от 140 тыс. в 1967 г. до 621 тыс. в 1979 г.).

Основной исследовательский вопрос на данном этапе в миграционных исследованиях состоял не в том, как мигранты меняют экономическую, юридическую, политическую, образовательную, религиозную и другие структуры общества, а в том, как мигранты могут быть включены в общественные структуры и адаптированы к ним [Bommes, 2010].

Третий этап (1990-е гг. – начало 2010-х гг.). Многие исследователи и общественные деятели в конце 1980-х гг. считали, что Германия достигла своего пика численности международных мигран-

Таблица 2

Этапы международной миграции в Германии во второй половине XX в.

Этап	Общая характеристика миграционного потока	Общие масштабы международной миграции	Страны-доноры мигрантов в этот период	Основные направления исследований
1 этап, 1950–1960-е гг.	Возвратные миграции немцев после 1945 г., потоки трудовых мигрантов из Южной Европы, Северной Африки, Турции, низкая доля семейных мигрантов, преобладание мужчин в миграционном потоке	Доля мигрантов выросла от одного до четырех процентов. Количество иностранцев – от 500 тыс. до 2,5 млн человек. Миграционный оборот – от 260 тыс. в середине 1950-х гг. до 1,5 млн чел. к 1970 г. Поток беженцев небольшой. Максимальное количество поданных заявлений – 12 тыс. в 1969 г.	Италия, Испания, Греция, Португалия, Югославия, Турция, Австрия, Нидерланды	Изучение стадий интеграции мигрантов; влияние миграции на рынок труда, концепция «методологического национализма», развитие идей государства социального благосостояния в связи с вхождением мигрантов в общество
2 этап, 1970–1980-е гг.	Закрепление трудовых мигрантов в стране, активные семейные миграции, рост исламской общины в стране. Количество граждан Турции выросло в 7 раз по сравнению с 1967 г. Выходцы из Турции составляют более 1,2 млн в 1979 г. и 30% от всех иностранцев в стране. Начало приема беженцев в ФРГ.	Доля иностранцев достигла 8%. Количество иностранцев выросло до 5,5 млн человек. Количество заявлений от беженцев в 1980 г. превысило 100 тыс. Среднегодовой миграционный оборот за период составлял около 1 млн человек, в 1989 г. – 1,6 млн человек.	Турция, Югославия, Италия, Греция, Испания, Австрия, Португалия, Нидерланды	Социально-исторические исследования международных миграций, интеграции мигрантов, этнические вопросы миграции, «методологический индивидуализм», изучение сетевых структур мигрантов, социализация детей мигрантов, мультикультурализм, структурно-функционалистский подход, марксистские теории рынка труда
3 этап, 1990–2010-е гг.	Масштабный въезд российских немцев еврейского населения в ФРГ (более 2 млн российских немцев из стран СНГ), рост числа беженцев, рост потока трудовых мигрантов из стран Восточной Европы, выезд высококвалифицированных граждан Германии. После 2002 г. формирование общеевропейского рынка труда. Расширение географии международной миграции.	К концу периода доля иностранцев выросла от 7% (произошло снижение доли из-за объединения Германии) до 10%, количество иностранцев от 5,5 млн до 7,5 млн в 2014 г. Миграционный оборот вырос до 2 млн человек в год. Начало периода сопровождалось резким ростом потока беженцев в страну. Максимальное количество заявлений – 438 тыс. в 1992 г.	Россия, Казахстан, Турция, страны бывшей Югославии, Польша, Италия, Австрия, Румыния, Болгария, Украина	Изучение российских немцев, интеграция иммигрантов в систему образования, социальное обеспечение мигрантов, трудовая миграция и ее экономические эффекты, сезонная миграция, миграция высококвалифицированных мигрантов, нелегальная миграция, транснациональный подход

Составлено автором.

тов в пять–шесть млн человек, а доля мигрантов в населении страны будет колебаться вокруг 8% населения. Но реальная картина оказалась другой, иммиграционная ситуация в Германии изменилась кардинальным образом по сравнению с предыдущим периодом.

Во-первых, это проявилось в небывалом по численности потоке этнических немцев из СССР, а затем из России и стран ближнего зарубежья. Миграция этнических немцев отличалась от миграции международных трудовых мигрантов как по своим структурным характеристикам, так и по мотивам миграции, по особенностям политической и социальной интеграции. Во-вторых, в объединенную Германию стали активно въезжать мигранты из стран Восточной Европы. В-третьих, после 1989 г. Германия столкнулась со значительным количеством беженцев и переселенцев, которые в предыдущие 30 лет не составляли для страны значимый поток.

В этот же период происходит рост числа конфликтов между разными группами мигрантов, между мигрантами и немцами.

Появились новые виды международной трудовой миграции: сезонная миграция, контрактные рабочие и другие формы. Также активно стали приезжать контрактные рабочие из Португалии, Ирландии и других стран в рамках единого рынка труда в Европейском союзе.

Новым явлением объединенной Германии стал поток мигрантов из восточной части страны в западные земли, что также требовало изучения.

К 2014 г. формируются значительные по размеру группы иностранных граждан из Турции (более 1,5 млн человек), Польши (674 тыс. человек), Италии (575 тыс. человек) и стран, образовавшихся после распада Югославии (рис. 4). Мигранты из России без учета российских немцев и членов их семей, а также без учета контингентных беженцев (еврейских переселенцев) составляли на конец 2014 г. чуть более 220 тыс. человек. А все эмигранты из

бывшего СССР по разным оценкам составляют в Германии 2–2,5 млн человек, с учетом российских немцев, еврейских переселенцев, студентов и переехавших по семейным причинам.

Изменение структурных и количественных характеристик международной миграции повлекло за собой новый этап в изучении миграции населения в Германии. В этот период миграции стали одной из важнейших политических тем, что привело к институционализации миграционных исследований, созданию ряда исследовательских центров, специализирующихся на миграционной тематике.

Одной из актуальных исследовательских тем в этот период стало *изучение российских немцев*. После 1991 г. эмиграция немцев и членов их семей из бывшего СССР активизировалась одновременно с осложнением политической и экономической ситуации в странах СНГ. Пик был достигнут в 1994 г., когда из бывших республик СССР выехали в Германию 213,2 тыс. этнических немцев и членов их семей. За 15 лет (1989–2004 гг.) в Германию из бывшего СССР выехали 2 млн 152 тыс. этнических немцев и членов их семей [Савоскул, 2016].

Тематика работ по этническим немцам касалась их интеграции в образовательную систему, вопросов обеспечения жильем, вхождения на рынок труда. Внимание уделялось адаптации семей и второму поколению мигрантов. Среди работ можно отметить публикации Б. Диец [Dietz, 1998], К. Циммермана [Zimmermann, 1999], М. Боммеса и др.

Вопросы интеграции иммигрантов в систему образования. В этом направлении преобладающими темами исследований были такие: влияние семьи на образовательную базу детей мигрантов; культурные конфликты в сфере образования; процессы овладения немецким языком среди турецких и немецких подростков в условиях городского соседства; роль традиций в школьном образовании Германии для решения проблем иммигрантов; организационные условия, приводящие к дискриминации



Рис. 4. Граждане других стран, проживающие в Германии, тыс. человек на 31.12.2014 г. [Statistisches Bundesamt, 2020; Migrationbericht ..., 2018]

Fig. 4. Citizens of other countries living in Germany, thousand people as of 31.12.2014 [Statistisches Bundesamt, 2020; Migrationbericht ..., 2018]

детей мигрантов в школе. Значительная часть исследований имела прикладной характер и относилась к работам по педагогике, психологии, социальной работе.

Тема *миграции и вопросов гражданства и социального обеспечения* активизировалась с ростом этнической миграции в Германию в начале 1990-х гг. Возникли политические дебаты о влиянии миграции на систему социального обеспечения страны. Многие исследователи понимают национальные государства не как активные политические акторы, которые направляют процесс международной миграции, а скорее, как элементы общемировых миграционных процессов [Bommes, 2010].

Отдельной темой является изучение религии и особенно роли ислама в ходе процессов интеграции иммигрантов в Германии. Исследования акцентируют внимание на религиозных практиках мигрантов из Турции, анализируют трансформацию религиозной жизни этой группы мигрантов в течение более чем 20 лет жизни в Германии. Часть авторов считает, что участие в религиозных организациях может способствовать интеграции, другая часть придерживается противоположного мнения и считает, что для молодых мигрантов ислам становится барьером для интеграции.

Трудовая миграция и ее экономические эффекты стали одной из основных тем миграционных исследований в 1990-х гг. Возобновление внимания к этим вопросам вызвано, во-первых, вовлечением в процессы трудовой иммиграции в Германию выходцев из стран Восточной Европы после распада социалистической системы в начале 1990-х гг., во-вторых, формированием открытого рынка труда для стран Европейского Союза и активизацией политики Германии по привлечению высококвалифицированных мигрантов.

Значительное число работ концентрировалось на изучении *сезонной миграции в Германию*. Этот вид миграции оказывает существенное влияние на строительный сектор, сезонные гастарбайтеры-строители вызывают рост безработицы среди строительных рабочих – граждан Германии, которые ранее были заняты в экономике круглый год.

Привлечение высококвалифицированных мигрантов из-за границ Европейского Союза и открытие программы «Голубая карта» (Blaue Karte) [Голубая карта ..., 2016] для Германии имело важный политический эффект и рассматривалось как политический символ изменений в перспективах иммиграции в Германию [Ette, 2003]. Германия в 2000-е гг. стала уделять больше внимания выработке механизмов привлечения высококвалифицированных мигрантов, в том числе ИТ-специалистов [Kolb, 2004].

Вопросы нелегальной миграции изучаются в значительном количестве работ. Сложно определить масштабы нелегальной миграции, нет ясной картины относительно социально-экономических условий

существования нелегальных мигрантов в стране. Тем не менее, можно сказать, что значительная часть нелегальных мигрантов занята в двух отраслях экономики – в строительном секторе и в домашнем хозяйстве. Занятость в домашнем секторе во многом определяет трудности изучения нелегальных мигрантов, так как для многих сфера их занятости лежит в личном пространстве жителей страны, куда доступ исследователям затруднен. В значительной части исследований по нелегальной миграции также обращается внимание на права нелегальных мигрантов, вопросы их медицинского обслуживания, условий жизни и т. д.

Еще одним направлением, важным в последнее десятилетие для Германии, становится *изучение адаптации высококвалифицированных специалистов* в организациях Германии и вопросы изучения привлекательности Германии для немецких высококвалифицированных кадров, поскольку исследования показывают, что молодые высококвалифицированные немцы предпочитают искать работу в США и Великобритании³.

Среди работ по теории миграции значимыми являются публикации Т. Файста [Faist, 2000] и Л. Приис [Pries, 1998] в рамках *концепции транснационализма* [Rethinking Transnationalism ..., 2008]. Из-за развития технологий, средств коммуникации, активного транспортного сообщения и т.д. трансграничные сообщества не становятся промежуточным для мигрантов этапом, а формируют особый образ жизни и новую социальную реальность. Многие группы современных международных мигрантов живут в транснациональном пространстве. Такое расширение социального пространства мигрантов ставит под вопрос исследовательскую позицию, которую можно назвать «методологическим национализмом». Положения транснационализма ставят под вопрос необходимость мигрантов интегрироваться полностью в принимающее общество, отказываясь от социальных и культурных норм страны выхода.

Третий этап международной миграции населения характеризуется массовой волной как трудовых мигрантов, так и беженцев. Возникают противоречия не только между местным сообществом и мигрантами, но и между различными группами мигрантов и внутри их сообщества. С развитием научно-технического прогресса и средств коммуникации трансформируется модель адаптации мигрантов. Они активно участвуют в жизни страны выхода и сохраняют социальные связи с родственниками и друзьями на родине, что формирует иное, чем раньше, социальное пространство мигрантов. Характер и противоречия третьего этапа миграции определили тематику миграционных исследований и появление новых теоретических подходов.

В 2015 г. начинается следующий этап в развитии международной миграции в Германии, что связано с небывалым притоком беженцев в страну. В 2018 г. количество иностранных граждан, постоян-

³ См. например: <http://www.bib-demografie.de>.

но проживающих в Германии, превысило 10 млн человек, а их доля составила 12% от всех жителей страны.

Выводы:

– миграционные «уроки» Германии, которая обладает полувековым опытом приема международных мигрантов, могут быть полезны для России;

– анализ основных закономерностей и тренды изучения миграции населения позволяют сделать выводы, которые относятся к общим тенденциям развития международных миграций;

– несмотря на циклический характер международных миграций, в Германии за 60 лет произошло постепенное увеличение доли и количества международных мигрантов в населении страны; периоды стабилизации и спада миграции сменялись еще большим масштабом прироста мигрантов, за счет расширения географии стран-доноров мигрантов; к 1999 г. все больше стран вступают в миграционный обмен с ФРГ;

– на определенном этапе достигается миграционное «равновесие» между Германией и странами-донорами мигрантов. Например, количество мигрантов из Турции, долговременно проживающих в Германии, достигнув за короткий период (примерно за 15 лет) численности в 1,5 млн, выросло до 2 млн человек, но потом стабилизировалось на уровне в 1,5 млн человек; аналогичная ситуация с миграцией из Италии и др. странами;

– структура мигрантов по странам выхода за 60 лет трансформировалась, место стран Южной Европы заняла Турция, а после распада социалистической системы страны Восточной Европы, Россия, Казахстан; при этом основные 12 стран, участвующих в миграционном обмене с Германией, за 50 лет не изменились;

– география стран-доноров мигрантов определяется развитым рынком труда и развитой социальной сферой Германии, с одной стороны, и геополитической ситуацией – с другой;

– прирост беженцев обычно происходит с высокой скоростью, за один–два года достигается пик численности беженцев и затем происходит такой же быстрый спад;

– экономическая интеграция мигрантов, их вхождение на рынок труда происходит в Германии достаточно быстро, социальная и культурная интеграция протекают дольше и сложнее; требует больше усилий как от государства, так и от принимающего общества и самих мигрантов; это же касается и вынужденной миграции: экономическое бремя не так значительно, как политические и социальные последствия;

– анализ истории миграционных исследований подтверждает, что они развиваются как мощное междисциплинарное направление на стыке географии, экономики, социологии, политологии, этнографии и психологии. Чем разнообразнее и масштабнее характер международных миграций, тем разнообразнее тематика и больше количество проводимых исследований; за 60 лет количество миграционных исследований в Германии выросло в десятки раз и очень сложно поддается анализу и систематизации;

– тематика и региональный охват исследований зависят в существенной степени от следующих факторов: ход и масштабы миграционного процесса в стране; включенность страны в систему международных миграций населения; политическая ситуация в стране-доноре мигрантов; экономическая и социальная система страны;

– для Германии максимальную актуальность представляли вопросы изучения международных миграций, социальных и экономических последствий вхождения мигрантов в принимающее общество;

– независимо от факторов, определяющих тематику миграционных исследований, изучение миграций населения является сферой, затрагивающей важные вопросы внутренней и внешней политики стран, что приводит часто к противоположным выводам исследователей.

Благодарности. Данное исследование было поддержано из средств субсидии, выделенной на реализацию Программы повышения конкурентоспособности БФУ им. И. Канта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Войлокова Т.Н. Адаптация русскоязычных высококвалифицированных мигрантов к трудовой деятельности в Германии // Социологические исследования. 2013. № 1. С. 51–62.

Зевелева О.И. Миграционная политика и коллективная идентичность: опыт российских немцев в Германии // ПОЛИС. Политические исследования. 2014. № 6. С. 114–126.

Карачурина Л.Б. Иммиграционная политика Германии: успешный – неуспешный опыт // Мировая экономика и международные отношения. 2008. № 7. С. 50–60.

Малахов В.С. Интеграция мигрантов: концепции и практики. М.: Мысль, 2015. 272 с.

Савоскул М.С. Успешные мигранты из России и Украины во Франкфурте-на-Майне (Германия) // Мониторинг общественного мнения: экономические и социальные перемены. 2015. № 1. С. 118–131.

Ференбах О. Крах и возрождение Германии. Взгляд на европейскую историю XX века. М.: Аграф, 2001. 304 с.

Ackermann V. Integration: Begriff, Leitbilder, Probleme. *Neu Heimat in Westen: Vertriebene, Flüchtlinge, Aussiedler*. Bade K.J. (Ed.), Münster, Westfälischer Heimatbund, 1990, s. 14–36.

Bade K.J. Die multikulturelle Herausforderung: Menschen über Grenzen – Grenzen über Menschen, Munich, C.H. Beck, 1996.

Bade K.J. Deutsche im Ausland – Fremde in Deutschland. Migration in Geschichte und Gegenwart, Munich, G.H. Beck, 1992.

Boehm M.H. Gruppenbildung und Organisationswesen. *Die Vertriebenen in Westdeutschland. Ihre Eingliederung und Ihr Einfluss auf Gesellschaft, Wirtschaft, Politik und Geistesleben*, Lemberg E. and Edding F. (Ed.), Kiel, Hirt, 1959, s. 521–605.

Bommes M. Migration research in Germany: the emergence of a generalised research field in a reluctant immigration country. *National paradigms of migration Research*, Thränhardt D. (Ed.), Osnabrück, 2010, p. 129.

Dietz B. Jugentliche Aussiedler – Portrait einer Zuwanderergeneration. Frankfurt am Main, New York, Campus, 1998.

Dohse K. Ausländische Arbeiter und bürgerlicher Staat. Genese und Funktion von staatlicher Ausländerpolitik und Ausländerrecht. Vom Kaiserreich bis zur Bundesrepublik Deutschland, Königstein im Taunus, Athenäum, 1981.

Elwert G. Probleme der Ausländerintegration: Gesellschaftliche Integration durch Binnenintegration? *Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie*, no. 34, 1982, s. 717–731.

Esser H. Aufenthaltsdeutungen und die Eingliederung von Wanderern: Zur theoretischen Interpretation von soziologischen «Variablen». *Zeitschrift für Soziologie*, no. 10, 1981, s. 76–97.

Esser H. Ethnische Kolonien: «Binnenintegration» oder gesellschaftliche Isolation? *Segregation und Integration*, J. Hoffmeyer-Zlotnik (Ed.), 1986, s. 106–117.

Esser H., Gaugler E., Neumann K.-H. Arbeitsmigration und Integration. Sozialwissenschaftliche Grundlagen. *Materialien zur Arbeitsmigration und Ausländerbeschäftigung*, vol. 4, Königstein im Taunus, Peter Hanstein, 1979.

Ette A. Politische Ideen und Policy-Wandel: die «Green Card» und ihre Bedeutung für die deutsche Einwanderungspolitik. *Die deutsche «Green Card»: Migration von Hochqualifizierten in theoretischer und empirischer Perspektive (IMIS-Beiträge 22)*, Hunger U., Kolb H. (Ed.), Osnabrück, IMIS, 2003.

Faist Th. The Volume and Dynamics of International Migration and Transnational Social Spaces, Oxford, Oxford University Press, 2000.

Hoffmann-Nowotny H.-J. Soziologie des Fremdarbeiterproblems. Eine theoretische und empirische Analyse am Beispiel der Schweiz, Stuttgart, Enke, 1973.

Karasek-Langer A. Volkstum in der Wandlung. *Die Vertriebenen in Westdeutschland. Ihre Eingliederung und Ihr Einfluss auf Gesellschaft, Wirtschaft, Politik und Geistesleben*, Lemberg E. and Edding F. (Ed.), Kiel, Hirt, 1959, s. 606–694.

Kolb H. Einwanderung zwischen wohlverstandenen Eigeninteresse und symbolischer Politik. Das Beispiel der deutschen «Green Card», Münster, Lit, 2004.

Leggewie C. Multi Kulti – Spielregeln für die Vielvölkerrepublik. Berlin, Rotdud, 1990.

Migration und Integration. Aufenthaltsrecht, Migrations- und Integrationspolitik in Deutschland. Bundesministerium des Innern. Frankfurt am Main, Drucks- und Verlagshaus Zarbock, 2014, 215 s.

Piore M.J. Birds of Passage. Migrant Labour and Industrial Societies, Cambridge, Cambridge University Press, 1979.

Pries L. Transnationale soziale Räume. *Perspektiven der Weltgesellschaft*, U. Beck (Ed.), Frankfurt am Main, Suhrkamp, 1998, s. 55–86.

Radtke F.-O. Multikulti: Das Gesellschaftsdesign der 90er Jahre? *Informationdienst zur Ausländerarbeit*, no. 4, 1990.

Rethinking Transnationalism: the Meso-Link of Organisations, Pries L. (Ed.), London, New York, Routledge, 2008.

Rogge H. Vertreibung und Eingliederung im Spiegel des Rechts. *Die Vertriebenen in Westdeutschland. Ihre Eingliederung und Ihr Einfluss auf Gesellschaft, Wirtschaft, Politik und Geistesleben*, Lemberg E., Edding F. (Ed.), Kiel, Hirt, 1959, s. 174–245.

Schrader A., Nikles B., Hartmut G. Die Zweite Generation: Sozialisation und Akkulturation ausländischer Kinder in der Bundesrepublik, Kronberg, Athenäum, 1976.

Tenbruck F.H. Die kulturellen Grundlagen der Gesellschaft. Der Fall der Moderne, Opladen, Westduetcher Verlag, 1989.

Treibel A. Engagement und Distanzierung in der westduetchen Ausländerforschung. Eine Untersuchung ihrer soziologischen Beiträge, Stuttgart, Enke, 1988, s. 27.

Wilpert Cz. Intrnational Migration and Ethnic Minorities. New Fields for Post-War Sociology in the Federal Republic of Germany. *Current Sociology*, no. 22, 1984, p. 305–352.

Zimmermann K.F. Ethnic German Migration since 1989: Results and Perspectives. Forschungsinstitut zur Zukunft der Arbeit, Discussion Paper Series, Bonn, IZA, 1999.

Электронные ресурсы

Голубая карта Германии. URL: <http://www.bluecard-eu.de/blaue-karte-eu-deutschland> (дата обращения 30.04.2016).

Денисенко М.Б. Эмиграция из России в страны дальнего зарубежья // Демоскоп Weekly. 2012. № 513–514. 4–17 июня. URL: <http://www.demoscope.ru/weekly/2012/0513/index.php> (дата обращения 10.07.2020).

Потанова А.А. Эмиграция из России: текущее десятилетие // Демоскоп Weekly. 2017. № 719–720, 6–19 марта. URL: <http://www.demoscope.ru/weekly/2017/0719/index.php> (дата обращения 15.07.2020).

Савоскул М.С. Почему мигрант мигранту не всегда друг, товарищ и брат? // Демоскоп Weekly. 2016. № 681–682. 4–17 апреля. URL: <http://www.demoscope.ru/weekly/2016/0681/index.php> (дата обращения 15.07.2020).

Database of the Federal Statistical Office of Germany. URL: <https://www-genesis.destatis.de> (дата обращения 10.07.2020).

Migrationbericht der Bundesregierung, 2018. URL: www.bamf.de (дата обращения 15.07.2020).

Statistisches Bundesamt. URL: www.destatis.de (дата обращения 17.07.2020).

Поступила в редакцию 20.07.2020

После доработки 30.07.2020

Принята к публикации 06.08.2020

M.S. Savoskul^{1,2}

MIGRATION IN GERMANY IN THE SECOND HALF OF THE 20TH CENTURY

The article deals with the main stages of international migration in Germany in the second half of the 20th century. During the period three stages of migration could be identified. The first stage was the post-war period and the 1960s, when return migrations took place and migration policy measures were put in place to attract labor migrants to the country. During the second stage (1970–1980) flows of labor migrants to Germany were formed, and the principal groups of foreigners appeared in the country. At this time the main approaches to the policy of integration of migrants and the main directions of research on international

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Economic and Social Geography of Russia, Associate Professor, Head of the Department, D.Sc. in Geography; e-mail: savoskul@yandex.ru

² Immanuel Kant Baltic Federal University, Researcher

migrations were developed. The third stage of migration (1990–2010) is characterized by political system changes in Eastern Europe, the collapse of the USSR, and the formation of a single European labor market. As a result of the sixty-year-long international migration the proportion of foreign citizens in Germany has grown to almost 10% of the country's population accounting for more than 8 million people. Germany is the leader among Western European states in terms of the number of migrants arriving to the country. The article analyzes the transformations of migration process, correlates the changes in migration situation with the main lines of research on the international migration, and focuses on the transformation of scientific discourse around the migration research in Germany. The article considers the changing attitude of scientific community and the state to the issue of the integration of migrants into the German society, depending on the scale and structure of migration flows.

The characteristics of each migration stage are discussed, as well as the main features of integration policy and the main research topics. A trend of research agenda expansion with increasing proportion and number of migrants is revealed. The present-day geography of international migration flows in Germany is described. In conclusion, the possibility of applying the «lessons» of the German migration experience to the current migration situation is considered for Russia, which has recently become a country that actively attracts international labor migrants.

Key words: international migration, migration policy, integration of migrants, Germany, migration research

Acknowledgements. The study was financially supported from the Russian Academic Excellence Project at the Immanuel Kant Baltic Federal University.

REFERENCES

- Ackermann V. Integration: Begriff, Leitbilder, Probleme. *Neu Heimat in Westen: Vertriebene, Flüchtlinge, Aussiedler*. Bade K.J. (Ed.), Münster, Westfälischer Heimatbund, 1990, s. 14–36.
- Bade K.J. *Die multikulturelle Herausforderung: Menschen über Grenzen – Grenzen über Menschen*, Munich, C.H. Beck, 1996.
- Bade K.J. *Deutsche im Ausland – Fremde in Deutschland. Migration in Geschichte und Gegenwart*, Munich, G.H. Beck, 1992.
- Boehm M.H. Gruppenbildung und Organisationswesen. Die Vertriebenen in Westdeutschland. *Ihre Eingliederung und Ihr Einfluss auf Gesellschaft, Wirtschaft, Politik und Geistesleben*, Lemberg E. and Edding F. (Ed.), Kiel, Hirt, 1959, s. 521–605.
- Bommes M. Migration research in Germany: the emergence of a generalised research field in a reluctant immigration country. *National paradigms of migration research*, Thränhardt D. (Ed.), Osnabrück, 2010, p. 129.
- Dietz B. *Jugentliche Aussiedler – Portrait einer Zuwanderergeneration*. Frankfurt am Main, New York, Campus, 1998.
- Dohse K. *Ausländische Arbeiter und bürgerlicher Staat. Genese und Funktion von staatlicher Ausländerpolitik und Ausländerrecht: Vom Kaiserreich bis zur Bundesrepublik Deutschland*, Königstein im Taunus, Athenäum, 1981, 460 p.
- Elwert G. Probleme der Ausländerintegration: Gesellschaftliche Integration durch Binnenintegration? *Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie*, no. 34, 1982, s. 717–731.
- Esser H. Aufenthaltsdauer und die Eingliederung von Wanderern: Zur theoretischen Interpretation von soziologischen «Variablen». *Zeitschrift für Soziologie*, no. 10, 1981, s. 76–97.
- Esser H. Ethnische Kolonien: «Binnenintegration» oder gesellschaftliche Isolation? Segregation und Integration, J. Hoffmeyer-Zlotnik (Ed.), 1986, s. 106–117.
- Esser H., Gaugler E., Neumann K.-H. Arbeitsmigration und Integration. Sozialwissenschaftliche Grundlagen. *Materialien zur Arbeitsmigration und Ausländerbeschäftigung*, vol. 4, Königstein im Taunus, Peter Hanstein, 1979.
- Ete A. Politische Ideen und Policy-Wandel: die «Green Card» und ihre Bedeutung für die deutsche Einwanderungspolitik. *Die deutsche «Green Card»: Migration von Hochqualifizierten in theoretischer und empirischer Perspektive* (IMIS-Beiträge 22), Hunger U., Kolb H. (Ed.), Osnabrück, IMIS, 2003.
- Faist Th. *The Volume and Dynamics of International Migration and Transnational Social Spaces*, Oxford, Oxford University Press, 2000.
- Fehrenbach O. Krah i vozrozhdenie Germanii. Vzgljad na evropejskuju istoriju XX veka. [Crash and revival of Germany. View on the European history of the 20th century] Moscow, Agraf Publ., 2001, 304 p. (In Russian)
- Hoffmann-Nowotny H.-J. *Soziologie des Fremdarbeiterproblems. Eine theoretische und empirische Analyse am Beispiel der Schweiz*, Stuttgart, Enke, 1973, 377 p.
- Karachurina L.B. Immigracionnaja politika Germanii: uspeschnyj – neuspeshnyj opyt [Immigration policy of Germany: successful-unsuccessful experience] *Mirovaja ekonomika i mezhdunarodnye otnoshenija*, 2008, no. 7, p. 50–60. (In Russian)
- Karasek-Langer A. Volkstum in der Wandlung. Die Vertriebenen in Westdeutschland. *Ihre Eingliederung und Ihr Einfluss auf Gesellschaft, Wirtschaft, Politik und Geistesleben*, Lemberg E. and Edding F. (Ed.), Kiel, Hirt, 1959, s. 606–694.
- Kolb H. *Einwanderung zwischen wohlverstandener Eigeninteresse und symbolischer Politik. Das Beispiel der deutschen «Green Card»*, Münster, Lit, 2004, 231 p.
- Leggewie C. *Multi Kulti: Spielregeln für die Vielvölkerrepublik*. Berlin, Rotdudch, 1990, 166 p.
- Malakhov V.S. *Integracija migrantov: koncepcii i praktiki* [Integration of migrants: concepts and practices]. Moscow, Mysl Publ., 2015, 272 p. (In Russian)
- Migration und Integration. Aufenthaltsrecht, Migrations- und Integrationspolitik in Deutschland*. Bundesministerium des Innern. Frankfurt am Main, Drucks- und Verlagshaus Zarbock, 2014, 215 s.
- Piore M.J. *Birds of Passage. Migrant Labour and Industrial Societies*, Cambridge, Cambridge University Press, 1979, 400 p.
- Pries L. Transnationale soziale Räume. *Perspektiven der Weltgesellschaft*, U. Beck (Ed.), Frankfurt am Main, Suhrkamp, 1998, s. 55–86.
- Radtke F.-O. Multikulti: Das Gesellschaftsdesign der 90er Jahre? *Informationsdienst zur Ausländerarbeit*, no. 4, 1990.
- Rethinking Transnationalism: the Meso-Link of Organisations*, Pries L. (Ed.), London, New York, Routledge, 2008, 208 p.
- Rogge H. Vertreibung und Eingliederung im Spiegel des Rechts. Die Vertriebenen in Westdeutschland. *Ihre Eingliederung und Ihr Einfluss auf Gesellschaft, Wirtschaft, Politik und Geistesleben*, Lemberg E., Edding F. (Ed.), Kiel, Hirt, 1959, s. 174–245.
- Savoskul M.S. Uspeshnye migranty iz Rossii i Ukrainy vo Frankfurte-na-Majne (Germanija) [Successful migrants from Russia and Ukraine in Frankfurt am Main (Germany)] *Monitoring*

obshchestvennogo mnenija: jekonomicheskie i social'nye peremeny, 2015, no. 1, p. 118–131. (In Russian)

Schrader A., Nikles B., Hartmut G. *Die Zweite Generation: Sozialisation und Akkulturation ausländischer Kinder in der Bundesrepublik*, Kronberg, Athenäum, 1976, 233 p.

Tenbruck F.H. *Die kulturellen Grundlagen der Gesellschaft. Der Fall der Moderne*, Opladen, Westduetcher Verlag, 1989, 322 p.

Treibel A. *Engagement und Distanzierung in der westduetchen Ausländerforschung. Eine Untersuchung ihrer soziologischen Beiträge*, Stuttgart, Enke, 1988, s. 27.

Voylokov T.N. Adaptacija russkojazychnyh vysokokvalificirovannyh migrantov k trudovoj dejatel'nosti v Germanii [Adaptation of Russian-speaking highly qualified migrants to work in Germany]. *Sociologicheskie issledovanija*, 2013, no. 1, p. 51–62. (In Russian)

Wilpert Cz. International Migration and Ethnic Minorities. New Fields for Post-War Sociology in the Federal Republic of Germany. *Current Sociology*, no. 22, 1984, p. 305–352.

Zeveleva O.I. Migracionnaja politika i kollektivnaja identichnost': opyt rossijskikh nemcev v Germanii [Migration policy and collective identity: the experience of Russian Germans in Germany]. *POLIS. Politicheskije issledovanija*, 2014, no. 6, p. 114–126. (In Russian)

Zimmermann K.F. Ethnic German Migration since 1989: Results and Perspectives. *Forschungsinstitut zur Zukunft der Arbeit*, Discussion Paper Series, Bonn, IZA, 1999.

Web sources

Die Blaue Karte EU Deutschland. URL: <http://www.bluecard-eu.de/blaue-karte-eu-deutschland> (access date 30.04.2016).

Denisenko M.B. Emigracija iz Rossii v strany dal'nego zarubezh'ja [Emigration from Russia to foreign countries] // *Demoscope Weekly*, 2012, № 513–514. June 4–17 // <http://www.demoscope.ru/weekly/2012/0513/index.php> (access date 10.07.2020). (In Russian)

Potapova A. Jemigracija iz Rossii: tekushhee desjatiletie [Emigration from Russia: current decade] // *Demoscope Weekly*, 2017, no. 719–720, March 6–19 // <http://www.demoscope.ru/weekly/2017/0719/index.php> (access date 15.07.2020). (In Russian)

Database of the Federal Statistical Office of Germany. URL: <https://www-genesis.destatis.de> (access date 10.07.2020).

Migrationbericht der Bundesregierung, 2018. URL: www.bamf.de (access date 15.07.2020).

Savoskul M.S. Pochemu migrant migrantu ne vseгда drug, tovarishh i brat? [Why is a migrant not always a friend, comrade and brother to another migrant?] // *Demoscope Weekly*, 2016, no 681–682. April 4–17. <http://www.demoscope.ru/weekly/2016/0681/index.php> (access date 15.07.2020). (In Russian)

Statistisches Bundesamt. URL: www.destatis.de (access date 17.07.2020).

Received 20.07.2020

Revised 30.07.2020

Accepted 06.08.2020

УДК 551.4 (571.6)

А.А. Гаврилов¹

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СООТНОШЕНИЙ ОРОГРАФИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ГИДРОСЕТИ

В зависимости от контекста водораздельные узлы целесообразно рассматривать не только как точки на топографической или геоморфологической картах (узел-вершина), но и как специфические формы рельефа с конформным геологическим содержанием (узел-морфоструктура), в пределах которых расположены истоки водотоков и верхние участки их долин. Такой подход с акцентом на водораздельных узлах-морфоструктурах (ВУМ) как ключевых элементах строения, факторах развития различных орогенных систем и областей денудации в целом позволяет с новой позиции проводить геолого-геоморфологический анализ соотношений орографических особенностей и сети водотоков территорий, решать вопросы их формирования, эволюции и др. Выделено несколько основных типов их дисгармонии: 1 – пересечение реками орогенных сводов, горных хребтов с формированием каньонообразных, антецедентных долин с максимальными врезами; 2 – аномально высокая концентрация истоков рек в пределах отдельных ВУМ; 3 – удаленность некоторых крупных ВУМ от полей максимальных высот горных хребтов и поднятий территорий; 4 – речные перехваты, сопровождающиеся внедрением в междуречное пространство водотоков соседних речных систем и изменением плановых рисунков ВУМ и водосборных бассейнов. На примере разных объектов и регионов (Дальний Восток, Сибирь, Европа, Сев. Америка) показано, что в основе этих явлений лежат такие факторы, как гетерохронность и гетерогенность ВУМ территорий, различное время формирования ВУМ и гидросети, наличие длительно живущих центров эндогенной активности и гранитообразования, с которыми сопряжены ВУМ, и др.

Энергетическая обусловленность процессов воздымания земной коры позволяет оценивать ВУМ, связанные с очаговыми морфоструктурами, как универсальные и наиболее устойчивые к тектонической деструкции и денудации элементы строения орогенов и областей тектономагматической активизации.

Ключевые слова: ороген, водораздельный узел-морфоструктура, гидросеть, центр горообразования, горный хребет, очаговая система

Введение. В пределах многих горных областей и поясов можно наблюдать явление пересечения крупными реками хребтов и орогенных сводов, несоответствие максимальных высот рельефа и гипсометрических отметок региональных водораздельных узлов, их удаленность от главных (в настоящее время) водоразделов и другие аномальные особенности взаимоотношений орографических и гидрографических элементов. Все это указывает на определенную независимость развития исторически сложившихся водосборных бассейнов и водных артерий по отношению к поднятиям, возникающим на последующих этапах геологической эволюции той или иной территории. На локальном уровне дисконформные отношения водоразделов и гидросети могут быть обусловлены речными перехватами, отражающими дифференцированный характер тектонических движений и изменение положений уровней базисов эрозии во впадинах, прилегающих к поднятиям.

В более широком аспекте, видимо, следует судить о специфических особенностях соотношений между орографическими элементами и строением гидросети как некотором геоморфологическом феномене, охватывающим объекты разного ранга и возраста. В планетарном плане эта проблематика была затронута ранее в работе Д.А. Тимофеева

[Тимофеев, 2011]. В качестве основных причин несоответствий он рассматривал взаимодействие эндогенных и экзогенных факторов, тектоническую эволюцию территорий. При региональных геолого-геоморфологических исследованиях орогенных областей юга Дальнего Востока (ДВ) в 1970 г. были проанализированы данные о прорезании горных хребтов реками Зея, Амур, Амгунь и выдвинуты представления о длительном, унаследованном развитии ряда положительных элементов морфоструктурного плана и связанных с ними водосборных бассейнов и рек, формирующих антецедентные, каньонообразные долины [Худяков, 1977]. Многочисленные примеры пересечения горных хребтов реками в Евразии, Северной Америке описаны в целом ряде работ зарубежных исследователей [Oberlander, 1965; Fielding, 2000; Stokes M., Mather, 2003 и др.]. В качестве основных возможных причин этого явления указывают на более древний, по сравнению с поднятиями, возраст гидросети, резко возрастающую водность рек в связи с климатическими изменениями. Тем не менее, вопросы возникновения и формирования такого феномена остаются до настоящего времени дискуссионными.

Очевидно, что в каждом конкретном случае имеются свои частные особенности, но существу-

¹ ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева ДВО РАН, лаборатория гравиметрии, вед. науч. с., канд. геол.-минерал. н.; e-mail: gavrilov@poi.dvo.ru

ет необходимость наметить некоторый общий методический подход к изучению подобных ситуаций. По мнению автора, основой может служить положение о том, что маркерами тектонической активности и строения недр являются такие важные элементы гидрографических и орографических систем, как водораздельные узлы-морфоструктуры (ВУМ) [Гаврилов, 2017а, б].

Методология и методика исследований. Уже на начальных этапах возникновения поднятий дифференцированность тектонических движений, специфика связанных с ними дислокаций, а также различия литоморфных свойств геологических тел приводят к обособлению аномальных по геодинамическим, структурным и вещественным характеристикам участков литосферы, которые на данный исторический момент обладают максимальным энергетическим потенциалом и устойчивостью к эрозионно-денудационным процессам. Именно они образуют основу будущих водораздельных узлов, сеть которых определяет последующее заложение, параметры и пространственные соотношения водосборов и, соответственно, рисунок долин водотоков, систем поднятий и распределение шлейфов рыхлых отложений. Поэтому водораздельные узлы как орографические и энергетические центры представляют собой ключевые элементы строения и факторы развития горных районов и областей денудации в целом, определяя главные особенности их трансформации на всех этапах геоморфологической эволюции. Следует с целевой установкой, целесообразно использовать термин «водораздельный узел» не только как точку на топографической или геоморфологической картах, где сходятся (расходятся) две, три и более водораздельных линий (узел-вершина), но и как специфическую форму рельефа с конформным геологическим содержанием (водораздельный узел-морфоструктура – ВУМ), в пределах которой расположены истоки и верхние участки долин водотоков. В орогенных областях крупные ВУМ соотносятся с центрами горообразования. В последующем такие геодинамические центры сохраняют свое орографическое значение и в условиях платформенного режима. По мере «старения» рельефа, эрозионной сети и водосборных бассейнов они остаются каркасными и наиболее консервативными элементами морфологического ландшафта [Гаврилов, 2017а, б].

В ходе проведенных ранее исследований рядом специалистов было сформулировано понятие «морфоструктурный узел». Он определялся как участок сочленения продольных и секущих линейных границ крупных морфоструктурных элементов (линеаментов), место стыковки блоков разных порядков [Герасимов, Ранцман, 1973]. С такими узлами обычно связывали проявления экстремальных природных явлений [Ранцман, Гласко, 2004]. Представляется, что принципиальные различия предлагаемого автором понятия «ВУМ» и приведенного термина «морфоструктурный узел» очевидны. Объединяет их идея о существовании в сфере морфогенеза специфичес-

ких энергетических центров, которые вместе с каналами энергомассопереноса определяют общую ячеистую структуру геологической среды [Гаврилов, 2017б].

При выделении, идентификации и изучении ВУМ целесообразно использовать известные морфометрические и морфографические методики, входящие в морфоструктурный анализ [Хортон, 1948; Филоосов, 1975; Худяков, 1977; Соловьев, 1978; Симонов, 1999 и др.]. Специфика исследований заключается в акценте на анализе карт порядков водотоков и водоразделов, в построении продольных профилей долин рек, изучении плотности и рисунка водотоков, водораздельных линий, а также в выявлении комплекса дислокаций и геологических тел, конформных ВУМ. Для определения их геоморфологических границ привлекаются данные об участках перегиба продольных профилей речных долин, крупных гипсометрических уступах на водоразделах, о зонах аномальных градиентов на картах вершинных поверхностей. Из комплекса геологических материалов используются сведения о разрывных нарушениях, складчатых, инъективных и блоковых дислокациях, особенностях залегания геологических тел в вершинном поясе междуречий. Дополняют их данные о связях с ВУМ геофизических аномалий разного типа. При проведении специализированных работ, направленных на картографирование ВУМ, выявляются многие десятки, сотни объектов. Для типизации, паспортизации и систематики ВУМ по ряду формализуемых и неформализуемых признаков целесообразно применять комплекс геоморфологических, геологических и геофизических данных. Полученные результаты позволяют перейти к оценке возможных механизмов формирования морфологического ландшафта орогенов и других областей денудации, проводить верификацию существующих тектонических моделей развития территорий, решать другие задачи. Если, например, на территории юга ДВ до 80% ВУМ сложено магматическими образованиями и образовано инъективными дислокациями разных глубин заложения [Гаврилов, 2017б], то о каких коллизионных или коллизионно-аккреционных механизмах регионального горообразования [Ханчук, 1993] может идти речь?

Обычно наблюдаются следующие виды (или типы) дисгармонии орографии и гидрографической сети: 1 – пересечение реками орогенных сводов, горных хребтов с формированием каньонообразных, антецедентных долин с максимальными врезами; 2 – аномально высокая концентрация истоков рек в пределах отдельных ВУМ; 3 – удаленность некоторых крупных ВУМ от полей максимальных высот горных хребтов и поднятий территорий; 4 – речные перехваты, сопровождающиеся внедрением в междуречное пространство водотоков соседних речных систем и изменением плановых рисунков ВУМ и водосборных бассейнов.

Результаты и обсуждение. Некоторые аспекты аномальных соотношений поднятий и долин рек Сибири и ДВ. Рассмотрим их на примере Аму-

ро-Приморской горной страны и р. Амур, которая пересекает северные отроги Большехинганского орогена, образует antecedentные долины в районах г. Комсомольска и горного хребта Пуэр или Чаятын (Чаятынский пережим). Один из истоков р. Амур – р. Шилка – находится в пределах Монголо-Сибирского мегасвода [Гаврилов, 2017б], сопоставимого с древним «теменем Азии», намеченного Э. Зюссом еще в конце XIX века в виде неправильного треугольника. Установленные в пределах поднятия массивы раннепротерозойских, ранне-, позднепалеозойских и позднемезозойских гранитоидов [Геологическая карта ..., 2004], а также геологические признаки тектономагматической активизации на неотектоническом этапе развития свидетельствуют о том, что воздымание мегасвода началось в докембрии и протекало дискретно во времени и пространстве, но унаследовано на протяжении многих сотен миллионов лет.

Второй исток р. Амур – р. Аргунь, протекающая по системе межгорных впадин на юго-восточной границе Монголо-Сибирского мегасвода, начинается в одном из магматических поднятий (высоты 1400–1700 м) Большого Хингана. Судя по возрасту конформных гранитных интрузивов [Геологическая карта мира, 2000], они возникли в раннем палеозое, но в последующем испытали активизацию в позднем палеозое, в позднеюрско-раннемеловое время и на неотектоническом этапе развития. Приведенные данные позволяют предполагать, что формирование первичных, наиболее древних, элементов водосборной системы Палеоамура началось, по меньшей мере, в раннегерцинскую эпоху тектогенеза и магматизма. Важную роль на более поздних этапах ее эволюции сыграли процессы регионального горообразования в позднем мезозое – раннем кайнозое [Гаврилов, 2017б].

В юго-восточной Сибири р. Витим пересекает Становое, Патомское нагорья, хребты Делюн-Уранский, Кодар. Река Олекма разделяет Каларский и Становой хребты. Истоки этих рек, а также рек Холой, Уда, Чикой расположены в ядре Восточно-Забайкальского эллипсоидного свода с соответствующими радиусами (R) $R_1=200$ км, $R_2=250$ км. Долина Амгуни пересекает Баджалский и Пильдо-Лимурийский орогенные своды, имеющие позднемелового возраста. Максимальная глубина ее вреза относительно прилегающих горных хребтов достигает 1600–1700 м. При высотах рельефа в среднем течении реки до 2200 м гипсометрические отметки поднятий в ее истоках не превышают 1100–1200 м. Это свидетельствует о том, что первичный центр горообразования и сопряженный с ним ВУМ, расположенный западнее, возникли до начала формирования Баджалского магматогенного поднятия, которое возникло в позднем мелу [Вдовина, Лукашов, 2006]. О древности первичного орографического центра говорят и геологические данные. Река Аякит (исток Амгуни) начинается в ядерной части Буреинского срединного массива, где экспонированы блоки архейских пород кристаллического фун-

дамента и массивы допалеозойских и палеозойских гранитоидов [Гаврилов, 2017а]. Тем самым подтверждаются длительность существования морфоструктурного перекоса в направлении с запада на восток и относительно древний возраст водосборного бассейна р. Амгунь.

Следующий важный вид аномальных соотношений характеризуется высокой концентрацией истоков крупных рек в пределах отдельных ВУМ, что может быть обусловлено лишь длительным и унаследованным их развитием. В возникшем еще в раннем палеозое Западно-Байкальском сводово-блоковом поднятии, входящим в состав Алтай-Саянского орогенного мегасвода, расположены истоки рек Большой и Малый Енисей, Дэлгэр-Мурен, Ока, Иркут и др. [Гаврилов, 2017б]. В Приамурье выделяется крупный Верхнеселемджинский ВУМ позднемелового возраста, в пределах которого начинаются такие большие реки, как Буряя, Селемджа, Тугур и др. С ядром Анюйского орогенного позднемелового мегасвода в Сихотэ-Алине сопряжены истоки крупных рек Хор, Анюй, Самарга, Коппи. В пределах Баджало-Буреинского свода расположены верховья таких больших рек, как Амгунь, Буряя, Урми. К ядру Тумнинского сводового поднятия (Сихотэ-Алинь) приурочены начала рек Тумнин, Уктур, Яй, Уй и других.

Перестройки морфоструктурного плана, смены геодинамического режима и интенсивная деятельность агентов экзогенной сферы морфогенеза Земли определяют тот факт, что все выраженные в рельефе крупные положительные формы, играющие роль региональных ВУМ и концентрирующие истоки многих крупных рек, могут сохраняться только при периодической энергетической подпитке. Необходимое условие их устойчивого, длительного и унаследованного развития – продолжительная перманентная или дискретная, пульсационная деятельность центров эндогенной активности недр, соотносимых с областями длительного гранитообразования, имеющих, как правило, глубинную природу.

Речные перехваты формируются за счет процессов регрессивной эрозии и внедрения в междуречное пространство относительно низкопорядковых водотоков, более интенсивно развивающихся соседних речных систем. Проявляются они обычно при асимметрии склонов междуречий и обусловлены, прежде всего, различиями положений базисов эрозии, соотносимых с гипсометрическими уровнями примыкающих к поднятиям впадин, и соответственно разными уклонами продольных профилей водотоков. Меньшее значение имеют физико-механические свойства размываемых в ходе глубинной эрозии пород междуречий, излияния базальтов и другие локальные факторы. Типичным примером являются речные перехваты Сихотэ-Алиня (реки Зеркальная–Павловка, Уссури–Милоградовка и др.) [Короткий, 2010], predeterminedные существенно более крутыми уклонами продольных профилей речных долин склонов, которые обращены к Татарскому проливу. Если возникновение большинства аномальных

геоморфологических ситуаций, связанных с ВУМ, определяется воздыманием земной коры, то речные перехваты отражают влияние на развитие речной сети и водоразделов процессов ее пригибания и опускания при доминировании деструктивных тенденций тектогенеза.

Материалы и результаты исследований отдельных эталонных ВУМ. Как показывает изучение орогенных систем территории юга ДВ и прилегающих районов, для локальных и региональных горообразующих центров, как правило, типична аномально высокая плотность водораздельных узлов-вершин и истоков рек, размещение которых подчиняется радиально-концентрической пространственной организации. Такой рисунок водораздельных

линий и узлов характерен, например, для инфраструктуры Буголлинского позднемезозойского интрузивно-купольного поднятия, сложенного раннемеловыми гранитоидами и расположенного в осевой части Станового хребта (рис. 1). В его пределах берут начало такие крупные реки, как Гонам, Тимптон, Гилой и другие.

Размер ВУМ, соотносимого с интрузивным куполом, составляет, по данным В.В. Юшманова [Юшманов, 1985], 45×65 км. По мнению автора, он имеет не кардиоидную, а правильную кольцевую форму и диаметр около 70 км. Максимальные высоты рельефа в его пределах не превышают 2000 м и смещены на юг относительно его геометрического центра. Река Гилой пересекает хр. Тукурингра (мак-



Рис. 1. Сеть водораздельных узлов Буголлинской интрузивно-купольной морфоструктуры [Юшманов, 1985], с дополнениями и в интерпретации автора. 1–5 – структурно-морфографические элементы. 1–2 – линии водоразделов: 1 – каркасные в пределах интрузивного купола (а – основные, б – второстепенные), 2 – прилегающих территорий; 3 – центры горных систем концентрического строения и их нумерация; 4–5 – контуры Буголлинской морфоструктуры: 4 – по данным [Юшманов, 1985]; 5 – по версии автора

Fig. 1. Network of watershed nodes of the Bugollinsky intrusive dome morphostructure [Yushmanov, 1985], with additions and in the author's interpretation. 1–5 – structural-morphographic elements. 1–2 – watershed lines: 1 – skeleton lines within the intrusive dome (a – main, b – secondary), 2 – of adjacent territories; 3 – centers of concentric mountainous systems and their numbers; 4–5 – contours of the Bugollinsky morphostructure: 4 – according to [Yushmanov, 1985]; 5 – according to the author

симальные отметки высот хребта 1600 м, в месте пересечения – 1100 м), реки Тимптон и Голам прорезают Алданское нагорье с высотами до 2200–2400 м и далее впадают в р. Алдан – один из крупнейших притоков р. Лены. Особая роль Буголлинского ВУМ в контроле размещении истоков крупных водных артерий и в формировании соответствующих водосборных бассейнов можно объяснить лишь опережающим развитием одноименной очаговой морфоструктуры по меньшей мере с раннего мела на фоне более медленного воздымания Алданского нагорья в позднем мезозое–кайнозое. На предлагаемой схеме (см. рис. 1) отчетливо выделяются внутренний и внешний концентры водораздельных линий и серии относительно небольших купольных форм рельефа (локальные ВУМ), что позволяет отнести инфраструктуру рассматриваемого поднятия к полиядерно-сателлитному типу строения очаговых систем. По своей природе крупные ВУМ представляют собой фрактальные образования, так как состоят из множеств подобных по морфологии и строению ВУМ меньшего порядка. Это хорошо иллюстрирует приведенный рисунок, похожий на изображение известной снежинки Мандельброта [Мандельброт, 2002].

Яркий пример определяющего влияния очаговых глубинных процессов на формирование орогенных сооружений юга ДВ – строение Верхнеселемджинского позднемелового тектономагматического поднятия ($R_1=110$ км, $R_2=80$ км), в ядре которого расположена крупная брахисинклинальная складка. Кольцевое размещение массивов позднемеловых гранитоидов и ареалов комагматичных эффузивов, радиально-концентрическая геологическая и геоморфологическая зональность, ядерно-сателлитный тип инфраструктуры отражают решающую роль очаговой геодинамики в горообразовании [Гаврилов, 2014, 2017а]. Приуроченный к нему ВУМ отличается аномально высокой плотностью истоков таких крупных рек, как Селемджа, Буря, Нимелен, Асыни, Селиткан и максимальными для региона высотами рельефа (г. Город-Макит – 2295 м) (рис. 2).

С Хангайским орогенным сводом (высоты до 3900 м), выделяемым на территории Монголии, связано начало крупных рек Селенга, Орхон, Идер, Дзабхан, Тэрхийн-гол. Ядро этого горообразующего центра, соотносимого с региональным ВУМ, занимает один из крупнейших батолитов региона, в пределах которого установлены как палеозойские, так и мезозойские интрузивные породы кислого состава. Здесь выявлены три разновозрастные группы массивов гранитоидов с абсолютными датировками: 302–287, 269–240 и менее 230 млн лет [Ярмолюк и др., 2013]. Вокруг гранитного ядра сводового поднятия располагаются дуговые зоны рифтогенного магматизма, что создает общую радиально-концентрическую геологическую и геоморфологическую зональность этой региональной очаговой морфоструктуры. В соответствии с данными абсолютных датировок гранитоидов, общая продолжительность пульсационного, но унаследованного раз-

вития Хангайской магматической системы превышает 80 млн лет [Гаврилов, 2017б]. Приуроченность к древнему своду современного орографического центра указывает на унаследованное развитие этой очаговой морфоструктуры в кайнозое. Такие тенденции эндогенного морфогенеза определили длительное и устойчивое функционирование орографических и гидрографических систем региона на протяжении сотен миллионов лет, что обеспечило, в частности, пересечение Селенгой горных сооружений Хамар-Дабан – Улан-Бургасы, а р. Ангарой (в прошлом, вероятно, р. Селенга в нижнем течении) – Бургузинского и Приморского хребтов.

Анабарская кольцевая морфоструктура, контуры которой были намечены ранее В.В. Соловьевым [Соловьев, 1978], занимает северную часть Среднесибирского плоскогорья и представляет собой, по мнению автора, надплюмовый мегасвод. В его ядре расположен одноименный докембрийский кристаллический массив, имеющий изометричную форму (350×450 км), которому в рельефе соответствует одноименное плоскогорье с максимальными высотами до 900 м. Он сложен архейскими, ниже- и среднепротерозойскими метаморфическими комплексами, архейскими гранитоидами и традиционно рассматривается как выступ докембрийского фундамента Сибирской платформы. В обрамлении массива располагаются палеозойские образования плитного комплекса, прорванные раннетриасовыми интрузиями габбродолеритов [Геологическая карта ..., 2004]. Юго-западный сектор мегасвода занимает крупный ареал раннетриасовых базальтов трапповой формации (плато Путорана, максимальная высота 1700 м), для которой характерны огромные объёмы излияния эффузивов. Кольцевое расположение вокруг Анабарского массива тел габбродолеритов и масштабы раннемезозойского базитового магматизма указывают на существование глубинного и мощного магмо- и энергогенерирующего центра, соотносимого с плюмом. Сателлитные магматические, тектономагматические поднятия и связанные с ними региональные орографические центры (ВУМ) располагаются вокруг массива орбитально, что характерно для очаговых систем вне зависимости от их рангов (рис. 3) [Гаврилов, 2017б].

Анализ имеющихся геолого-геоморфологических данных позволяет предполагать, что на момент излияния трапповых базальтов Анабарский массив представлял собой региональный орографический центр с радиальным рисунком речных долин. Последующая перестройка гидро сети носила кардинальный характер. Вместо одного центра возникла серия новых ВУМ регионального ранга, которые расположились не хаотически, а упорядоченно. Концентрическая пространственная организация вокруг ядра надплюмового мегасвода региональных водораздельных узлов показывает, что при всех различиях полей высот его центральных и периферических частей, древняя область консолидации и гранитизации сохранила роль основного системообразующего орографического центра на

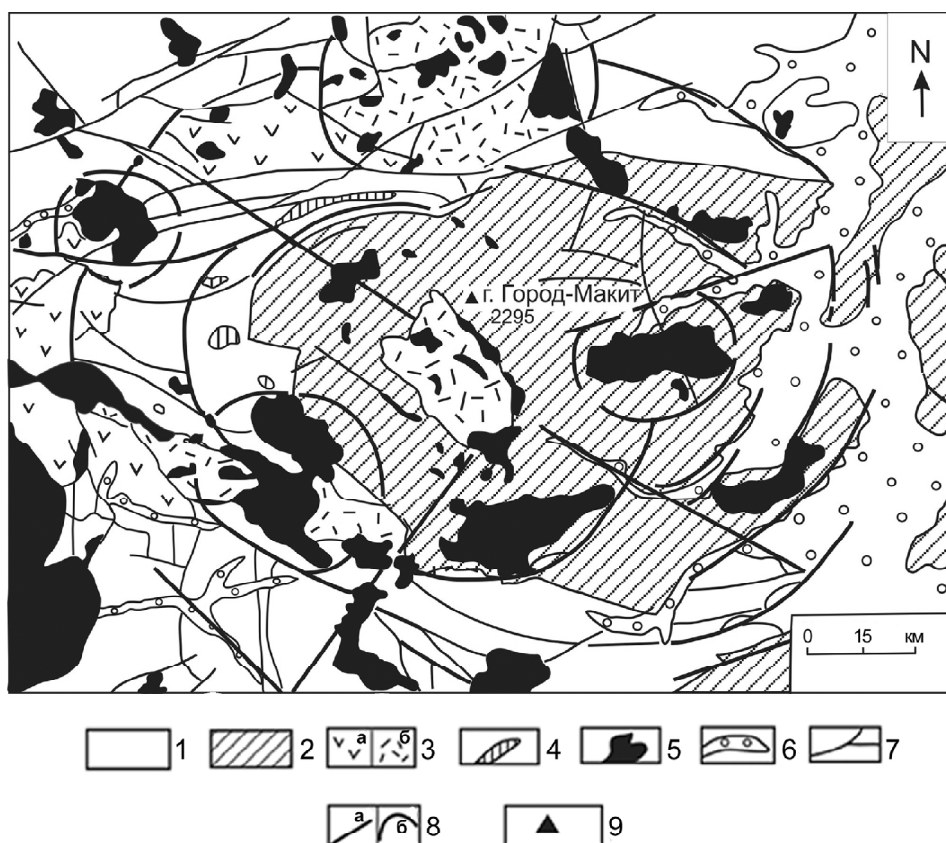


Рис. 2. Схема геологического строения Верхнеселемджинского тектономагматического поднятия по [Геологическая карта ..., 2004]. 1–2 – породы складчатого основания разного возраста: 1 – палеозойского и более древнего, 2 – юрского и раннемелового; 3 – эффузивы позднемелового возраста разного состава: а – андезитового, б – риолитового; 4–5 – интрузивные тела: 4 – базитового состава, 5 – гранитоидов; 6 – чехол рыхлых отложений речных долин и межгорных впадин; 7–8 – разломы, установленные по различным данным: 7 – геолого-геофизическим, 8 – геолого-геоморфологическим: а – дуговые и кольцевые, б – радиальные; 9 – вершина г. Город-Макит

Fig. 2. Scheme of the geological structure of the Upper Selemdzha tectonomagmatic rise according to [Geological map ..., 2004]. 1–2 – rocks of the folded basement of different ages: 1 – Paleozoic and more ancient, 2 – Jurassic and Early Cretaceous; 3 – Late Cretaceous volcanic rocks of various composition: а – andesite, б – rhyolite; 4–5 – intrusive bodies: 4 – of basic composition, 5 – granitoids; 6 – loose deposits of river valleys and intermountain depressions; 7–8 – faults determined according to various data: 7 – geological-geophysical, 8 – geological-geomorphologic: а – arc and ring, б – radial; 9 – top of the Gorod- Makit Mount

севере Среднесибирского плоскогорья. При этом ее влияние и черты унаследованного развития проявляются не прямо, а опосредованно, через систему пространственно и парагенетически связанных с ней относительно молодых ВУМ.

Аномальные геоморфологические ситуации в других регионах. Наряду с Сибирью и ДВ явления пересечения крупными реками горных хребтов, орогенных сводов и иные специфические соотношения орографических элементов и гидросети широко представлены в самых различных областях и районах нашей планеты. Река Олт пересекает горные сооружения Южных Карпат, р. Кура – систему поднятий Малого Кавказа (Месхетский, Тriaлетский хребты). В Болгарии р. Искыр прорезает горный хребет Стара-Планина [Geomorphology, 1984]. Целый ряд рек рассекает Понтийский хребет, занимающий северную часть Малой Азии. Одна из них, Ешилъырмак, начинается в крупном ВУМ (истоки рек Чорох, Карасу, Аракс и др.), который располо-

жен южнее главного водораздела в пределах отрогов Понтийских гор и представляет собой относительно изометричное поднятие радиусом 75–80 км со средними высотами 2000–2500 м [Географический атлас, 1982]. Положительные морфоструктуры региона, которые отличаются максимальными высотными отметками (г. Бол. Арарат – 5165 м, г. Эрджияс – 3916 м), соотносимы с позднекайнозойскими стратовулканами [Геологическая карта, 2000]. Несмотря на свои господствующие высоты, они образуют ВУМ низкого порядка, относительно слабо влияющие на общий рисунок гидросети, исторически сложившейся на более ранних этапах геологического и геоморфологического развития территории. Один из крупных ВУМ Европы (истоки рек Зале, Наб, Огрже и др.) расположен на пересечении поднятий Рудных гор, Тюрингенский Лес и Чешский Лес, в сотнях километрах к северо-востоку от Альпийской орогенной системы. Долина р. Лабы разделяет хребты Рудных гор и Судет. К северу от

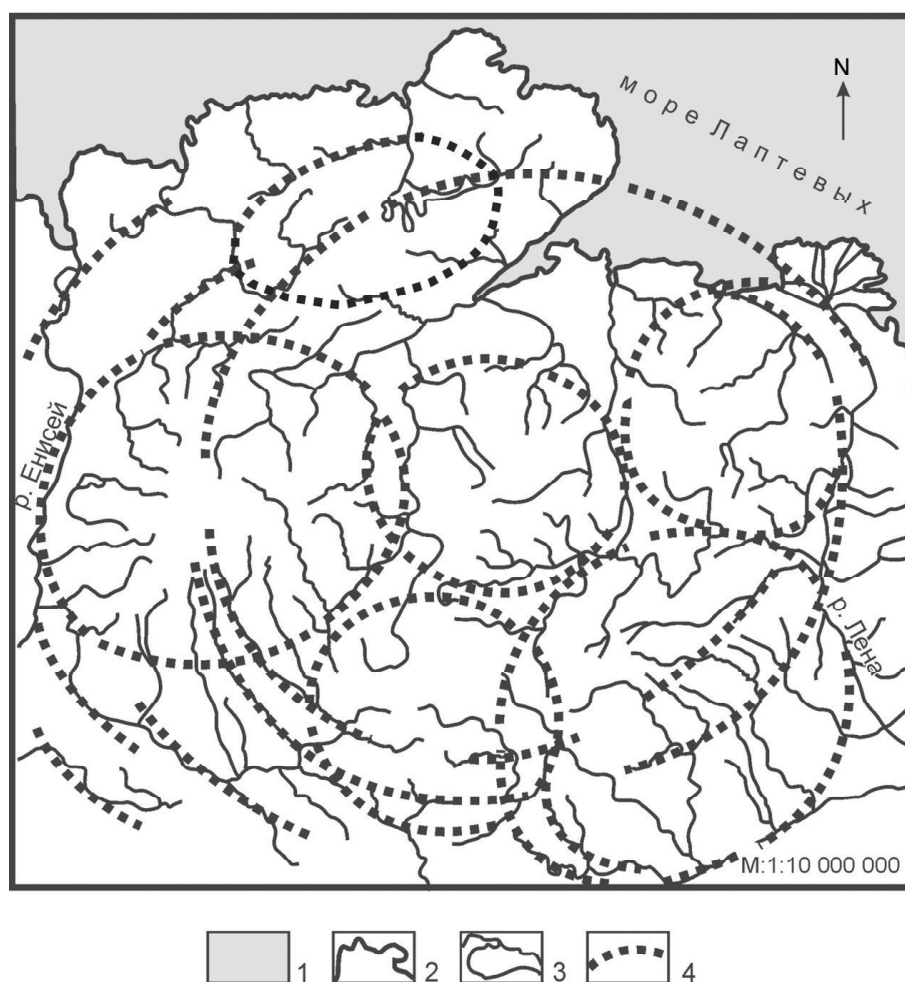


Рис. 3. Схема речной сети и ВУМ Анабарского надплюмового мегасвода. 1 – акватории; 2 – береговая линия; 3 – речная сеть; 4 – контуры очаговых морфоструктур, соотносимых с магматическими, тектономагматическими поднятиями и региональными ВУМ, в центральных частях которых расположены истоки основных водных артерий территории

Fig. 3. Scheme of the river network and watershed node-morphostructure of the Anabar overplum mega-arch. 1 – water areas; 2 – coastline; 3 – river network; 4 – contours of focal morphostructures correlated with magmatic and tectonomagmatic rises and regional WNM with the sources of main water courses of the territory in their central parts

главного Альпийского водораздела на расстоянии около 60 км выделяется водораздельный узел с истоками таких крупных рек, как Рейн, Рона и др. Еще севернее (200 км) расположены истоки Дуная и одного из правых притоков Рейна. Средние высоты рельефа этих ВУМ укладываются в диапазон 750–1000 м, в то время как максимальные высоты в Альпах достигают значений 4600–4800 м. Все это – признаки гетерохронности и гетерогенности центров горообразования и связанных с ними орографических и гидрографических систем Европы, многие из которых были сформированы и развивались до начала Альпийского этапа орогенеза.

В расположенных на западе Ирана горах Загрос (протяженность – 1600 км, а ширина – 250 км) диапазон максимальных высот составляет 3350–4575 м. Более трехсот каньонов с глубинами до 2000–2440 м разделяют их на отдельные поднятия [Oberlander, 1965]. Самые глубокие в мире сквозные долины находятся в Гималаях. По данным Е.Д. Филдинга [Fielding, 2000], одиннадцать крупных

рек берут свое начало в южной части Тибетского нагорья и проходят через горы по глубоко врезаным в хребты каньонам. Например, разница высотных отметок дна долины р. Арун и горного хребта возле г. Эверест составляет более 6 км.

Крупнейшие реки Индии и Юго-Восточной Азии (Ганг, Инд, Брахмапутра) начинаются в пределах относительно небольшого (радиус 200 км) ВУМ, занимающего восточный сегмент хребта Заскар (южная окраина Тибетского нагорья или Тибетские Гималаи) с высотами 7700–7800 м. При этом реки Лангчен, Карнали, Арун, а также Брахмапутра и Инд прорезают Высокие Гималаи, что указывает на более молодой (позднекайнозойский) возраст этой системы орогенных поднятий по отношению к центральным частям Тибет-Гималайского надплюмового мегасвода. Размещение горообразующих центров, соотносимых с ВУМ и контролирующими положение истоков рек Янцзы, Хуанхэ, Меконг, Салуин на северо-востоке и востоке Тибетского нагорья, невозможно объяснить с позиций коллизионной

или коллизионно-аккреционной модели орогенеза [Гаврилов, 2017б].

На северо-востоке Азии р. Омолон пересекает Юкагирское плоскогорье, горные хребты Уш-Урук-чэн и Олойский. Река Индигирка прорезает горные хребты Черского и Момский, Полоусный кряж, вместе с р. Колымой они почти полностью рассекают Яно-Колымский орогенный мегасвод. Истоки большинства крупных рек региона (Индигирка, Колыма, Охота, Куйдусун, Кулу, Тыры, Юдома) концентрируются в пределах относительно небольшого по размерам Верхне-Индигирского орогенного свода, включающего не только складчатые мезозойды, но и ареалы кислых вулканитов и конформных гранитоидов позднемелового возраста [Геологическая карта ..., 2004]. Присутствие в пределах этого поднятия структур и метаморфических комплексов Охотского срединного массива (по аналогии с Буреинским массивом) позволяет связать предысторию развития этого ВУМ с длительно живущим центром консолидации, гранито- и горообразования. Существующие соотношения орографии и гидросети рассматриваемой территории показывают, что именно он обусловил основные особенности формирования и развития региональной речной системы на позднемезозойском и кайнозойском этапах геологической эволюции региона. Примером важного орографического значения очаговых морфоструктур может служить и рисунок гидросети в Корякии, где более десяти рек берут начало в региональном ВУМ, который сопряжен с тектономагматическим поднятием г. Ледяной [Гаврилов, 2017а]. На топографической карте М 1:1 000 000 Чукотского полуострова аномально высокой плотностью истоков крупных водных артерий отличаются два ВУМ. Они соотносимы с тектономагматическими поднятиями, структурную основу которых образуют массивы гранитоидов позднемелового возраста [Геологическая карта ..., 2004]. В одном из них берут начало 7 рек (Амгуэма, Такюрев, Пегтымель и др.), в другом – 12 (Энмываам, Мал. Анюй, Угайкин и др.).

Ряд горных сооружений Тихоокеанского подвижного пояса на западе Северной Америки прорезают реки Юкон и Бигхорн. Береговые хребты и Каскадные горы рассекают долины рек Снейк, Колумбия, Фрейзер. Река Снейк, в частности, проходя через горы Валлова в северо-восточной части штата Орегон и через горы Севен Девилс в штате Айдахо, образует самый глубокий (2440 м) в Северной Америке каньон Хеллс [Vallier, 1998]. Сквозная долина р. Шошоун, пересекающая горы Раттлснейк западнее от города Коди (шт. Вайоминг), имеет глубину 760 м [Stokes, Mather, 2003]. Все это служит признаками достаточно древнего зарождения водосборных систем и долин этих водных артерий, истоки которых лежат в центральной части континента. Выделяемые орографические центры приурочены, в частности, к поднятиям, включающим Передовой хребет, горы Сангре-де-Кристо и др. Крупный ВУМ (истоки рек Мадисон, Снейк, Грин-Ривер, Шошоун и др.) приурочен, в частности, к Йеллоустоунскому

тектономагматическому поднятию (радиус 200–220 км). Об относительной молодости горных сооружений на западе Северной Америки говорят и известные геологические данные об особенностях проявления окраинно-материкового вулканизма в позднем кайнозое (миоцен–плейстоцен) [Геологическая карта ..., 2000]. Сквозные долины можно встретить также на востоке США, в горах Аппалачи. Одна из наиболее известных серий сквозных долин – река Саскуэханна, прорезающая горную систему на севере города Харрисбург [Oberlander, 1985].

В заключение следует отметить, что аномальные орографические центры наблюдаются и на слабо активированных платформах. Одним из примеров может служить Валдайский ВУМ на Восточно-Европейской платформе, в пределах которого сконцентрированы истоки таких крупных рек, как Волга, Днепр, Зап. Двина, Ловать, Мста.

Выводы:

– в зависимости от целевой установки водораздельные узлы могут определяться не только как точки на топографических или геоморфологических картах (узел-вершина), но и как специфические формы рельефа с конформным геологическим содержанием (узел-морфоструктура), формирование и развитие которых связано с центрами устойчивого роста положительных деформаций земной коры. Именно такие ВУМ контролируют положение истоков рек, задают границы водосборных бассейнов и определяют вместе с прилегающими впадинами градиенты и основные направления поверхностного стока;

– геоморфологические, геологические и геофизические характеристики ВУМ (статические, динамические и ретроспективные системы) несут главную информацию о механизмах, факторах формирования горных сооружений, а также о геодинамике, эволюции орогенных областей и областей денудации в целом. При переходе к платформенному режиму они сохраняют роль наиболее консервативных орографических элементов морфологического ландшафта. Паспортизация ВУМ, статистическая выборка характеризующих их данных – ключ к решению задач происхождения поднятий, основа верификации тектонических моделей регионального орогенеза, базирующихся, как правило, преимущественно на геологической и геофизической информации;

– в качестве основных типов аномальных соотношений орографической и речной сети рассматриваются следующие геоморфологические ситуации: пересечения орогенных сводов, горных хребтов реками, формирующими антецедентные долины; аномально высокие концентрации истоков рек в пределах отдельных ВУМ; удаленность их от полей максимальных высот поднятий территории; речные перехваты, меняющие плановые рисунки водосборных бассейнов и сопряженных систем ВУМ;

– на примере разных объектов и регионов показано, что в основе этих явлений лежат: сосуществование в пределах территорий ВУМ разного ранга,

происхождения и возраста; полицикличность процессов орогенеза и тектонических движений разной направленности в целом; аномальная устойчивость к процессам денудации и, соответственно, консервативность длительно живущих центров горообразования и эндогенной активности, сопряженных с очаговыми системами; различия времени формирования ВУМ и речной сети; дифференцированный характер тектонических движений и различия базисов эрозии, соотносимых с гипсометрическими уровнями примыкающих к поднятиям впадин;

– ранее в качестве главных индикаторов особенностей развития горных сооружений в геомор-

фологии и неотектонике широко использовались уплощенные и плоские реперные поверхности на водоразделах и ступенчатых склонах, которые не всегда обоснованно оценивались как реликты регионального пенеплена [Худяков, 1977]. Применение в качестве ключевых объектов геолого-геоморфологических исследований горных территорий и других областей денудации не виртуальных зачастую, реликтов региональных поверхностей выравнивания, а реальных образований – ВУМ разного ранга, генезиса и возраста – принципиально снижает риск получения неадекватных результатов исследований.

Благодарности. Автор благодарит рецензентов за ряд полезных замечаний, которые позволили сделать изложение материалов статьи более аргументированным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вдовина И.А., Лукашов А.А. Морфоструктурная оценка эродированности рудопроявлений Баджальского оловорудного района // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2006. № 3. С. 21–27.

Гаврилов А.А. Водораздельные узлы – ключевые элементы строения и факторы развития горных областей // Вестник КРАУНЦ. 2017а. № 1. Вып. 33. С. 67–82.

Гаврилов А.А. Морфотектоника окраинно-континентальных орогенных областей (юг Дальнего Востока и прилегающие территории). Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2017б. 312 с.

Гаврилов А.А. Происхождение горных сооружений юга Дальнего Востока России. Ст. 2. Горные хребты // Геоморфология. 2014. № 4. С. 17–30.

Географический атлас для учителей средней школы / Отв. ред. Л.Н. Колосова. Четвертое изд. М.: ГУГК, 1982. 238 с.

Геологическая карта Мира. М 1:15 000 000 / Под ред. Яцкевич Б.А. ВСЕГЕИ. 2000.

Геологическая карта России и прилегающих акваторий. М 1:2 500 000. ВСЕГЕИ, 2004.

Герасимов И.П., Ранцман Е.Я. Мофоструктура горных стран и их сейсмичность // Геоморфология. 1973. № 1. С. 3–13.

Короткий А.М. Перестройка речной сети Приморья: причины, механизмы и влияние на геоморфологические процессы // Геоморфология. 2010. № 2. С. 78–91.

Мандельброт Б. Фрактальная геометрия в природе. М.: Ин-тут компьютерных исследований, 2002. 656 с.

Ранцман Е.Я., Гласко М.П. Морфоструктурные узлы – места экстремальных природных явлений. М.: Медиа-Пресс, 2004. 223 с.

Симонов Ю.Г. Объяснительная морфометрия рельефа. М.: ГЕОС, 1999. 263 с.

Соловьев В.В. Структуры центрального типа территории СССР по данным геолого-морфологического анализа. Карта морфоструктур центрального типа территории СССР. М 1:10 000 000. Л.: ВСЕГЕИ, 1978. 110 с.

Тимофеев Д.А. Главные водоразделы и развитие гидрографии материков // Размышления о фундаментальных проблемах геоморфологии. Избранные труды. М.: Медиа-ПРЕСС, 2011. С. 45–54.

Философов В.П. Основы морфометрического метода поисков тектонических структур. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1975. 232 с.

Ханчук А.И. Геологическое строение и развитие континентального обрамления северо-запада Тихого океана: автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. М., 1993. 31 с.

Хортон Р.Е. Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. М.: Гос. изд-во иностр. лит., 1948. 158 с.

Худяков Г.И. Геоморфотектоника юга Дальнего Востока. М.: Наука, 1977. 256 с.

Юшманов В.В. Тектономагматические концентрические комплексы. М.: Наука, 1985. 232 с.

Ярмолюк В.В., Козловский А.М., Сальникова Е.Б., Козаков И.К., Котов А.Б., Лебедев В.И., Ээнжин Г. Возраст Ханкайского батолита и проблемы полихронности батолитообразования в Центральной Азии // Доклады академии наук. 2013. Т. 452. № 6. С. 646–652.

Fielding E.D. Morphotectonic evolution of the Himalayas and Tibetan Plateau. *Geomorphology and Global Tectonics*, Summerfield M.A (Ed.), John Wiley & Sons, New-York, 2000, p 205. DOI: 10.1016/S001675680244610.

Geomorphology of Europe. Embleton C. (Ed.), London: Macmillan, 1984. 465 p. DOI: 10.1007/978-1-349-17346-4.

Oberlander T.M. The Zagros Streams: A New Interpretation of Transverse Drainage in an Orogenic Zone. *Syracuse geographical series, no. 1*. New York, Distributed by Syracuse University Press, 1965, 168 p.

Oberlander T.M. Origin of drainage transverse to structures in orogens. *Tectonic Geomorphology*. Morisava M., Hack J.T. (Eds.). Boston, Allen and Unwin, 1985, p. 156.

Stokes M., Mather A.E. Tectonic origin and evolution of a transverse drainage: the Rho Almanzora, Betic Cordillera, Southeast Spain. *Geomorphology*, 2003, vol. 50, iss. 1–3, p. 59–81. DOI: 10.1016/S0169-555X(02)00208-8.

Vallier T. A Geological Story of Hells Canyon. *Geomorphic Systems of North America*. Lewiston I.D., Graf W.L. (Eds.). Geological Society of America Centennial, Special Volum 2, Pittsburg, Islands & Rapids, 1998, p. 7–17.

Поступила в редакцию 26.02.2020

После доработки 23.05.2020

Принята к публикации 06.08.2020

A.A. Gavrilov¹

SOME FEATURES OF CORRELATION BETWEEN OROGRAPHIC ELEMENTS AND DRAINAGE NETWORK

Depending on the context it is expedient to consider watershed nodes as both points on topographic or geomorphologic maps (node top) and specific forms of relief with conformal geological content (watershed node-morphostructure – WNM) hosting the sources of watercourses and top parts of their valleys. Such approach which accents WMN as key elements of the structure, factors of development of various orogenic systems and areas of denudation in general allows a new approach to the geological-geomorphologic analysis of correlation between orographic features and network of watercourses for the territories and the issues of their formation, evolution, etc. Several main types of disharmonies have been identified: 1 – the intersection of orogenic arches and mountain ranges by rivers resulting in formation of canyon-like antecedent valleys with maximum incision; 2 – abnormally high concentration of river sources within particular WMN; 3 – remoteness of some large WNM from the areas of maximum heights of mountain ranges and rises of the territories; 4 – river captures, accompanied by the introduction of watercourses of neighboring river systems into the interfluvies and the changes in plan patterns of WMN and water catchments. Using the examples of different objects and regions (Far East, Siberia, Europe, North America) it is shown that the bases of these phenomena are heterochrony and heterogeneity of the WNM of the territories, different time of WNM and drainage network formation, the presence of long-living centers of endogenous activity and granite formation, with which WNM are associated, etc.

Energy dependence of the Earth's crust uplifting makes it possible to consider WNM associated with focal morphostructures as universal elements of the structure of orogens and regions of tectonomagmatic activity being most resistant to tectonic destruction and denudation.

Key words: orogen, watershed node-morphostructure, hydraulic network, center of mountain formation process, ridge, focal system

Acknowledgements. The author thanks the reviewers for a number of useful comments, which made it possible to make the presentation of the article materials more.

REFERENCES

- Fielding E.D. Morphotectonic evolution of the Himalayas and Tibetan Plateau. *Geomorphology and Global Tectonics*. Summerfield M.A (ed.). John Wiley & Sons, N.-Y., 2000, 205 p. DOI: 10.1017/S001675680244610.
- Filosofov V.P. Osnovy morfometricheskogo metoda poiskov tektonicheskikh struktur [Bases of the morphometric method of tectonic structures prospecting]. Saratov, Saratov St. Univ. Publ., 1975, 232 p. (In Russian)
- Gavrilov A.A. Morfotektonika okrainno-kontinentalnykh orogennykh oblastey (Jug Dalnego Vostoka Rossii i privileyushchie territorii) [Morphotectonics of the continental margin orogenic areas (the south of the Russian Far East and adjacent territories)]. Vladivostok, Pacific Oceanological Institute FEB RAS Publ., 2017, 312 p. (In Russian)
- Gavrilov A.A. Proiskhozhdenie gornyykh sooruzheniy yuga Dalnego Vostoka [The origin of the south part of Russian Far East mountains (Paper 2. Mountain ridges)]. *Geomorfologiya*, 2014, no. 4, p. 17–30. (In Russian)
- Gavrilov A.A. Vodorazdelnye usly – klyuchevye strukturnye elementy i factory razvitiya orogennykh oblastey [Watershead knots as key structure elements and factors of mountain area development]. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*, 2017, no. 1, issue 33, p. 67–82. (In Russian)
- Geografichesky atlas dlya uchiteley srednei shkoly [The geographical atlas for high school teachers]. Edit by L.N. Kolosova. Fourth Edition. Moscow, GUGK Publ., 1982, 238 p. (In Russian).
- Geologicheskaya karta mira [Geological map of the World]. Scale 1:15 000 000. Ed. Yatskevich B.A. VSEGEI Publ., 2000. (In Russian)
- Geologicheskaya karta Rossii i privileyushchikh akvatoriy [Geological map of Russia and adjacent water areas]. Scale 1:2 500 000. VSEGEI Publ., 2004. (In Russian)
- Geomorphology of Europe*. Embleton C. (ed). London, Macmillan, 1984, 465 p. DOI: 10.1007/978-1-349-17346-4.
- Gerasimov I.P., Ranzman E.Ya. Morfostruktura gornyykh stran i ikh seysmichnost [Morphostructure of mountain areas and their seismicity]. *Geomorfologiya*, 1973, no. 1, p. 3–13. (In Russian)
- Hanchuk A.I. Geologicheskoe stroenie i razvitiye kontinentalnogo obramleniya Severo-Zapada Tikhogo okeana [Geological structure and evolution of the continental frame of the North West Pacific]. Extended Abstract of D.Sc. Thesis in Geology. Moscow, 1993, 31 p. (In Russian)
- Horton R.E. Erosional development of streams and their drainage basins. Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1945, vol. 56, no. 3, p. 275–370
- Khudyakov G.I. *Geomorfotektonika yuga Dal'nego vostoka* [Geomorphotectonics of the southern part of the Far East]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 256 p. (In Russian)
- Korotkiy A.M. Perestroyka rechnoy seti Primorya: prichiny, mekhanizmy i vliyanie na geomorfologicheskie protsessy [Reconfiguration of the river system in the Primorye: causes, mechanisms, influence on geomorphologic processes]. *Geomorfologiya*, 2010, no. 2, p. 78–91. (In Russian)
- Mandel'brot B. *Fraktal'naya geometriya v prirode* [Fractal geometry in nature]. Moscow, Institute of computer research Publ., 2002, 656 p. (In Russian)
- Oberlander T.M. Origin of drainage transverse to structures in orogens. *Tectonic Geomorphology*. Morisava M., Hack J.T. (eds). Boston, Allen and Unwin, 1985, 156 p.
- Oberlander T.M. *The Zagros Streams: A New Interpretation of Transverse Drainage in an Orogenic Zone*. Syracuse geographical series, no. 1. New York, Distributed by Syracuse University Press, 1965, 168 p.

¹ V.I. Ilchev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Laboratory of Gravimetry, Leading Scientific Researcher, PhD. in Geology; e-mail: gavrilov@poi.dvo.ru

Ranzman E.Ya., Glasko M.P. *Morfostrukturnye uzly – mesta ekstremalnykh yavleniy* [Morphostructural nodes as the sites of extreme events]. Moscow, Media-Press Publ., 2004, 223 p. (In Russian)

Simonov Yu.G. *Obyasnitelnaya morfometriya reliefa* [Explanatory morphometry of relief]. Moscow, GEOS Publ., 1999, 263 p. (In Russian)

Solov'ev V.V. *Struktury centralnogo tipa territorii SSSR. Po dannym geologo-morfologicheskogo analiza* [Central type structures of the USSR territory by data of geological and morphological analysis]. Obyasnitelnaya zapiska k karte morfostruktur zentral'nogo tipa territorii SSSR masshtaba 1:10 000 000. Leningrad, VSEGEI Publ., 1978, 110 p. (In Russian)

Stokes M., Mather A.E. Tectonic origin and evolution of a transverse drainage: the Rio Almanzora, Betic Cordillera, Southeast Spain, *Geomorphology*, 2003, vol. 50, iss. 1–3, p. 59–81. DOI: 10.1016/S0169-555X(02)00208-8.

Timofeev D.A. [Main watersheds and evolution of continents drainage network]. *Mysly o fundamentalnykh problemakh geomorfologii* [Thoughts about fundamental problems of

geomorphology]. *Izbrannye trudy* [Selected works]. Moscow, Media PRESS Publ., 2011, p. 45–54. (In Russian)

Vallier T.L. *Islands and Rapids: A Geologic Story of Hells Canyon Confluence* Press, Lewis-Clark State College, Lewiston, ID, 1998, 162 p.

Vdovina I.A., Lukashov A.A. Morfostrukturnaya otsenka erodirovannosti rudoproyavleniy Badzhalskogo olovorudnogo rayona [Morphostructural assessment of the degree of erosion of ore bodies of the Badzhal stanniferous field], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2006, no. 3, p. 21–27. (In Russian)

Yarmolyuk V.V., Kozlowsky A.M., Salnikova E.B., Kozakov I.K., Kotov A.B., Lebedev V.I., Eenjin G. Vozrast Khangajskogo batolita i problemy polikhronnosti batolitoobrazovaniya v Tsentral'noi Azii [The age of the Khangai batholith and challenges of multistage forming batholiths in Central Asia], *Doklady Akademii nauk*, 2013, vol. 452, no. 6, p. 646–652. (In Russian)

Yushmanov V.V. *Tektonomagmaticheskiye kontsentricheskiye komplekсы* [Tectonic-magmatic concentric complexes]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 232 p. (In Russian)

Received 26.02.2020

Revised 23.05.2020

Accepted 06.08.2020

УДК 551.465.41

А.В. Даньшина¹, В.В. Иванов², В.Ю. Чанцев³

ИЗМЕНЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ВЕРХНЕГО СЛОЯ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ НА ФОНЕ СОКРАЩЕНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

Рассчитаны основные критерии вертикальной устойчивости вод верхнего 100-метрового слоя моря Лаптевых по реконструированной пространственно-временной изменчивости трехмерной структуры температуры и солёности, полученной на основании численных экспериментов на адаптированной для условий Северного Ледовитого океана региональной конфигурации математической модели NEMO. Результаты моделирования представлены на вертикальном разрезе, пересекающем как мелководную, так и глубоководную части моря. Проведенное исследование выявило структурные изменения в распределении вертикальной устойчивости вод в море Лаптевых в отдельные периоды потепления и сокращения ледяного покрова в начале XXI века. В эти периоды чаще стали возникать условия, благоприятствующие развитию полной вертикальной устойчивости вод. В рассматриваемые «теплые» годы диапазон изменения величины частоты Брента-Вейселя уменьшился по сравнению с «холодным» 2004 годом. Мощность слоя максимальных значений частоты Брента-Вейселя становится больше в периоды таяния льда. В то же время отрицательная термохалинная устойчивость более интенсивно проявилась в весенний период в мелководных районах моря, охватывая более мощный поверхностный слой. В зимний период «теплых» лет площадь разреза с положительным критерием термохалинной устойчивости сократилась как в глубоководной, так и в мелководной части разреза. Толщина слоя с отрицательными значениями плотностного соотношения достигла максимальных значений летом в «теплые» годы.

Ключевые слова: Северный Ледовитый океан, поверхностный слой, устойчивость, стратификация, частота Брента-Вейселя

Введение. Климатические особенности Северного Ледовитого океана (СЛО) в значительной степени обусловлены его географическим расположением в приполюсном районе Северного полушария в окружении материков. Отличительной чертой СЛО, определяющей его особое место в климатической системе Земли, является наличие постоянного ледяного покрова, контролирующего характер вертикального распределения гидрологических характеристик. Резкое сокращение площади ледяного покрова в летний сезон в 1990–2000-е гг. с рекордной за всю историю спутниковых наблюдений минимальной площадью льда в сентябре 2012 г. (3,37 млн км²) позволяет предполагать соответствующий «отклик» в гидрологической структуре вод вследствие значимых изменений баланса тепла на границе океана и атмосферы. Эти изменения в первую очередь можно ожидать в окраинных морях, где амплитуда внутригодовых колебаний ледовитости максимальна. Именно в этих географических районах предполагается возрастание экономической активности, связанной с разработкой шельфовых месторождений полезных ископаемых и активизацией мореплавания. Значимость эффекта от происходящих в различных районах Арктики многофакторных изменений [Overland et al., 2008; Alekseev et al., 2009; Kattsov et al., 2010; Callaghan et al., 2011; Алексеев

и др., 2015] может быть оценена через изменения вертикальной структуры окраинных морей СЛО как компактных географических объектов, наиболее быстро реагирующих на внешние воздействия [Волков, Лукин, 1985; Вертикальная ..., 1987; Rudels et al., 1991; Poloukhin et al., 2003; Тимохов, Чернявская, 2009; Океанография ..., 2011; Davis et al., 2016; Polyakov et al., 2018]. Поскольку большую часть года многие из арктических морей покрыты ледяным покровом, затрудняющим проведение натурных измерений, а имеющаяся спутниковая информация и данные с дрейфующих станций и буев не восполняют в полной мере данные по гидрологическому режиму СЛО, то наиболее изученным остается распределение гидрофизических параметров водной толщи в летний период. Для пополнения знаний о структуре вод и о физических процессах прибегают к численному моделированию на разработанных моделях океана.

В данной работе по реконструированным полям температуры и солёности выделены структурные изменения в распределении вертикальной устойчивости (как интегрального показателя изменений вертикальной структуры, количественно выраженного через плотностную стратификацию) вод в море Лаптевых в современный период потепления и сокращения ледяного покрова. Выбор для задач ис-

¹ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, отдел океанологии, науч. с., канд. физ.-матем. н.; e-mail: danshina@aari.ru

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, вед. науч. с., докт. физ.-матем. наук; e-mail: vladimir.ivanov@aari.ru

³ Российский государственный гидрометеорологический университет, кафедра прикладной океанографии и комплексного управления прибрежной зоной, доцент, канд. геогр. н.; e-mail: val@rshu.ru

следования именно моря Лаптевых продиктованы следующими соображениями. Во-первых, в географическом аспекте море Лаптевых можно рассматривать как своеобразный «центр» сибирской морской Арктики, поскольку это море в зависимости от конкретных синоптических условий может испытывать влияние обоих сопредельных океанов. Во-вторых, значительное число натурных исследований, выполнявшихся в море Лаптевых с 1970-х гг., например, [Система ..., 2009; Океанография ..., 2011] дают подробное представление о пространственном распределении гидрологических характеристик до начала современных климатических изменений, что позволяет рассматривать выбранный для анализа разрез в центральной части моря как репрезентативный, позволяющий оценить генеральные временные изменения. Оценка этих изменений рассматривалась в верхнем слое толщиной 100 м, являющимся самым изменчивым слоем Северного Ледовитого океана [Гарманов и др., 2008]. Для выявления структурных изменений проводился анализ критериев вертикальной устойчивости вод за временной период 2002–2018 гг. Для наглядности, изменения, происходящие в плотностной стратификации вод моря Лаптевых, в данной статье демонстрируются в контрастные по ледовому режиму годы. В качестве года с ледовым режимом, соответствующим «холодному», был выбран 2004 г. К «теплым» периодам с легкими ледовыми условиями были отнесены 2007, 2012 и 2016 гг. на основании обзорных ледовых карт [Обзорные ..., 2019] и информации из ежеквартальных информационных бюллетеней [Обзор гидрометеорологических ..., 2019]. Приведенная ледовитость моря Лаптевых [AARI WDC ..., 2019] для выбранных лет с июня по ноябрь представлена в таблице.

Материалы и методы исследований. Основу исследования составили данные, полученные в ходе численных экспериментов на адаптированной для условий Северного Ледовитого океана и валидированной региональной конфигурации модели NEMO [NEMO, 2019] с высоким пространственным разрешением [Даньшина, 2018]. По реконструированным модельным полям температуры и солености была рассчитана плотность воды на акватории моря по уравнению EOS-80 [Fofonoff et al., 1983]. Для анализа вертикальной стратификации моря Лаптевых были получены величины ряда традиционных критериев устойчивости. Их расчет производился в слоях расчетной сетки модели по вертикали. Оценка термохалинной устойчивости слоев производилась согласно формуле [Океанографические ..., 1975; Шутова, 2012]:

$$E = \alpha \left(\frac{dT}{dz} - \frac{dT_a}{dz} \right) + \frac{\beta dS}{dz} = E_T + E_S, \quad (1)$$

где E – термохалинная устойчивость (кг/м^4), T – температура воды *in situ* ($^{\circ}\text{C}$), S – соленость воды *in situ* (‰), $\alpha = d\rho / dT$ – коэффициент термического расширения ($\text{кг/м}^3\text{C}^{\circ}$), $\beta = d\rho / dS$ – коэффициент соленостного сжатия ($\text{кг/м}^3\text{‰}$), dT_a / dz – адиабатический градиент температуры, а E_T и E_S – тем-

Таблица

Приведенная ледовитость моря Лаптевых, тыс. км²

Год	Месяц					
	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь
2004	594,5	498,5	342	293,5	559,9	646,8
2007	414,4	239,4	145,4	112	312,5	645,4
2012	415,6	165,8	38,7	6,7	202,6	589,7
2016	511,6	399,5	201,3	95,1	214,8	570,8

пературная и соленостная компоненты устойчивости (кг/м^4), соответственно.

Для определения вклада температуры и солености в устойчивость рассчитывалась величина плотностного соотношения R_p :

$$R_p = -\frac{E_T}{E_S}. \quad (2)$$

Также для выявления изменений распределения устойчивости вод моря Лаптевых был привлечен еще один параметр плотностной стратификации – квадрат частоты Брента-Вяйсяля:

$$N^2 = \frac{g}{\rho} E, \quad (3)$$

где N^2 – квадрат частоты Брента-Вяйсяля (с^{-2}), g – ускорение свободного падения (м/с^2), ρ – плотность морской воды (кг/м^3).

По приведенным выше критериям были выделены четыре основных типа стратификации, согласно классификации К.Н. Федорова [1991]:

- полная или абсолютная устойчивость (ПУ): $\Delta T < 0, \Delta S > 0, E_T > 0, E_S > 0, R_p < 0$;
- стратификация по типу солевых пальцев (СП): $\Delta T < 0, \Delta S < 0, E_T > 0, E_S < 0, R_p > 0$;
- стратификация по типу послойной конвекции (ПК): $\Delta T > 0, \Delta S > 0, E_T < 0, E_S > 0, R_p > 0$;
- абсолютная неустойчивость (АН): $\Delta T > 0, \Delta S < 0, E_T < 0, E_S < 0, R_p < 0$.

Результаты исследований и их обсуждение.

Визуализация тенденций изменений, происходящих в вертикальной стратификации вод моря Лаптевых, была произведена на разрезе общей протяженностью 747 км. Данный разрез расположен в центральной части моря и ориентирован с северо-востока на юго-запад (врезка на рис. 1А). Он начинается в точке с координатами 78.61008° с. ш. и 132.27700° в. д. в глубоководной части моря, а завершается в точке с координатами 74.14841° с. ш. и 110.52970° в. д. на шельфе. На представленных в работе рисунках продемонстрировано распределение квадрата частоты Брента-Вяйсяля, устойчивости, плотностного соотношения и типов стратификации вод на 15 января, 24 июня, 13 августа и 22 октября 2004, 2007 и 2016 гг.

При рассмотрении распределения рассчитанных критериев устойчивости на данном разрезе можно выделить явные структурные изменения стратификации между «холодными» и «теплыми» периодами, что проявляется и в их сезонном ходе.

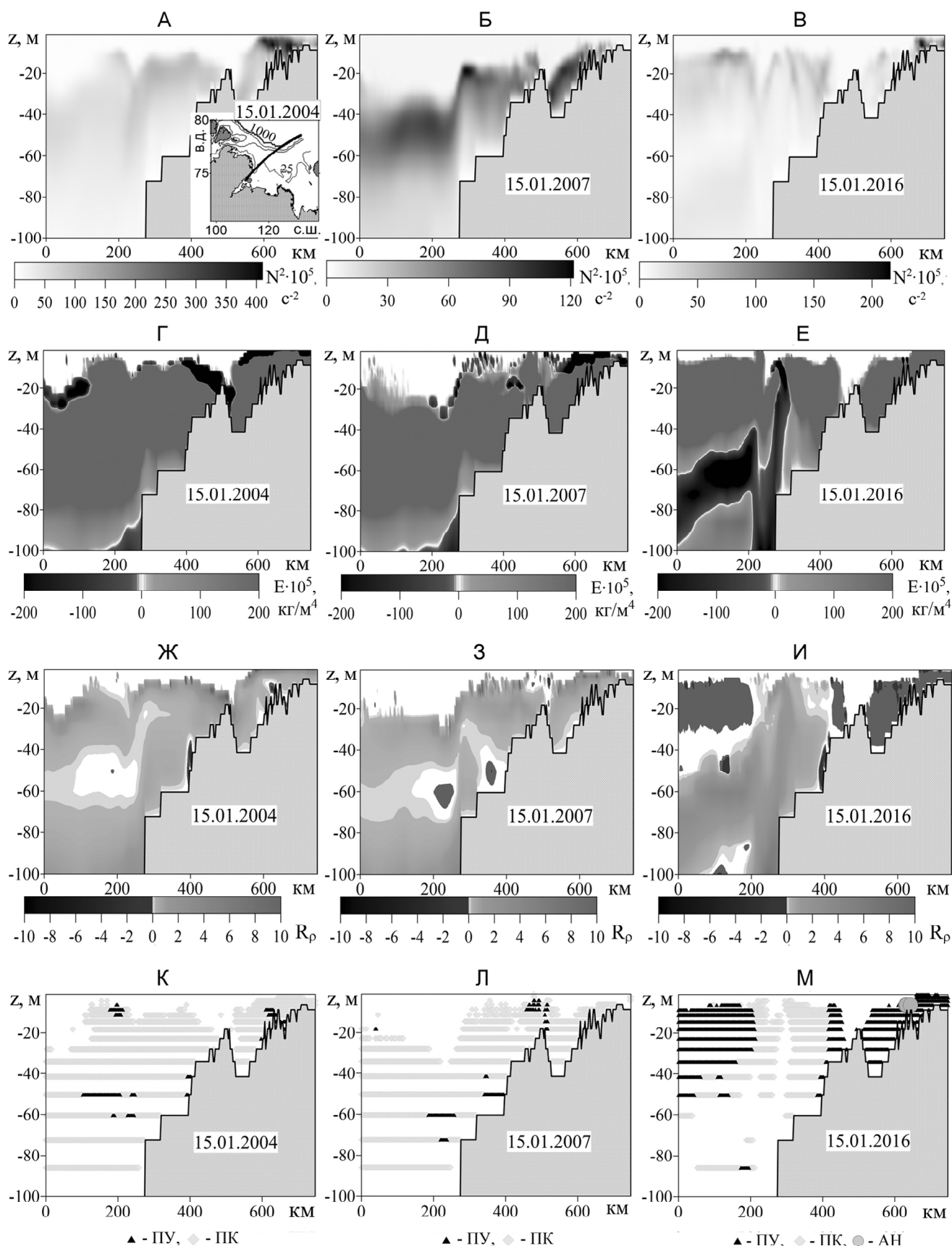


Рис. 1. Распределение критериев устойчивости на разрезе 15 января 2004, 2007 и 2016 гг.: N^2 (А, Б, В), E (Г, Д, Е), R_ρ (Ж, З, И) и типа стратификации по Фёдорову (К, Л, М), в соответствии с годами

Fig. 1. Distribution of stability criteria along the cross section on January 15, 2004, 2007 and 2016: N^2 (A, B, C), E (D, E, F), R_ρ (G, H, I); and Fedorov's type of stratification (J, K, L), in accordance with the years

Изменения в вертикальном распределении квадрата частоты Брента-Вяйсяля. В 2004 г. распределение квадрата частоты Брента-Вяйсяля в целом характеризуется более широким диапазоном изменчивости ее величин, чем в «теплые» годы. Максимальные значения N^2 постоянно проявляются на шельфе, в то время как в «теплые» годы такого не наблюдается.

В зимний период 2004 г. на расстоянии от 0 до 510 км зона максимальных величин N^2 колебалась между горизонтами от 10 до 70 м без заметных изменений по вертикали, но с яркими контрастами величин между глубоководной и мелководной частью (см. рис. 1А). В 2007 г. слой максимальных значений на всем протяжении разреза был более однороден, и его верхняя граница залегала на глубинах от 7 м на мелководье, постепенно заглубляясь, следуя за рельефом дна, до 35 м в глубоководной его части (см. рис. 1Б). На северо-восточной окраине моря в левой части разреза толщина слоя максимальных величин варьировалась от 15 до 30 м. В 2016 г. слой наибольших значений N^2 был более локализован: выделялись отдельные области в глубоководной зоне на расстоянии от 10 до 400 км и на шельфе (см. рис. 1В). В 2012 г. распределение N^2 было ближе к типу распределения в 2016 г.

В весенний период в «теплые» годы в целом наблюдалось более разнообразное пространственное распределение областей повышенных величин N^2 . Слои повышенных значений квадрата частоты Брента-Вяйсяля мигрировали по глубине и пространству, создавая обособленные области различной толщины в среднем от 10 до 20 м.

В сезон таяния льда зоны повышенных значений N^2 во все годы смещались по вертикали к поверхности моря, причем мощность слоя максимальных величин в «теплые» годы была незначительно больше, чем в 2004 г., и колебалась в диапазоне 10–15 м (рис. 2А, Б, В).

С августа во все рассматриваемые годы слой наибольших величин N^2 начинает заглубляться, причем в «теплые» годы сильнее, а толщина этих слоев становится мощнее (рис. 3А, Б, В).

Осенью при ледообразовании диапазон изменчивости N^2 возрастал во все рассматриваемые годы, но как уже упоминалось, по сравнению с «холодным» годом в «теплые» годы размах колебаний стал меньше. Однако области повышенных величин в «теплые» годы в целом охватывали более мощный слой. Вдоль разреза в 2004 г. зоны наибольших величин квадрата частоты Брента-Вяйсяля были распределены, как и в другие сезоны, с максимумом на мелководном участке разреза (рис. 4А).

В «теплые» годы возникали ситуации, когда на расстоянии 530–600 км образовывались области пониженных величин N^2 , а на расстоянии 300–450 км – как области с пониженными величинами в 2007 г., так и с повышенными значениями в 2012 г. и 2016 г. (см. рис. 4Б, В).

Для оценки величины частоты Брента-Вяйсяля, полученной на основе модельных данных, с величинами, рассчитанными на основе натурных дан-

ных [Тимохов, Чернявская, 2009], была определена средняя величина критерия устойчивости по разрезу в поверхностном слое толщиной 40 м в августе–сентябре 2007 г. В работе [Тимохов, Чернявская, 2009] приведены значения средней величины частоты Брента-Вяйсяля для этого периода времени в западной и восточной частях моря Лаптевых, которые составили $0,05 \text{ с}^{-1}$ и $0,075 \text{ с}^{-1}$, соответственно. По сравнению с этими величинами, полученное среднее значение частоты Брента-Вяйсяля на разрезе получилось несколько заниженным – $0,041 \text{ с}^{-1}$. Возможно, на занижение значения на разрезе сказалось и использование при расчете постоянной расчетной толщины слоя.

Изменения в вертикальном распределении критерия термохалинной устойчивости. В распределении критерия термохалинной устойчивости E прослеживаются иные тенденции. В отличие от квадрата частоты Брента-Вяйсяля критерий термохалинной устойчивости может менять свой знак. Положительный знак этого критерия говорит о том, что в слое вод отмечается положительное равновесие, когда плотность с глубиной увеличивается. Отрицательный знак соответствует случаю отрицательной или неустойчивой стратификации, когда плотность морской воды уменьшается с глубиной, и приводит к формированию свободной конвекции. В течение всех сезонов в «холодный» год в рассматриваемом верхнем слое до глубины 100 м наблюдается преобладание положительной величины критерия на мелководной части разреза, по сравнению с «холодным» годом. В зимний сезон в глубоководной части разреза на расстоянии от 0 до 180 км слой вод от поверхности до 45 м в «холодный» год, в отличие от «теплых» лет, больше подвержен проявлению отрицательной стратификации. В то же время, слой вод от 45 до 100 м характеризуется постоянно положительным по знаку критерием устойчивости в «холодный» год, а в «теплый» год на нижней границе этой области E уменьшается и приобретает отрицательный знак (см. рис. 1Г, Д, Е).

На свале глубин в весенний период в «теплые» годы E преимущественно отрицательный, причем с наибольшим распространением в глубоководной части разреза в 2007 г. На мелководном участке разреза также возникают отрицательно стратифицированные области. Здесь в «теплые» годы отрицательный критерий устойчивости проявляется интенсивнее, охватывая более мощный поверхностный слой.

Во время таяния льда в летний период преобладает положительная стратификация вод. Однако в «холодный» год положительные значения E охватывают почти всю толщу разреза. Исключение составляет глубоководный участок на расстоянии 200–270 км между глубинами 75–100 м (см. рис. 2Г, 3Г). В «теплые» годы в это время положительное значение критерия термохалинной устойчивости характерно в целом для верхнего слоя толщиной 40 м в глубоководной части разреза (см. рис. 2Д, Е; 3Д, Е). Ниже этой глубины в зависимости от рассматриваемого «теплого» года слои воды могут обладать как поло-

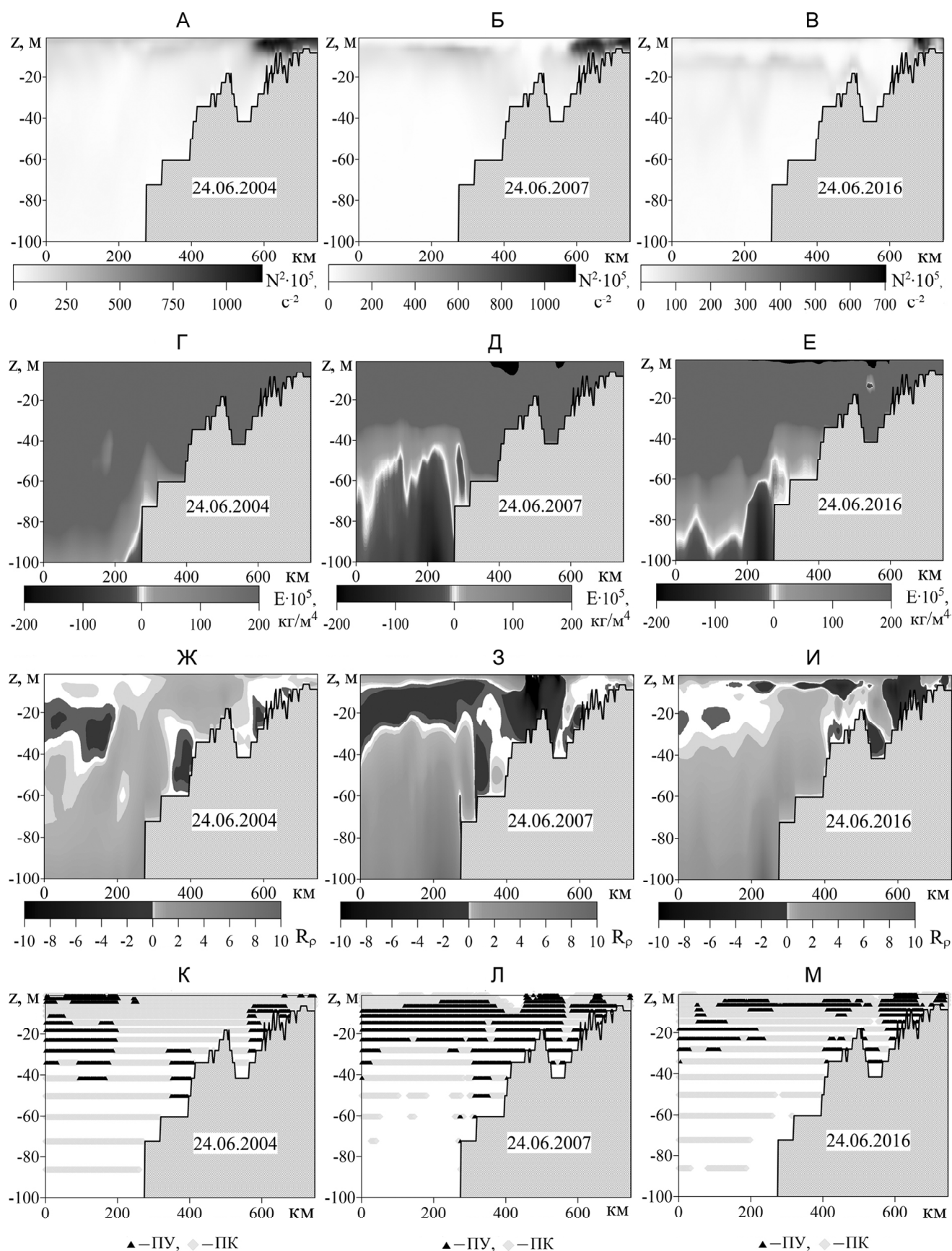


Рис. 2. Распределение критериев устойчивости на разрезе 24 июня 2004, 2007 и 2016 гг.: N^2 (А, Б, В), E (Г, Д, Е), R_ρ (Ж, З, И) и типа стратификации по Фёдорову (К, Л, М), в соответствии с годами

Fig. 2. Distribution of stability criteria along the cross section on June 24, 2004, 2007 and 2016: N^2 (A, B, C), E (D, E, F), R_ρ (G, H, I); and Федоров's type of stratification (J, K, L), in accordance with the years

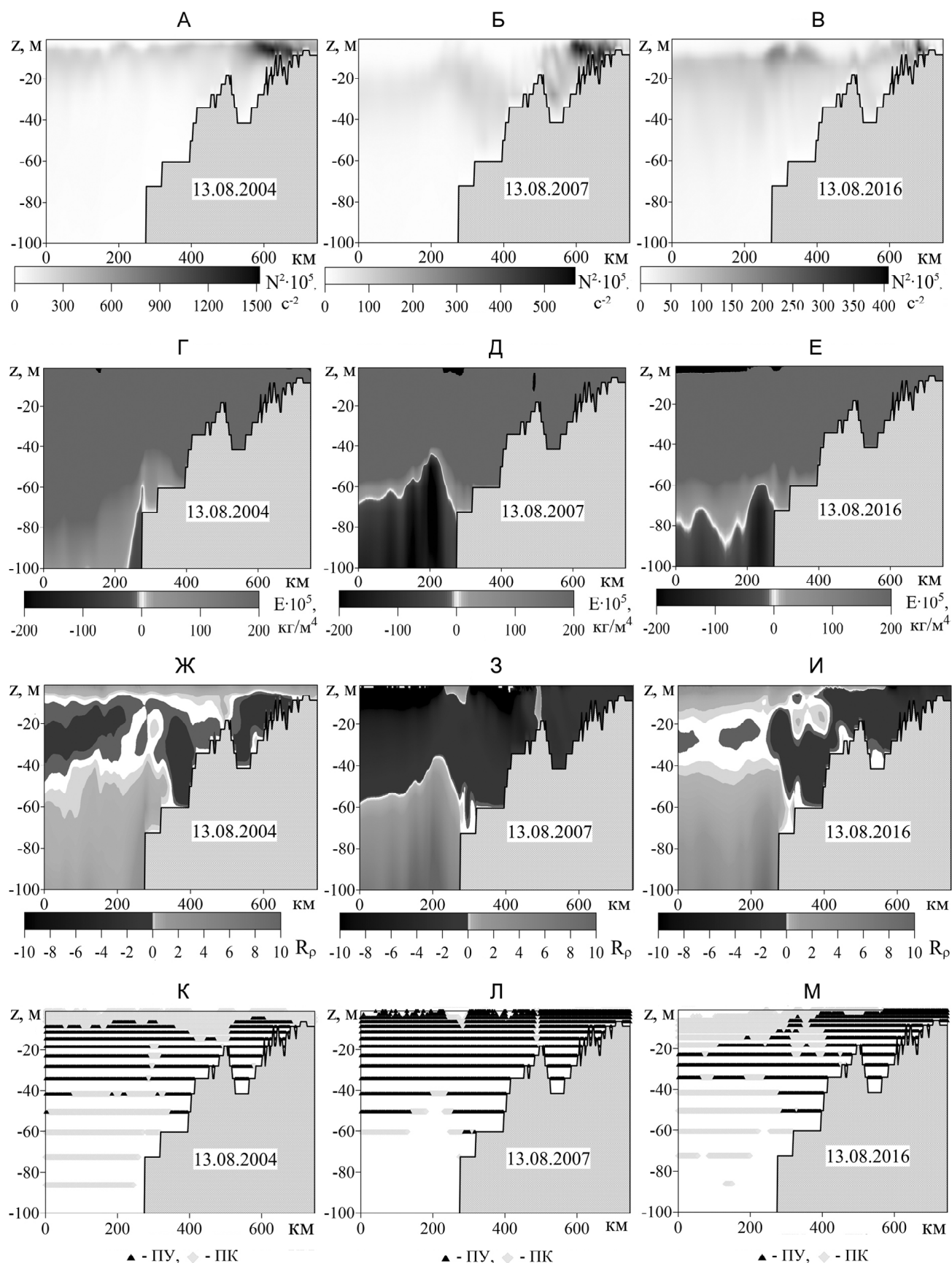


Рис. 3. Распределение критериев устойчивости на разрезе 13 августа 2004, 2007 и 2016 гг.: N^2 (А, Б, В), E (Г, Д, Е), R_ρ (Ж, З, И) и типа стратификации по Фёдорову (К, Л, М), в соответствии с годами

Fig. 3. Distribution of stability criteria along the cross section on August 13, 2004, 2007 and 2016: N^2 (A, B, C), E (D, E, F), R_ρ (G, H, I); and Fedorov's type of stratification (J, K, L), in accordance with the years

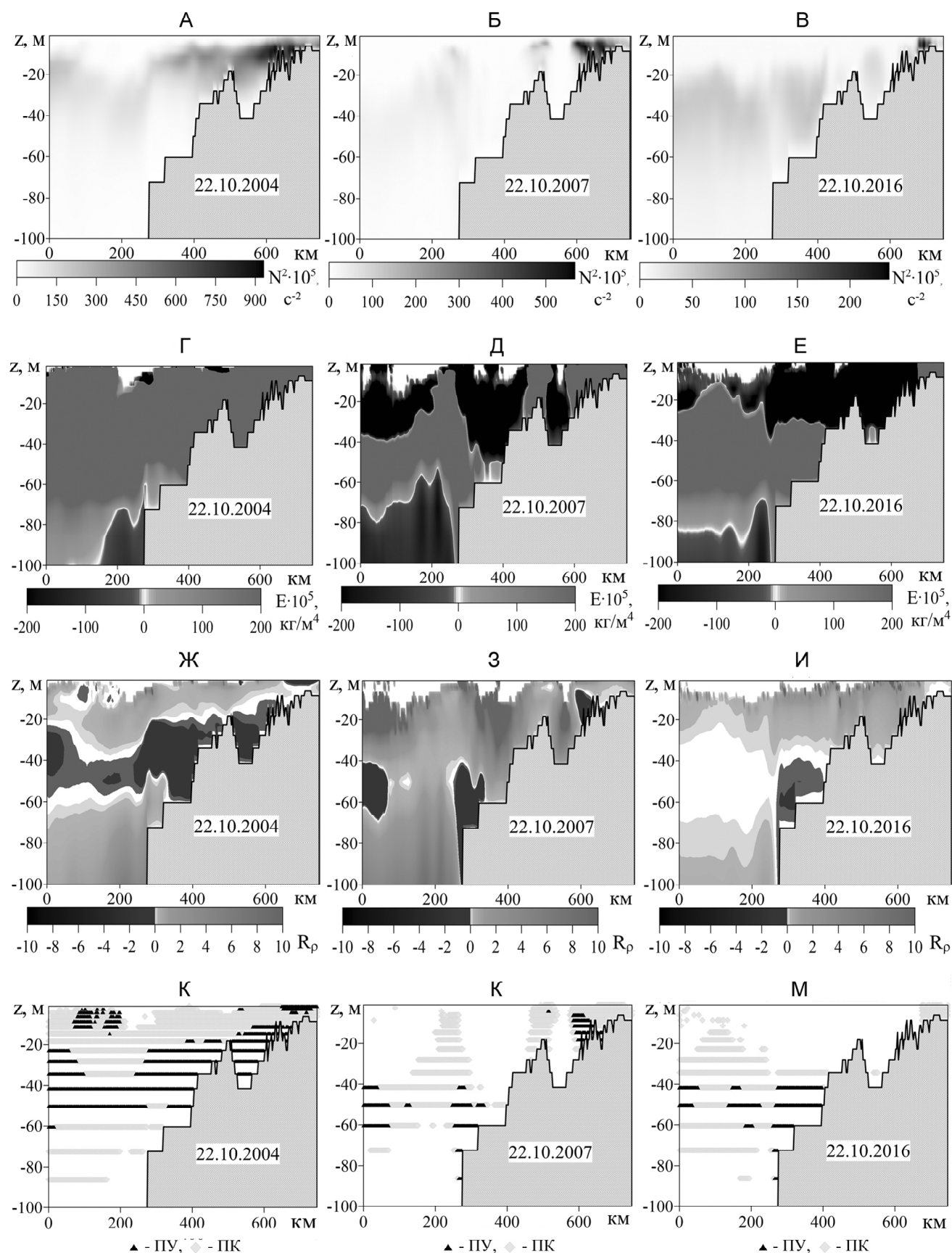


Рис. 4. Распределение критериев устойчивости на разрезе 22 октября 2004, 2007 и 2016 гг.: N^2 (А, Б, В), E (Г, Д, Е), R_ρ (Ж, З, И) и типа стратификации по Фёдорову (К, Л, М), в соответствии с годами

Fig. 4. Distribution of stability criteria along the cross section on October 22, 2004, 2007 and 2016: N^2 (A, B, C), E (D, E, F), R_ρ (G, H, I); and Fedorov's type of stratification (J, K, L), in accordance with the years

жительной, так и отрицательной величиной E разной интенсивности. В летний период у поверхности моря до глубины 14 м локально могут формироваться области с отрицательным критерием устойчивости, причем мощность таких областей и их количество больше в «теплые» годы (см. рис. 2Д, Е; 3Д, Е).

С началом процесса ледообразования в отличие от «холодного» года области с отрицательным E в «теплые» годы охватывают более мощный поверхностный слой 30–40 м в глубоководной части разреза (см. рис. 4Г, Д, Е). На шельфе на расстоянии 650–800 км в этот сезон во все анализируемые годы сохраняются положительные значения критерия устойчивости.

Изменения в вертикальном распределении плотностного соотношения. В зимний период в «теплые» годы по сравнению с «холодным» роль отрицательного по знаку плотностного соотношения усилилась на всем разрезе, особенно в 2016 г. (см. рис. 1Ж, 3, И).

В 2004 г. в весенний период на большей площади разреза также сохранялось положительное плотностное соотношение. Только две зоны характеризовались отрицательными значениями: участок на расстоянии до 100 км от начала разреза между изобатами 5–25 м и участок на свале глубин на расстоянии от 300 до 400 км между глубинами 35–60 м. Весной до начала мая в «теплые» годы на большей площади разреза также преобладало положительное плотностное соотношение. Однако областей с отрицательным плотностным отношением в глубоководной зоне становилось больше и они, как правило, оказывались мощнее. При этом, области с отрицательным R_p формировались на шельфе на расстоянии от 550 до 660 км.

С началом таяния льдов в летний период в «холодный» год на глубинах от 5 до 60 м возрастает роль отрицательного плотностного соотношения. В «теплые» годы, по сравнению с 2004 г., площадь $R_p < 0$, как и сам диапазон колебаний абсолютной величины R_p , увеличиваются между глубинами от 1 до 75 м (см. рис. 2Ж, 3, И; 3Ж, 3, И). В августе «холодного» года поверхностный слой на всем протяжении разреза характеризуется положительным R_p (см. рис. 3Ж), к сентябрю этот слой увеличивается по толщине до 17 м.

С сентября в слое от 17 до 50 м в среднем наблюдается отрицательное плотностное соотношение. В отличие от 2004 г., в 2007 г. и на поверхности образуются локальные области с $R_p < 0$, охватывающие слой воды толщиной до 20 м. В отличие от сентября 2004, 2007, 2012 гг., в сентябре 2016 г. на участке разреза от 200 до 740 км до глубины 65 м плотностное соотношение постоянно имеет отрицательный знак.

С началом октября независимо от рассматриваемого года наблюдается заглубление слоя с отрицательными значениями R_p (см. рис. 4Ж, 3, И). Однако на фоне «холодного» года в «теплые» мощность областей с отрицательным плотностным соотношением ослабевает.

С ноября структура вертикального распределения плотностного соотношения трансформируется. В «теплые» годы на общем фоне положительных R_p выделяются локальные области его отрицательных величин, тогда как в «холодный» год площади, занимаемые отрицательными и положительными величинами R_p примерно одинаковы.

Изменения в вертикальном распределении типов стратификации. Независимо от рассматриваемого года в сезонном ходе при рассмотрении типов стратификации по классификации К.Н. Федорова в целом преобладают условия, способствующие развитию послойной конвекции (см. рис. 2К, М; 3К; 4К, Л, М). Тем не менее, в «теплые» годы наблюдается тенденция к увеличению влияния условий, благоприятствующих развитию полной устойчивости на разрезе, особенно в августе–сентябре (рис. 3Л, М). К тому же в «теплые» годы чаще возникают локальные области с условиями, благоприятствующими развитию стратификации по типу солевых пальцев и абсолютной неустойчивости.

Выводы:

– анализ распределений основных параметров вертикальной устойчивости вод моря Лаптевых на рассматриваемом разрезе с координатами 78.61008° с. ш., 132.27700° в. д. и 74.14841° с. ш., 110.52970° в. д. даже на качественном уровне показал, что в структуре вертикальной устойчивости в период потепления и современного сокращения ледяного покрова наметились заметные изменения. Преобразования, происходящие в термохалинной структуре вод моря Лаптевых, непосредственно отражаются на распределении плотности его вод, а вклад температуры и солености в изменение плотностной стратификации нагляднее всего демонстрирует плотностное соотношение;

– по сравнению с «холодным» 2004 г. в рассматриваемые «теплые» годы диапазон изменения величины частоты Брента-Вяйсяля уменьшился. В течение всего года на мелководье перестала проследиваться зона ее максимальных величин. Во время таяния льда мощность слоя максимальных значений частоты Брента-Вяйсяля стала больше. Во время ледообразования области повышенных величин в «теплые» годы в целом охватывали больший слой;

– в зимний период «теплых» лет площадь разреза с положительным критерием термохалинной устойчивости сократилась как в глубоководной, так и в мелководной части разреза. В весенний период на мелководье отрицательная термохалинная устойчивость проявляется интенсивнее, охватывая более мощный поверхностный слой;

– по сравнению с «холодным» годом с января по апрель в «теплые» годы на глубоководном участке разреза более интенсивно усиливается распространение отрицательного плотностного соотношения, достигая наибольшей мощности в летний период. С началом выхолаживания в октябре мощность этих областей уменьшается по сравнению с «холодным» годом;

– чаще стали возникать условия, благоприятствующие развитию полной устойчивости вод.

Таким образом, по реконструированным термohалинным полям, полученным в ходе расчетов на модели NEMO, прослеживаются явные из-

менения в сезонном ходе распределения критериев стратификации, что вероятно является «откликом» гидрологического режима моря Лаптевых на наметившиеся современные изменения климата.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (уникальный идентификатор проекта – RFMEFI61617X0076).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев Г.В., Александров Е.И., Глок Н.И., Иванов Н.Е., Смоляницкий В.М., Харланенкова Н.Е., Юлин А.В. Эволюция площади морского ледового покрова Арктики в условиях современных изменений климата // Исследование Земли из космоса. 2015. № 2. С. 5–19.
- Вертикальная структура и динамика подледного слоя океана / Под ред. Л.А. Тимохова. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 141 с.
- Волков В.А., Лукин В.В. Водные массы и стратификация вод Арктического бассейна // Труды ААНИИ. 1985. Т. 398. С. 30–39.
- Гарманов А.Л., Колтышев А.Е., Никифоров Е.Г., Тимохов Л.А., Морисон Дж. Верхний перемешанный слой в Арктическом бассейне // Труды ААНИИ. 2008. Т. 448. С. 149–189.
- Даньшина А.В. Влияние теплозапаса деятельного слоя Восточно-Сибирского моря на эволюцию ледяного покрова // Оригинальные исследования. 2018. Т. 8. № 5. С. 4–15.
- Океанографические таблицы. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 477 с.
- Океанография и морской лед / Под ред. И.Е. Фролова. М.: Паулсен, 2011. 432 с.
- Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития / Отв. ред. Х. Кассенс, А.П. Лисицын, Й. Тиде, Е.И. Полякова, Л.А. Тимохов, И.Е. Фролов. М.: Изд-во Московского университета, 2009. 608 с.
- Тимохов Л.А., Чернявская Е.А. Особенности состояния поверхностного слоя Арктического бассейна в аномальное лето 2007 // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 3(83). С. 19–28.
- Федоров К.Н. Избранные труды по физической океанологии. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 308 с.
- Шутова М.М. Общая океанология. Гидрофизика океана. Владивосток: Издательский дом Дальневосточного федерального университета, 2012. 151 с.
- Alekseev G.V., Danilov A.I., Kattsov V.M., Kuzmina S.I., Ivanov N.E. Changes in the climate and sea ice of the Northern Hemisphere in the 20th and 21st centuries from data of observations and modelling. *Izv. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2009, vol. 45, no. 6, p. 675–686.
- Callaghan T.V., Johansson M., Key J., Prowse T.D., Ananicheva M., Klepikov A. Feedbacks and interactions: From the Arctic cryosphere to the climate system. *Ambio*, 2011, vol. 40, p. 75–86.
- Davis P.E., Lique C., Johanson H.L., Guthrie J.D. Competing Effects of Elevated Vertical Mixing and Increased Freshwater Input on the Stratification and Sea Ice Cover in a Changing Arctic Ocean. *American Meteorological Society*, 2016, vol. 46, p. 1531–1553.
- Fofonoff N.P., Millard R.C. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. *UNESCO Technical papers in marine science*, 1983, vol. 44, p. 53.
- Kattsov V., Ryabinin V., Overland J., Serreze M., Visbeck M., Walsh J., Meier W., Zhang X. Arctic sea ice change: a grand challenge of climate science. *Journal of Glaciology*, 2010, vol. 56, no. 200, p. 1115–1121.
- Overland J.E., Wang M., Salo S. The recent Arctic warm period. *Tellus*, 2008, p. 1–9.
- Poloukhin N.V., Talipova T.G., Pelinovsky E.N., Lavrenov I.V. Kinematic characteristics of the high-frequency internal wave field in the Arctic Ocean. *Oceanology*, 2003, vol. 43, no. 3, p. 333–343.
- Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Carmack E.C. Stability of the arctic halocline: a new indicator of arctic climate change. *Environmental Research Letters*, 2018, vol. 13, p. 1–8.
- Rudels B., Larsson A.-M., Sehlstedt P.-I. Stratification and water mass formation in the Arctic Ocean: some implications for the nutrient distribution. *Polar Research*, 1991, vol. 10, p. 19–32.
- Электронные ресурсы
- Обзор гидрометеорологических процессов в Северной полярной области. Ежеквартальный информационный бюллетень // Трансарктика. ААНИИ. URL: <http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=449> (дата обращения 20.02.2019).
- Обзорные ледовые карты. Оперативные данные // Трансарктика. ААНИИ. URL: <http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=94> (дата обращения 20.02.2019).
- AARI WDC Sea Ice file server. URL: <http://wdc.aari.ru/datasets/ssmi/data/north/extent/lap/> (дата обращения 20.03.2019).
- NEMO. Community Ocean Model. URL: <https://www.nemo-ocean.eu/> (дата обращения 20.03.2019).

Поступила в редакцию 01.08.2019

После доработки 23.02.2020

Принята к публикации 06.08.2020

A.V. Danshina¹, V.V. Ivanov², V.Yu. Chantsev³CHANGES IN VERTICAL STABILITY
OF THE LAPTEV SEA UPPER LAYER UNDER
THE ICE COVER SHRINKAGE

The main criteria of the vertical stability of water in the upper 100-meter layer of the Laptev Sea are calculated from the reconstructed spatial-temporal variability of the three-dimensional structure of temperature and salinity, obtained on the basis of numerical experiments using the regional configuration of the NEMO mathematical model adapted to the conditions of the Arctic Ocean. The modeling results are presented on a vertical section crossing both shallow and deep-water parts of the sea. The structural changes in the distribution of vertical water stability were revealed for warm periods in the beginning of the XXI century with the ice cover shrinkage. During these periods the situations favoring the development of a full vertical stability of waters are more frequent. The range of changes of the Brunt-Väisälä frequency in the «warm» years decreases against the «cold» year of 2004. The depth of the layer with maximum values of the Brunt-Väisälä frequency increases during the periods of ice melting. At the same time the negative thermohaline stability is more intensive in spring in shallow areas of the sea, extending into a deeper surface layer. During winter period of «warm» years the area of the section with a positive criterion of thermohaline stability decreases both for the deep-water and the shallow-water parts of the section. The depth of the layer with negative values of the density ratio reaches the highest values during summer periods of the «warm» years.

Key words: Arctic Ocean, surface layer, stability, stratification, Brunt-Vaisala frequency

Acknowledgements. The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (the project no. ID RFMEFI61617X0076).

REFERENCES

- Alekseev G.V., Aleksandrov E.I., Glok N.I., Ivanov N.E., Smolyanitsky V.M., Kharlanenkova N.E., Yulin A.V. Evolyucija ploshhadi morskogo ledovogo pokrova Arktiki v usloviyah sovremennykh izmenenij klimata [Arctic sea ice cover in connection with climate change], *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, no. 2, p. 5–19. (In Russian)
- Alekseev G.V., Danilov A.I., Kattsov V.M., Kuzmina S.I., Ivanov N.E. Changes in the climate and sea ice of the Northern Hemisphere in the 20th and 21st centuries from data of observations and modeling, *Izv. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2009, vol. 45, no. 6, p. 675–686.
- Callaghan T. V., Johansson M., Key J., Prowse T.D., Ananicheva M., Klepikov A. Feedbacks and interactions: From the Arctic cryosphere to the climate system, *Ambio*, 2011, vol. 40, p. 75–86.
- Danshina A.V. Vliyanie teplozapasa dejatel'nogo sloja Vostochno-Sibirskogo morja na jevoljuciju ledjanogo pokrova [Heat Content Effect of the Active Layer on the Ice Cover Evolution in the East Siberian Sea], *Original'nye issledovaniya*, 2018, vol. 8, no. 5, p. 4–15. (In Russian)
- Davis P.E., Lique C., Johanson H.L., Guthrie J.D. Competing Effects of Elevated Vertical Mixing and Increased Freshwater Input on the Stratification and Sea Ice Cover in a Changing Arctic Ocean, *American Meteorological Society*, 2016, vol. 46, p. 1531–1553.
- Fedorov K.N. *Izbrannye trudy po fizicheskoj okeanologii* [Selected Works on Physical Oceanology], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1991. 308 p. (In Russian)
- Fofonoff N.P., Millard R.C. *Algorithms for computation of fundamental properties of seawater*, UNESCO Technical papers in marine science, 1983, vol. 44, p. 53.
- Garmanov A.L., Koltyshev A.E., Nikiforov E.G., Timokhov L.A., Morison Dz. Verhnij peremeshannyj sloj v Arkticheskom bassejne [Upper mixed layer in the Arctic basin], *Trudy AANII* [Proc. of the AANII], 2008, vol. 448, p. 149–189. (In Russian)
- Kattsov V., Ryabinin V., Overland J., Serreze M., Visbeck M., Walsh J., Meier W., Zhang X. 2010: Arctic sea ice change: a grand challenge of climate science, *Journal of Glaciology*, 2010, vol. 56, no. 200, p. 1115–1121.
- Okeanograficheskie tablicy* [Oceanographical tables], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975. 477 p. (In Russian)
- Okeanografija i morskoy ljod* [Oceanography and sea ice], Frolov I.E. (Ed.), Moscow, Paulsen Publ., 2011, 432 p. (In Russian)
- Overland J.E., Wang M., Salo S. *The recent Arctic warm period*, Tellus Publ., 2008, p. 1–9.
- Poloukhin N.V., Talipova T.G., Pelinovsky E.N., Lavrenov I.V. Kinematic characteristics of the high-frequency internal wave field in the Arctic ocean, *Oceanology*, 2003, vol. 43, no. 3, p. 333–343.
- Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Carmack E.C. Stability of the arctic halocline: a new indicator of arctic climate change, *Environmental Research Letters*, 2018, vol. 13, p. 1–8.
- Rudels B., Larsson A.-M., Sehlstedt P.-I. Stratification and water mass formation in the Arctic Ocean: some implications for the nutrient distribution, *Polar Research*, 1991, vol. 10, p. 19–32.
- Shutova M.M. *Obshhaja okeanologija. Gidrofizika okeana* [General Oceanology. Hydrophysics of the Ocean], Vladivostok, Far Eastern Federal University Publ., 2012, 151 p. (In Russian)
- Sistema moray Laptevyyh i prilgayushchih morej Arktiki: sovremennoe sostoyanie i istoriya razvitiya* [System of the Laptev Sea and the Adjacent Arctic Seas: Modern and Past Environments], Kassens X., Lisicyn A.P., Tide J., Polyakova E.I., Timokhov L.A.,

¹ Arctic and Antarctic Research Institute, Department of Oceanology, Scientific Researcher, PhD in Physics and Mathematics; e-mail: danshina@aaari.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology, Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Physics and Mathematics; e-mail: vladimir.ivanov@aaari.ru

³ Russian State Hydrometeorological University, Department of Applied Oceanography and Integrated Coastal Zone Management, Associate Professor, PhD in Geography; e-mail: val@rshu.ru

Frolov I.E. (Ed.), Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2009. 608 p. (In Russian)

Timokhov L.A., Chernyavskaya E.A. Osobennosti sostojanija poverhnostnogo sloja Arkticheskogo bassejna v anomal'noe leto 2007 [Features of the Arctic Basin surface layer at anomalous summer of 2007], *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2009, no. 3(83), p. 19–28. (In Russian)

Vertikal'naja struktura i dinamika podlednogo sloja okeana [Vertical structure and dynamics of ocean under ice], Timokhov L.A. (Ed.), Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989, 141 p. (In Russian)

Volkov V.A., Lukin V.V. Vodnye massy i stratifikacija vod Arkticheskogo bassejna [Water masses and stratification of the Arctic basin]. *Trudy AANII* [Proc. of the AANII], 1985, vol. 398, p. 30–39. (In Russian)

Web sources

AARI WDC Sea Ice file server. URL: <http://wdc.aari.ru/datasets/ssmi/data/north/extent/lap/> (access date 20.03.2019).

NEMO. Community Ocean Model. URL: <https://www.nemo-ocean.eu/> (access date 20.03.2019).

Obzor gidrometeorologicheskikh processov v Severnoj poljarnoj oblasti. Ezhekvartal'nyj informacionnyj bjulleten' [Review of hydrometeorological processes in the North Polar Region. Quarterly information bulletin], Transarktika. AARI. URL: <http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=449> (access date 20.02.2019).

Obzornye ledovye karty. Operativnye dannye [Survey ice maps. Operational data]/ Transarktika. AARI. URL: <http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=94> (access date 20.02.2019).

Received 01.08.2019

Revised 23.02.2020

Accepted 06.08.2020

УДК 550.424.4; 631.416.9; 630.1

П.Р. Енчилик¹, И.Н. Семенов², Е.Н. Асеева³, О.А. Самонова⁴, А.Д. Иовчева⁵, Е.В. Терская⁶**КАТЕНАРНАЯ БИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ В ЮЖНО-ТАЕЖНЫХ ЛАНДШАФТАХ (ЦЕНТРАЛЬНО-ЛЕСНОЙ ЗАПОВЕДНИК, ТВЕРСКАЯ ОБЛАСТЬ)**

Для оценки миграции микроэлементов в системе «почвы–растения» в южной части Центрально-Лесного заповедника в пределах пологого склона междуречья изучена ландшафтно-геохимическая catena с дерново-подзолистыми и подзолистыми профильно оглеенными почвами под хвойно-широколиственным лесом на двучленных отложениях. На основе содержания Mn, Fe, Zn, Sr, Cu, Ni, Cr, Pb в материнской породе, почвах и растениях проанализирована биогеохимическая дифференциация ландшафтов. Почвы catены характеризуются околокларковыми содержаниями Mn, Pb, пониженным – Cu, Fe, Zn, Ni, Sr, Cr. Гумусовые и подстилочные горизонты верхних звеньев catены обогащены Pb, Mn, Zn. Горизонт EL обеднен Fe, Ni, Sr, Zn. В горизонте BT повышено содержание Cr, Ni, Cu, понижено – Sr, Mn. В хвойно-широколиственных лесах зольность изученных хвойных и лиственных деревьев составляет 1–4 и 1–8% соответственно, наземной части трав – 3–12%. Изученные виды растений содержат околокларковые количества Cu, Zn, Ni. Ветки и кора древесных растений обеднены Fe, Cr, сфагнум – Sr. В растениях нижних звеньев catены снижается содержание Fe, а Mn – увеличивается. Деревья наиболее активно вовлекают в биологический круговорот биофильные Mn, Zn, а травы и сфагнум – Fe, Cr, Pb. В автономном и транслювиальном ландшафтах зеленая фитомасса растений накапливает Cu. В ландшафтах верхних звеньев catены по органам растений металлы распределены более равномерно, чем в нижних, где фотосинтетические органы активнее накапливают Mn, Cu, Sr, Zn. Вдоль catены наиболее дифференцировано содержание Mn, Ni, Fe, равномерно распределены Zn, Sr, Cu. Хвоя ели во всех ландшафтах (особенно в гидроморфных) интенсивнее накапливает Mn. Биогеохимическая активность с основным вкладом Mn, Cu, Sr, Zn, Ni максимальна в фотосинтезирующих органах ели, липы, ивы и сфагнума, минимальна – у вяза и клена.

Ключевые слова: смешанные леса, тяжелые металлы, подвижные соединения, биогеохимическая специализация, биологическое поглощение, Валдайская возвышенность, потенциально токсичные элементы

Введение. В Московском регионе из-за усиления техногенной нагрузки все более востребован фоновый мониторинг с катенарным анализом радиального и латерального распределения веществ. В почвах тайги активно мигрируют Fe, Cu, Mn, Zn, Sr [Никонов и др., 2004; Авессаломова, 2007; Семенов и др., 2016], доступность растениям (подвижность) Zn, Cu, Mn, Fe увеличивается с ростом концентрации водорастворимого органического вещества и уменьшается с ростом pH [Караванова и др., 2006]. На микроэлементный состав растений влияют условия среды произрастания и физиологические особенности. Филогенетическая специализация зависит от условий в местах видообразования: гумидокатные (катионофильные) растения накапливают катионогенные Zn, Mn, Cu, Pb, Sr, Ni, а арида-

нитные (анионофильные) поглощают Cr, мигрирующий преимущественно как анион [Касимов и др., 2019; Авессаломова, 2020]. В хвойно-широколиственных лесах в надземные органы деревьев активно переходит Zn. В коре гумидокатных видов аккумулируется избыток Zn [Железнова и др., 2017]. Широколиственные деревья эффективно поглощают Mn из почв Аллеганского плато на северо-востоке Огайо [Herndon et al., 2019]. На юго-востоке Смоленско-Московской возвышенности вне зависимости от видового состава леса растения наиболее интенсивно поглощают Mn, Zn, Cu [Исаченкова, Тарзаева, 2006], участвующие в метаболизме [Kabata-Pendias, 2011]. Широколиственные деревья вовлекают в биологический круговорот больше элементов, чем хвойные [Исаченкова, Тарзаева, 2006],

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, мл. науч. с., аспирант; *e-mail:* polimail@inbox.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* semenkov@geogr.msu.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* asejeva@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, вед. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* oasamonova@mail.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, техник, магистрант; *e-mail:* y_nastia@mail.ru

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, науч. с.; *e-mail:* Elena_terskaya@mail.ru

а травы активнее деревьев поглощают Cu, Cr. Последние слабо поглощают Pb [Kabata-Pendias, 2011] и сильно – Sr [Watmough, 2014].

Цель работы – оценка миграции металлов в системе «породы–почвы–растения» катены в Центрально-Лесном заповеднике (ЦЛЗ) с анализом радиальной дифференциации почв, состава растений и связи элементного состава почв и растений.

Материалы и методы исследования. В ЦЛЗ (юг части Валдайской возвышенности) из-за выровненного рельефа, слабой водопроницаемости пород

и избыточного увлажнения господствуют не хвойно-широколиственные, а южно-таёжные ельники, занимающие соответственно 17 и 47% его площади [Смирнова и др., 1999]. На пологом (<2°) склоне междуречья в южной части заповедного ядра ЦЛЗ исследована катена от вершины моренного холма до плоской террасовидной поверхности с временным водотоком вблизи трансекты (рис. 1), где сотрудники ИПЭЭ имени А.Н. Северцова РАН наблюдают за эталонными экосистемами [Puzachenko et al., 2013]. Катена сложена по-

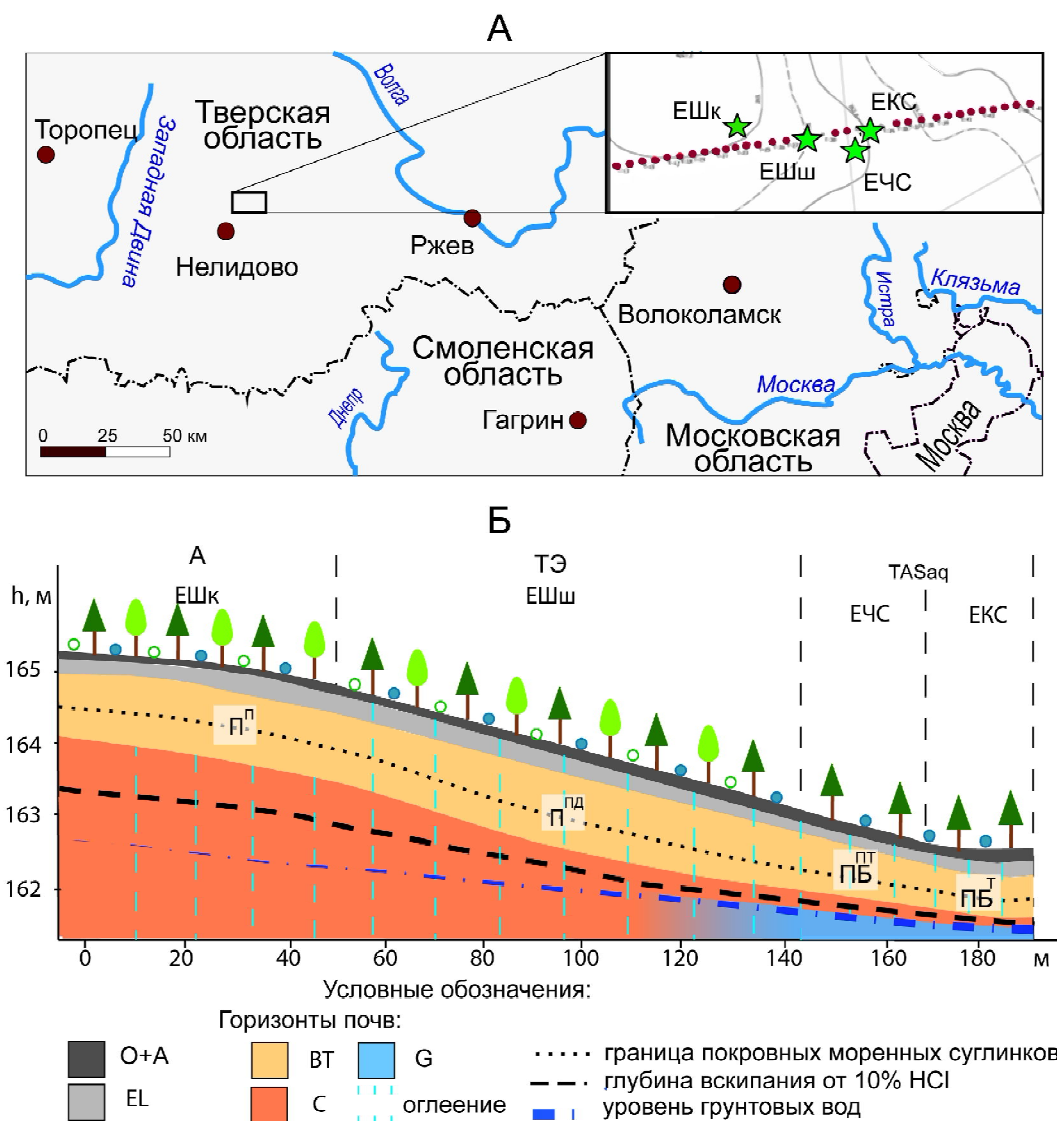


Рис. 1. Территория исследования. А – южнотаёжная катена на территории заповедника и расположение разрезов, Б – схематический профиль катены; ЕШк – липово-еловый лещиново-кисличный лес на подзолистой почве (П^п), ЕШш – елово-широколиственный лещиново-широколистный лес на дерново-подзолистой почве (П^{пд}), ЕЧС – ельник чернично-сфагновый на торфянисто-перегнойной подзолистой профильно-оглеенной почве (ПБ^{пт}) и ЕКС – ельник кислично-сфагновый на торфянистой подзолистой профильно-оглеенной (ПБ^т) почве; А – гумусовый, О – органический, EL – элювиальный, В – текстурный, С – почвообразующая порода, G – глеевый

Fig. 1. Study area. А – Southern taiga catena in the reserve and location of the sections, Б – schematic profile of catena; ЕШк – *Ti lia cordata*+*Picea ábies* *Córylus avellána*–*Óxalis acetosélla* plant community on П^п – Endocalcaric Albic Stagnic Retisols (Loamic), ЕШш – *Picea ábies*+*Tília cordáta*+*Ácer platanoides*–*Córylus avellána*–grass plant community on П^{пд} – Albic Stagnic Retisols (Humic, Loamic), ЕЧС – *Picea ábies*–*Vaccínium myrtillus*–*Sphagnum* sp. and ЕКС–*Picea ábies*–*Sphagnum* sp. plant communities on ПБ^{пт} and ПБ^т, respectively, – Albic Gleyic Histic Retisols (Loamic). Horizons: А – humus, О – organic, EL – albic, В – argic, С – parent material, G – gleyic

кровными суглинками, подстилаемыми на 90–120 см красно-бурыми моренными отложениями Валдайского оледенения с присутствием карбонатов [Пузаченко, Козлов, 2007; Karavanova, Malinina, 2009].

В пределах катены зональные хвойно-широколиственные леса произрастают в автономном (А) и трансэлювиальном (ТЭ) ландшафтах, а хвойные южнотаежные леса – в трансаккумулятивном супераквальном (TASaq). В хорошо дренируемом А-ландшаф-

те сформировались грубогумусированные подзолистые почвы со слабокислой средой в верхних горизонтах и щелочной – в породе (рис. 2) и системой горизонтов О–ао–АУЕЛ–ЕЛf–ЕЛg–ВТ–2ВТса–2Сg,са под липово-еловым лещиново-кисличным лесом с примесью клена остролистного *Acer platanoides* и вяза шершавого *Ulmus glabra*. На выпуклом склоне ТЭ-ландшафта сформировались дерново-подзолистые почвы с набором горизонтов О–АУ–АУЕЛ–ЕЛf,g,y–ЕЛg–ВТ–2ВТ(g)–2С(g) под

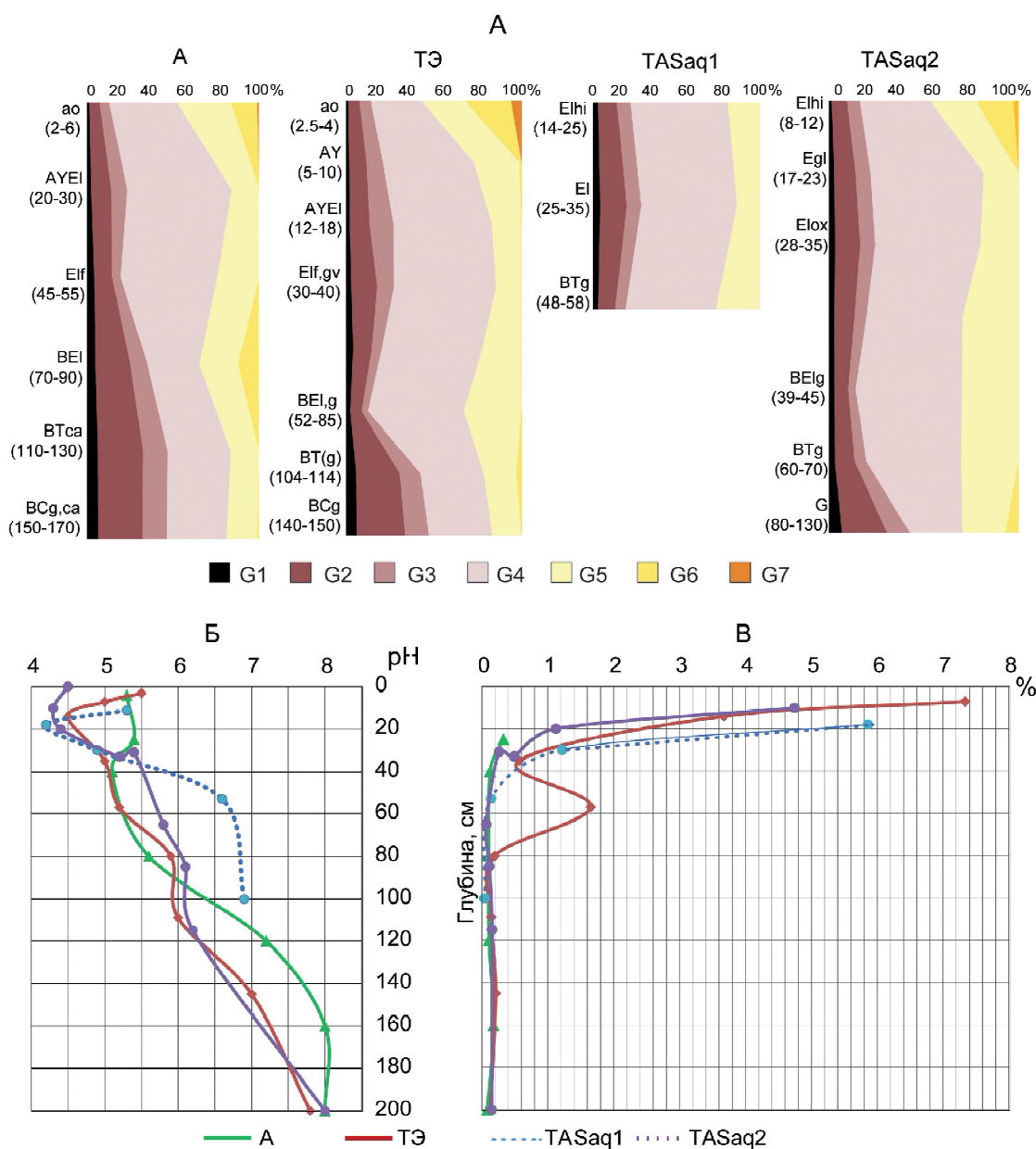


Рис. 2. Свойства почв южнотаежной катены. А – гранулометрический состав: G1 – ил (<1 мкм); G2 – мелкая (5–1), G3 – средняя (10–5) и G4 – крупная (50–10) пыль; G5 – тонкий (250–50); G6 – средний (500–250) и G7 – крупный (1000–500) песок. Б – профильное распределение величины pH и В – профильное распределение органического углерода в разрезах: А – автономного ландшафта вершины холма, ТЭ – трансэлювиального ландшафта склона, TASaq1 – трансаккумулятивно-супераквального ландшафта нижней части склона, TASaq2 – трансаккумулятивно-супераквального ландшафта неглубокой потяжины

Fig. 2. Soil properties in southern taiga catena: А – grain size: G1 – clay (<1 mm); G2 – very fine (5–1), G3 – medium (10–5) and G4 – coarse (50–10) silt; G5 – fine (250–50), G6 – medium (500–250) and G7 – coarse (1000–500) sand; Б – pH and В – total organic carbon in soil profiles located within: А – autonomous landscape of a hill summit, ТЭ – trans-eluvial landscape of a slope, TASaq1 – trans-accumulative-super-aqual landscape of the lower part of a slope, TASaq2 – trans-accumulative-super-aqual landscape of a gully bottom

елово-широколиственным (липа сердцевидная *Tilia cordata*) кустарниково(*Corylus avellana*)-разнотравным лесом. Травянистый ярус представлен неморальными: печёночницей благородной *Hepatica nobilis*, подмаренником душистым *Galium odoratum*, ясноткой зеленчуковой *Lamium galeobdolon*, копытнем европейским *Asarum europaeum*, медуницей неясной *Pulmonaria obscura*, а также орляком обыкновенным *Pteridium aquilinum*, хвощом лесным *Equisetum sylvaticum*, кислицей обыкновенной *Oxalis acetosella*. У подножья склона (TASaq1-ландшафт) на торфянисто-перегнойных подзолистых профильно-оглеенных почвах с набором горизонтов O–H–ELhi,g–ELnn,ox–BTg–2BTg–2Cg,ca произрастает ельник чернично-сфагновый с подростом липы сердцевидной и клена остролистного и подлеском из рябины обыкновенной *Sorbus aucuparia*. В более увлажненной неглубокой потяжине (TASaq2-ландшафт) сформировались торфянистые подзолистые профильно-оглеенные почвы с системой горизонтов T–Elhi,ox,nn–BELg,y,nn–BTg–2BTg–2G под ельником кислично-сфагновым с ивой козьей *Salix caprea*, подростом ели обыкновенной и липы сердцевидной.

Почвы (31 проба) и растения (87 проб 19 видов; в работе в основном рассмотрены сквозные виды, встречающиеся по всей катене) опробованы в июне 2017 г. Рядом с каждым разрезом дерева опробовали с нескольких особей в пределах площади 10×10 м или разных сторон одного дерева по методике [Терехина, 2010]. Кору срезали ножом на высоте 1,0–1,5 м по окружности ствола. Отдельные виды трав и кустарников собирали в радиусе до 7 м от разреза для получения представительной пробы необходимой массы.

На географическом факультете МГУ определяли зольность, величину pH в суспензии на pH-метре «Эксперт-pH» в статических условиях, содержание органического углерода (C_{org}) – титриметрически с фенилантраниловой кислотой по И.В. Тюрину. Тяжелые металлы (ТМ) в почвах и растениях определяли в ВИМС им. Н.И. Федорова методами масс-спектрометрии и атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометрах «Agilent 7500cx» и «Elan-6100» соответственно.

Региональные геохимические особенности почв оценены путем сравнения валовых содержаний ТМ в почвах с кларками верхней части континентальной коры и наземных растений. Для выявления специфических черт состава растений вычислен коэффициент ОСВР (относительное содержание в видах растений) – отношение содержания ТМ в золе изучаемого вида к содержанию в золе эталонного – листьях липы в нашем случае. Перераспределение ТМ по органам оценено с помощью коэффициента ОСОР (относительное содержание в органах растений) – отношение содержания ТМ в изучаемом органе к содержанию элемента в крупных ветвях. Для оценки характера извлечения ТМ из почв растениями рассчитан коэффициент биологического поглощения A_x – отношение количества элемента в золе растений к его содержанию в почвообразую-

щей породе. Суммарная интенсивность вовлечения ТМ в биологический круговорот (БИК) оценена по показателю биогеохимической активности вида (БХА) – сумме $A_x > 1$.

Результаты и обсуждение. Все изученные почвы суглинистые, текстурно дифференцированы: содержат более 10% частиц размером <0,01 мм, элювиальный горизонт EL обогащен пылеватыми фракциями, а содержание ила максимально в текстурном горизонте BT и породе (рис. 2а), т. к. почвы развиваются на двучленных моренных карбонатных отложениях. Содержание илистой фракции повышено также в почвообразующих породах карельской тайги [Lukina et al., 2019]. Величина pH (см. рис. 2б) варьирует от сильнокислых значений в верхних горизонтах почв TASaq-ландшафта до щелочных в карбонатных почвообразующих породах, что соответствует разбросу значений в почвах ЦЛЗ [Маряхина и др., 2009]. Содержание C_{org} резко падает с глубиной (см. рис. 2в).

Элементный состав почв. Для почв катены характерны околосларковые содержания Mn, Pb и пониженные – Cu, Fe, Zn (кларк рассеяния, $KP=2$), Ni, Sr, Cr за счет развития на переотложенном ледниками субстрате в гумидном климате. Содержание ТМ укладывается в разброс среднего для дерново-подзолистых почв Евразии [Семенков и др., 2016] и пахотных почв северной части Европы, сформировавшихся на моренных и коренных породах Скандинавии [Reimann et al., 2018]. Содержание Cr, Cu, Fe, Ni, Sr находится на нижнем диапазоне разброса средних значений для дерново-подзолистых почв Евразии, Mn, Pb, Zn – на верхнем. Наименьшее значение наблюдается для Fe в гумусовом горизонте почв А и ТЭ-ландшафтов из-за высоких значений pH.

В горизонтах A0 и AY подзолистых и дерново-подзолистых почв А и ТЭ-ландшафтов содержание Pb (табл. 1, рис. 3) относительно почвообразующей породы повышено в три раза, Mn и Zn – в два раза, что согласуется с данными по почвам ЦЛЗ [Karavanova, Malinina, 2009]. Для Pb обнаружена положительная корреляционная зависимость с гумусом (0,68), а накопление Zn в верхних горизонтах почв объясняется устойчивостью его органоминеральных комплексов [Kabata-Pendias, 2011]. В горизонте EL понижено содержание Fe, Ni, Sr, Zn; в BT повышено содержание Cr, Ni, Cu, понижено – Sr, Mn.

В подстилке склоновых дерново-подзолистых почв относительно подзолистых почв междуречья повышено валовое содержание ТМ и понижено – в почвах TASaq-ландшафта, откуда металлы выносятся в более гидроморфных глеевых условиях. Минимальные различия между содержаниями на склоне и междуречье характерны для Cr, Ni, Cu, Zn, Mn.

Элементный состав растений. Важной характеристикой растений является элементный состав золы [Авессаломова, 2020]. В древесных видах зольность (табл. 2) максимальна в листьях вяза (10%) в А-ландшафте, минимальна – в хвое ели (3–4%). Зольность листьев липы увеличивается от А к

Таблица 1

Элементный состав почв южнотаежной катены, мг/кг

Ландшафт, горизонт, <i>n</i>		Mn	Fe, %	Zn	Sr	Cu	Ni	Cr	Pb
А	ао, 1	573	0,5	91	59	12	9	20	34
	EL, 2	1071	1,4	43	101	10	11	29	18
	BT, 3	756	1,6	66	90	21	22	47	16
	Cca, 1	510	1,3	58	108	17	20	41	13
ТЭ	ао, 2	1386	0,4	112	69	12	23	19	35
	EL, 2	693	1,1	39	92	8	10	37	14
	BT, 4	756	1,7	78	91	23	29	52	17
	Cca, 1	693	1,3	73	127	18	21	44	14
TASaq1	H, 1	69	0,9	29	29	10	7	17	33
	ELg, 1	151	0,4	25	80	6	6	27	16
	EL, ox, 1	252	0,6	25	101	6	7	28	13
	BC, 1	592	1,0	36	109	13	12	28	13
TASaq2	T, 1	391	1,1	39	98	13	14	32	13
	EL, 3	214	0,4	24	95	4	5	27	
	BTg, 4	498	1,3	46	112	20	21	35	15
	G, 2	693	1,6	55	96	20	24	46	15
Дерново-подзолистые почвы [Семенов и др., 2016]		10–2300	0,8–4,6	30–100	50–400	5–60	7–90	5–140	5–33
Кларк верхней части континентальной коры		774*	3,9*	67*	320*	27**	47*	92*	17*

n – число проб, * [Rudnick, Gao, 2003], **[Hu, Gao, 2008].

ТЭ-позиции, уменьшаясь с увеличением увлажненности. Среди растений нижнего яруса максимальна зольность хвоща (23%) в ТЭ-ландшафте и минимальна – орляка (7%) и сфагнома (4%), что сопоставимо с данными [Александрова и др., 1970]. Зольность кислицы варьирует в диапазоне 9–13%.

Изученные виды растений содержат околокларковые количества Cu, Zn, Ni (рис. 4). Ветки и кора деревьев обеднены Fe и Cr, сфагнум – Sr. Из-за высокой активности Mn [Kabata-Pendias, 2011] в сильно увлажненных кислых почвах ЦЛЗ поглощение Fe снижается.

Растения катены умеренно накапливают изученные ТМ (ОСВР=0,04–25) за исключением сфагнома – сильного концентратора Pb₅₅ (подстрочный индекс – значения ОСВР). В листьях липы концентрация Cr, Fe, Mn, Zn минимальна в полугидроморфных ландшафтах нижней части склона. Относительно нее в деревьях максимально число элементов с ОСВР>2,4 в хвое ели, которая в А и ТЭ-ландшафтах обогащена Pb и Mn, и листьях клена (Pb₃₋₈). С увеличением гидроморфизма при сохранении основных черт биогеохимической специализации оба вида относительно липы накапливают Zn₃₋₅ и клен – Mn. По

сравнению с широколиственными породами, фотосинтезирующие органы ели слабее накапливают Cu_{0,4-0,7}. В TASaq-ландшафте с увеличением увлажненности почв ель с приповерхностной корневой системой и минеральным питанием, зависящим от вещественного состава подстилки, слабее накапливает в хвое Cu_{0,4}, что связано с пониженным содержанием и доступностью металла в верхних горизонтах [Sukhareva, Lukina, 2014].

Большинство видов растений нижних ярусов, за исключением сфагнома, слабо накапливают Ni, Cu, Sr (ОСВР=0,02–0,4). Травы (особенно орляк) концентрируют Fe₁₋₆ и малоподвижный Cr₁₉. Сфагнум выделяется аккумуляцией ТМ с низкой биофильностью – Pb₅₅Cr₁₉Fe₆Cd₃Ni₂, что является его типичной особенностью благодаря большому количеству пор и водозапасающих клеток [Авессаломова, 2007; Market, et al., 2015].

Распределение ТМ зависит от их биологической активности и роли. В старых, малоактивных крупных ветках и коре концентрируются Zn, Cu, Pb (ОСВР=0,8–1,5), что отмечали ранее для Zn в ели и связано с малой подвижностью Pb в растениях и сродством Cu с материалом клеточных стенок дре-

Таблица 2

Элементный состав и зольность растений, мг/кг

Ландшафт и вид		Орган	Зольность, %	Mn	Fe	Zn	Sr	Cu	Ni	Cr	Pb
А	Ель	хвоя	3	1950	60	16	11	2,5	2	0,5	0,4
		ветки>5мм	1,1	627	11	35	11	5	1,4	0,3	0,3
		ветки<5мм	2	760	40	34	13	5,3	2,9	0,5	0,6
		кора	3,7	555	37	75	21	3,7	1,4	0,2	0,6
	Липа	листья	6,7	804	67	20	27	7,6	2,3	1,1	0,1
		ветки>10мм	4,4	396	44	33	55	4,8	3,5	0,8	1,1
		ветки<10мм	5,1	459	0	119	66	6,2	3,8	0,4	0,2
		кора	4,4	836	0	4	63	5,7	2,1	0,2	0,6
	Клен	листья	6,1	1586	61	40	24	5,1	1,8	0,2	0,1
		ветки	4	680	40	29	46	4,1	1,3	0,1	0,6
		кора	9,7	3977	0	65	90	11,6	2,5	56	1
	Кислица	л+с	12	600	240	27	26	7,1	1,1	0,6	0,2
	Орляк	л+с	8,9	623	445	30	14	8,4	4,1	5,2	0,4
ТЭ	Ель	хвоя	4,3	1462	43	30	19	2,5	1,3	0	0,2
		ветки>5мм	1,8	324	18	29	12	3,3	1	0	0,2
		ветки<5мм	2,4	864	48	58	27	5	2,5	0,6	1,1
		кора	3,9	507	0	79	18	4,2	1,1	0	0,3
	Липа сердцевидная	листья	7,4	592	74	25	29	9,3	1,6	0,5	0,1
		ветки>10мм	5,2	156	0	38	33	3	2,3	0,3	0,3
		ветки<10мм	5,7	171	0	63	45	4,4	1,8	0,2	0,3
		кора	6,8	544	0	2	56	3,6	1,4	0	0,1
	Клен	листья	5,5	1210	55	42	20	5,9	1	0,5	0,3
		ветки>1см	2,6	338	0	10	18	2,1	0,7	0,2	0,2
		кора	10,1	1616	0	30	94	5,1	2,1	0	0,2
	Орляк	л+с	7	560	140	49	11	8	1,7	0,9	0,1
	Кислица	л+с	12,7	508	127	30	20	8,8	1,1	0,3	0,3
TASaq1	Ель	хвоя	3,9	390	39	44	20	2,5	0,6	0,1	0,1
		ветки>5мм	1,6	128	16	32	15	3,8	0,5	0,1	0,4
		ветки<5мм	5,7	228	57	48	21	4,6	1	0,4	1
		кора	3,8	266	38	79	15	2	1,1	0,1	0,2
	Липа*	листья	7,2	216	72	18	13	7,6	1	0,4	0,1
		ветки>5мм	4,3	86	43	15	28	4,6	1,2	0,5	0,7
		кора	7,6	304	0	7	48	4,6	1,2	0,5	1,9
	Клен*	листья	5,1	663	51	32	12	3,5	0,8	0,2	0,1
TASaq2	Ель	хвоя	3,4	510	34	19	10	2	0,8	0,1	0,2
		ветки>5мм	1,8	144	18	30	7,6	3,9	0,7	0,2	0,6
		ветки<5мм	1,7	187	68	31	9,5	5	1,2	0,5	1,6
		кора	6,1	305	0	83	8,8	2,1	0,9	0,2	0,2
	Липа*	листья	6,2	558	124	13	22	8,7	1,4	0,2	0,1
		ветки	6,9	69	0	28	29	5,2	1,1	0,3	0,3
	Клен*	листья	4,1	1804	41	28	13	5,5	1,2	0,1	0,1
	Орляк	л+с	6,8	272	136	21	9,5	6,4	1,6	1	0,1
	Кислица	л+с	9,4	846	94	23	22	4,9	1	0,3	0,2
	Сфагнум	л+с	4	600	400	49	0,8	4,8	2	2,8	3,7
Кларк наземных растений [Market et al., 2015]				200	150	50	50	10	1,5	1,5	1

Примечание: л+с – листья и стебли, * – подрост.

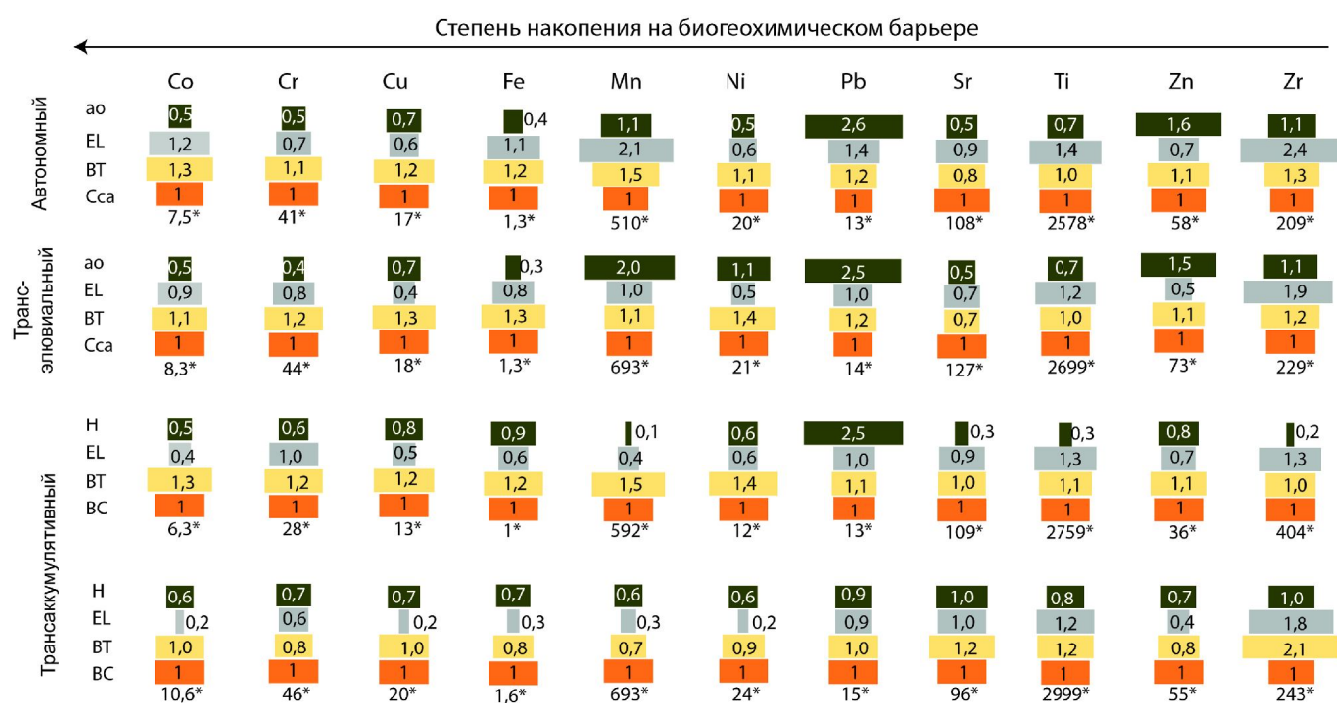


Рис. 3. Радиальная дифференциация содержания ТМ в почвах. * – значения, принятые за 1, мг/кг

Fig. 3. Radial differentiation of heavy metals content in soils. * – values taken as 1 (mg/kg)

весины [Авессаломова, 2007; Kabata-Pendias, 2011; Gandois, Probst, 2012; Железнова, 2017]. Участвующий в фотосинтезе Mn [Kabata-Pendias, 2011] накапливают (ОСОР=1–8) вегетативные органы растений ЦЛЗ.

Поглощение элементов растениями. В южнотаежной катене дерева интенсивнее трав концентрируют ТМ (табл. 3), особенно Mn и Zn ($A_x > 73$; далее – подстрочным знаком), которые в тайге относят к элементам интенсивного накопления [Авессаломова, 2007, 2020]. Высокая подвижность в почвах Zn и его активное поглощение растениями отмечали ранее [Huang et al., 2011; Kabata-Pendias, 2011]. Широколиственные клен и дуб содержат больше Mn. Мелколиственные осина, береза, липа избирательно аккумулируют Zn [Железнова и др., 2017]. Высокое содержание биофильных ТМ в листьях деревьев – преобладающей части опада [Базилевич, Титлянова, 2007] – определяет поверхностно-аккумулятивное распределение в почвах. Поступающие с опадом легкодоступные органоминеральные соединения и образующиеся при разложении кислоты повышают подвижность ТМ в почве: в ельниках разложение опада обогащает почву питательными веществами вблизи деревьев больше, чем на удалении [Bade et al., 2015]. А-горизонты почв таежных ландшафтов обогащены доступными для растений соединениями ТМ [Семенков и др., 2019].

К ТМ среднего накопления во всех изученных ландшафтах отнесены Ni, Sr Cu. В подчиненном ландшафте Ni₄₋₁₈ активнее извлекается из почв, т. к. повышение pH ингибирует поглощение металла

[Kabata-Pendias, 2011]. В ветках и коре деревьев концентрируются Sr_{>30}, в листьях липы и травах – Cu₆₋₄₆, что ранее описано для тайги центра Восточно-Европейской равнины и Канады [Железнова и др., 2017; Watmough, 2014]. В ветках ели наблюдаемый разброс значений A_x для Cu₁₉₋₄₆, вероятно, обусловлен различным возрастом деревьев [Kabata-Pendias, 2011]. В ЦЛЗ при высокой межвидовой вариабельности слабее вовлекаются в БИК Cr_{0-0,7} и Fe_{0,01-0,7}. Так, травы активнее деревьев поглощают Fe.

В листьях деревьев (липы, клена) А и ТЭ-ландшафтов интенсивнее всего накапливается участвующая во многих физиологических процессах Cu₅₋₁₂. В ветках и коре задерживается выполняющий скелетные функции Sr₁₆₋₂₁ (см. табл. 3). В хвое ели содержится много Mn₁₂₋₂₄, т. к. он не связывается с нерастворимыми органическими соединениями и легко переносится в растениях [Peng et al., 2008]. В ветках накапливаются относительно малоподвижные Cu₁₉₋₄₆, в коре – Zn₁₈₋₂₄. Произрастающий в А-ландшафте вяз слабо накапливает Mn и Zn, поглощению которых, вероятно, препятствует высокое содержание Cu в растении [Kabata-Pendias, 2011].

В травах и кустарниках А и ТЭ-ландшафтов на первом месте в ряду биологического поглощения стоит Cu₆₋₁₉, играющая важную физиологическую роль. Высокое поглощение Cu объясняется синергизмом с подвижным Mn [Kabata-Pendias, 2011]. У большинства растений ТАСа-ландшафта в ряду биологического поглощения первым стоит Mn, который при пониженном содержании в почве может

Таблица 3

Поглощение металлов растениями

Ланд-шафт	Ярус	Вид	Орган	Ряды биологического поглощения по значениям Ах						БХА
				Интенсивного и среднего накопления		Слабого накопления и сильного захвата		Среднего и (очень) слабого захвата		
				30	10	1	0,1	0,01		
А	Д	Ель обыкновенная	хвоя	—	Mn ₂₄	CuNi ₈ SrZn ₆	Cr ₁	Pb _{0,7} Fe _{0,2}	—	53
			ветки	Cu ₄₀ Zn ₃₂	Mn ₂₀ Sr ₁₆ Ni ₁₄	CrPb ₁	Fe _{0,2}	—	—	125
			кора	—	Zn ₂₄ CuSr ₁₀	Mn ₆ Ni ₅ Pb ₁	Cr _{0,4} Fe _{0,1}	—	—	56
		Липа сердцевидная	листья	—	Cu ₁₂	Sr ₇ Mn ₇ Ni ₄ Zn ₃	Cr ₁ Fe _{0,2}	Pb _{0,1}	—	31
			ветки	—	Sr ₁₉ Cu ₁₀	Ni ₈ Zn ₇ Mn ₃	Pb,Cr ₁	Fe _{0,1}	—	49
			кора	—	Sr ₂₁ Cu ₁₂	Mn ₆ Ni ₅	Zn _{0,8} Pb _{0,7} Cr _{0,2}	Fe _{0,1}	—	46
		Клен остролистный	листья	—	Mn ₁₀	Cu ₈ ZnSr ₇ Ni ₄	Cr _{0,3}	FePb _{0,1}	—	35
			ветки	—	Sr ₁₉ Cu ₁₀	Zn ₈ Mn ₇ Ni ₄	Pb _{0,8} Cr _{0,2}	Fe _{0,1}	—	48
			кора	Cr ₃₆	SrMn ₁₆ Cu ₁₂	Zn ₈ Ni ₃	Pb _{0,6}	Fe _{0,1}	—	91
		Вяз шершавый	листья	—	—	Cu ₅ Sr ₅ Ni ₂	Zn _{0,9} Mn _{0,4}	CrFePb _{0,1}	—	14
			ветки	—	Sr ₁₆ Cu ₁₀	Ni ₄ Zn ₃	Pb _{0,6} Mn,Cr _{0,3}	Fe _{0,1}	—	34
			кора	Sr ₃₀	Cu ₁₁	Ni ₄	Zn _{0,7} Mn _{0,3} Pb _{0,2}	—	FeCr	45
	т-к	Кислица обыкновенная		—	—	Cu ₆ Sr ₄ Zn ₂ Mn ₂	Ni ₁ Cr _{0,3} Fe _{0,2}	Pb _{0,1}	—	15
		Орляк обыкновенный		—	—	Cu ₉ Ni ₅ ZnCr ₄ SrMn ₃	Fe _{0,7} Pb _{0,3}	—	—	28
ТЭ	Д	Ель обыкновенная	хвоя	—	Mn ₁₂	SrZn ₆ Cu ₅ Ni ₃	Pb _{0,2}	Fe _{0,1}	Cr	32
			ветки	—	Cu ₁₉ Zn ₁₆ Sr ₁₁	Mn ₈ Ni ₆	Pb _{0,5}	Fe _{0,1}	Cr	60
			кора	—	Zn ₁₈ Cu ₁₀	Sr ₇ Mn ₅ Ni ₃	Pb _{0,3}	—	FeCr	45
		Липа сердцевидная	листья	—	Cu ₁₁	Sr ₅ Zn,Mn ₃ Ni ₂	Cr _{0,4} Fe _{0,1}	Pb _{0,02}	—	25
			ветки	—	—	Sr ₉ Zn ₆ Cu ₅ Ni ₄	Mn ₁ Cr _{0,3} Pb _{0,2}	—	Fe _{0,003}	25
			кора	—	Sr ₁₂	Cu ₅ Mn ₃ Ni ₂	Zn _{0,3}	Pb _{0,1}	FeCr	23
		Клен остролистный	листья	—	Cu ₁₁	Mn ₉ Zn ₇ Sr ₆ Ni ₂	Cr _{0,6} Pb _{0,2}	Fe _{0,1}	—	36
			ветки	—	Sr ₁₁	Cu ₉ Mn ₆ Zn ₄ Ni ₃	Cr _{0,5} Pb _{0,3}	Fe _{0,01}	—	34
			кора	—	Sr ₁₃	Mn ₆ Cu ₄ Zn ₃ Ni ₂	—	Pb _{0,1}	Fe Cr	28
	т-к	Кислица обыкновенная		—	—	Cu ₇ SrZnMn ₂	Ni ₁	CrFe Pb _{0,1}	—	14
		Орляк обыкновенный		—	Cu ₁₀	Zn ₆ Mn,Ni ₃ Sr ₂	Cr _{0,7} Fe _{0,2}	Pb _{0,1}	—	26
	TASaq	Д	Ель обыкновенная	хвоя	Mn ₈₆	Zn ₁₃	Cu ₇ Sr,Ni ₅	Cr _{0,5} Pb _{0,4} Fe _{0,3}	—	—
ветки				Mn ₆₆ Zn ₄₉ Cu ₃₄	Ni ₁₁	Sr ₉ Pb ₂	Cr ₁ Fe _{0,3}	—	—	167
кора				Mn ₃₅ Zn ₃₄	—	Cu ₅ NiSr ₃	Cr _{0,5} Pb _{0,2}	Fe _{0,1}	—	80
Липа сердцевидная			листья	Mn ₅₅	Cu ₁₉	Sr ₇ Zn,Ni ₅	Cr _{0,5} Fe _{0,4}	Pb _{0,1}	—	92
			ветки	—	Cu ₁₁ Zn ₁₀	Sr ₈ Mn ₇ Ni ₄	Cr _{0,5} Pb _{0,2}	Fe _{0,1}	—	41
			Клен остролистный	листья	Mn ₂₆	Sr ₁₃	Cu ₉ Ni ₄ Zn ₃ Pb ₂	Cr _{0,8}	Fe _{0,1}	—
Ива козья			листья	Zn ₃₆	Cu ₂₇ Mn ₁₁ Sr ₁₀	Ni ₅	Fe _{0,3}	Pb _{0,1}	Cr	90
			ветки	Zn ₄₄	Sr ₁₀	Cu ₉ Mn ₇ Ni ₆	Cr ₁ Pb _{0,4}	Fe _{0,1}	—	78
			кора	Zn ₇₃	Sr ₁₄	Cu,Mn ₉ Ni ₆	Pb ₁ Cr _{0,5}	Fe _{0,1}	—	112
т-к		Кислица обыкновенная		Mn ₅₆	—	Cu ₇ Zn ₆ Sr ₄ Ni	Cr _{0,3} Fe _{0,2}	Pb _{0,1}	—	76
		Орляк обыкновенный		—	Mn ₂₅ Cu ₁₃	Zn ₈ Ni ₅ Sr ₃	Cr Fe _{0,4}	Pb _{0,1}	—	57
		Сфагнум		Mn ₉₄ Zn ₃₀	Cu ₁₆ Ni ₁₂ Cr ₁₀	Sr ₈ Pb ₆ Fe ₂	—	—	—	179

Д – древесный, т-к – травяно-кустарниковый. Полужирный – значения БХА>50

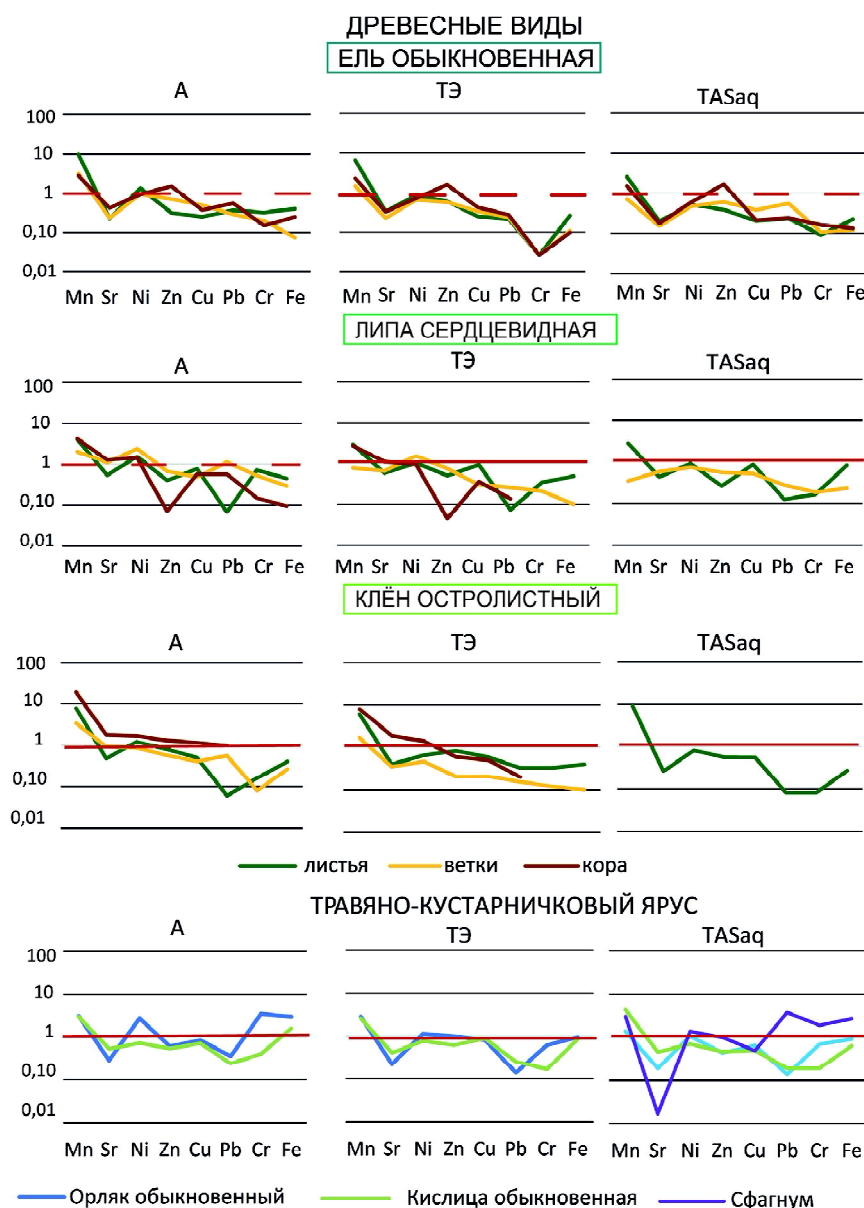


Рис. 4. Геохимические спектры элементного состава растений катены (КК) относительно кларков живого вещества [Market et al., 2015]

Fig. 4. Geochemical spectra for plants in the studied catena: the content of elements in catena plants (KK) is normalized to clarkes of living matter [Market, Franzle, 2015]

задерживаться в старых органах [Watmough et al., 2007]. Кроме того, в кислых почвах с высоким содержанием органического вещества повышается его доступность [Kabata-Pendias, 2011]. Ах максимален в вегетативных органах бореальных растений: хвое ели (Mn_{86}) и сфагнуме (Mn_{94}). Исключение составляет ива, все органы которой интенсивно накапливают подвижный Zn_{36-73} , вероятно, благодаря видовым особенностям, что отмечали ранее на пойме Иртыша [Макарова, 2009].

В изученных растениях ЦТЗ БХА варьирует в пределах 14–186 с наибольшим вкладом Mn, Cu, Sr, Zn, Ni. В фотосинтетически активных органах БХА максимальна у ели (33–120), липы (25–94), ивы (94), сфагнума (186), минимальна – у вяза (14) и клена (35–58). Все изученные виды трав (представи-

тели семейств Гиполеписовые, Кисличные и Сфагновые) биогеохимически наиболее активны в TАСаg-ландшафте, где в глеевой обстановке повышена подвижность многих металлов, особенно Fe, Zn, Mn. Ландшафтно-геохимические условия влияют минимально на БХА клена (35–58) с минимальной вариабельностью химического состава зеленой фитомассы.

Выводы:

– почвы катены содержат околочларковые уровни Mn, Pb, Ti, Zr, пониженные – Co, Cu, Fe, Zn, Ni, Sr, Cr. А-горизонты всех изученных почв относительно почвообразующей породы обогащены Pb, Mn, Zn. В горизонте EL понижено содержание Fe, Ni, Sr, Zn. В органогенных горизонтах почв ТЭ-ландшафта валовое содержание металлов повышено, а TАСаg –

понижено при минимальной вариабельности Cr, Ni, Cu, Zn, Mn;

– фотосинтетические органы большинства деревьев (липа, клен, вяз, ель) ЦЛЗ накапливают Mn, Zn, Cu. Травы и кустарники относительно деревьев концентрируют ТМ с низкой биофильностью (Fe и реже Cr). Низкозольный сфагнум умеренно концентрирует широкий спектр ТМ с относительно низкой биофильностью – Fe, Cr, и Pb. В распределении ТМ по надземным органам деревьев прослеживаются разные пути накопления: в широколиственных листве и клене сильнее концентрация в фотосинтезирующих органах, а в хвойных (ели) – в ветках и коре;

– в лесных ландшафтах ЦЛЗ катенарная биогеохимическая дифференциация проявляется в снижении концентрации ТМ в растениях по мере усиления гидроморфизма: в листьях липы – Cr, Fe, Mn, Zn, Cu, в хвое ели – Pb, Mn из-за обеднения верхних горизонтов почв многими металлами. Ландшафтно-геохимические условия наиболее существенно влияют на содержание в растениях Mn, Ni, Fe и минимально – Zn, Sr, Cu;

– фотосинтетические органы большинства деревьев (липа, клен, вяз, ель) ЦЛЗ накапливают Mn, Zn, Cu. Травы и кустарники относительно деревьев концентрируют ТМ с низкой биофильностью (Fe и реже Cr). Низкозольный сфагнум умеренно концентрирует широкий спектр ТМ с относительно низкой биофильностью – Fe, Cr, и Pb. В распределении ТМ по надземным органам деревьев прослеживаются разные пути накопления: в широко-

лиственных листве и клене сильнее концентрация в фотосинтезирующих органах, а в хвойных (ели) – в ветках и коре;

– в лесных ландшафтах ЦЛЗ катенарная биогеохимическая дифференциация проявляется в снижении концентрации ТМ в растениях по мере усиления гидроморфизма: в листьях липы – Cr, Fe, Mn, Zn, Cu, в хвое ели – Pb, Mn из-за обеднения верхних горизонтов почв многими металлами. Ландшафтно-геохимические условия наиболее существенно влияют на содержание в растениях Mn, Ni, Fe и минимально – Zn, Sr, Cu;

– в БИК наиболее активно вовлекаются Mn, Zn, Cu, Sr. В TASAq-ландшафте катены повышенная кислотность и увлажненность почв увеличивают поглощение растениями катионогенного Mn. В А и ТЭ-ландшафтах БХА фотосинтезирующих органов уменьшается в ряду: ель ($A_x > 10$) > клен, рябина, лещина ($A_x = 5-10$) > орляк, кислица, вяз ($A_x < 5$). БХА растений южнотаежной катены определяют преимущественно первые три элемента из ряда биологического поглощения: у вяза в А-ландшафте – Cu, Sr, Ni (88–97%); в коре липы в А и ТЭ-ландшафтах – Cu, Sr, Mn (85–88) – при минимальной роли у трав (65–76%) и листьев деревьев (70–73%) А-ландшафта, что говорит о более равномерном распределении ТМ в органах растений верхних звеньев катены. В TASAq-ландшафте обладающие высокой биогеохимической активностью Mn, Cu, Sr, Zn в большей мере определяют и БХА (79–91%) фотосинтетически активных органов деревьев.

Благодарности. Полевые работы выполнены в рамках проекта №04/2018/РГО-РФФИ. Результаты обобщены в рамках проекта РНФ № 19-77-30004. Авторы благодарны Н.С. Касимову за помощь в интерпретации данных и обсуждение результатов, а также сотрудникам ИПЭЭ РАН имени А.Н. Северцова: Р.Б. Сандлерскому и Ю.Г. Пузаченко за содействие в полевых работах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авессаломова И.А. Биогеохимия ландшафтов. М.: Географический факультет МГУ, 2007. 163 с.

Авессаломова И.А. Биогеохимическая специализация растений полесских ландшафтов Озерной Мещеры // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2020. № 5. С. 63–72.

Александрова Л.М., Люжин М.Ф., Аршавская В.Ф. Гумусовые вещества почвы (их образование, состав, свойства и значение в почвообразовании и плодородии) // Записки Ленингр. с.-х. ин-та. Ленинград, Пушкин, 1970. Т. 142. 233 с.

Базилевич Н.И., Титлянова А.А. Биокруговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах. Новосибирск: Наука, 2007. 381 с.

Железнова О.С., Черных Н.А., Тобратов С.А. Цинк и кадмий в фитомассе древесных растений лесных экосистем: закономерности транслокации, аккумуляции и барьерных механизмов // Вестн. РУДН. Сер.: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2017. Т. 25. № 2. С. 253–270. DOI: 10.22363/2313-2310-2017-25-2-253-270.

Исаченкова Л.Б., Гарзаева М.В. Сравнительная биогеохимическая характеристика лесных экосистем // Экосистемы широколиственно-хвойных лесов южного Подмосковья. М.: Географический факультет МГУ, 2006. С. 84–97.

Караванова Е.И., Белянина Л.А., Шапиро А.Д., Степанова А.А. Влияние подстилок на подвижность соединений Zn, Cu, Mn, Fe в верхних горизонтах подзолистых почв // Почвоведение. 2006. № 1. С. 43–51.

Касимов Н.С., Лычагин М.Ю., Чалов С.Р., Шинкарева Г.Л. Парагенетические ассоциации химических элементов в ландшафтах // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2019. № 6. С. 20–28.

Макарова О.А. Экологическая оценка содержания тяжелых металлов в системе вода–почва–растение в приустьевой части поймы реки Иртыш: дис. ... канд. биол. наук. Омск, 2009. 113 с.

Маряхина Н.Н., Максимова Ю.Г., Толмешта И.И., Соколова Т.А. Химико-минералогическая характеристика подзолистых почв Центрального Лесного заповедника в местах распространения карстовых образований // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2009. № 3. С. 25–31.

Никонов В.В., Лукина Н.В., Безель В.С., Бельский Е.А., Беспалова А.Ю., Головченко А.В., Горбачева Т.Т., Добровольская Т.Г., Добровольски В.В., Зукерт Н.В., Исаева Л.Г., Лапенис А.Г., Максимова И.А., Марфенина О.Е., Паникова А.Н., Пинский Д.Л., Полянская Л.М., Стайнес Е., Уткин А.И.,

Фронтасьева М.В., Цибульский В.В., Чернов И.Ю., Яценко-Хмелевская М.А. Рассеянные элементы в бореальных лесах. М.: Наука, 2004. 616 с.

Пузаченко Ю.Г., Козлов Д.Н. Геоморфологическое развитие территории Центрально-Лесного заповедника // Труды Центрально-Лесного заповедника. 2007. Вып. 4. С. 125–159.

Семенков И.Н., Терская Е.В., Касимов Н.С. Поведение форм металлов в зональных почвенно-геохимических катенах // Геохимия ландшафтов. К 100-летию со дня рождения Александра Ильича Перельмана. М.: АПР, 2016. С. 97–144.

Семенков И.Н., Терская Е.В., Касимов Н.С. Латеральная дифференциация форм соединений металлов в почвенных суглинистых катенах центра Западно-Сибирской равнины // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2019. № 3. С. 25–37.

Смирнова О.В., Заугольнова Л.Б., Евстигнеев О.И., Коротков В.Н., Ханина Л.Г. Сукцессионные процессы в заповедниках России и проблемы сохранения биологического разнообразия. СПб.: Российское ботаническое общество, 1999. 549 с.

Терехина Н.В. Методические указания к проведению фитогеохимических исследований. СПб.: Издательский центр «Академия», 2010. 25 с.

Bade C., Jacob M., Leuschner C., Hauck M. Chemical properties of decaying wood in an old-growth spruce forest and effects on soil chemistry. *Biogeochemistry*, 2015, vol. 122, p. 1–13. DOI: 10.1007/s10533-014-0015-x.

Gandois L., Probst A. Localisation and mobility of trace metal in silver fir needles. *Chemosphere*, 2012, vol. 87, p. 204–210. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2011.12.020.

Herndon E., Yarger B., Frederick H., Singer D. Iron and Manganese Biogeochemistry in Forested Coal Mine Spoil. *Soil systems*, 2019, vol. 3, no. 1, p. 13. DOI: 10.3390/soilsystems3010013.

Hu Z., Gao S. Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update. *Chemical Geology*, 2008, vol. 253, no. 3–4, p. 205–221. DOI: 10.1016/J.CHEMGEO.2008.05.010.

Huang J.-H., Ilgen G., Matzner E. Fluxes and budgets of Cd, Zn, Cu, Cr and Ni in a remote forested catchment in Germany. *Biogeochemistry*, 2011, vol. 103, no. 1–3, p. 59–70. DOI: 10.1007/s10533-010-9447-0.

Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants, Fourth Edition, CRC Press, 2011. 548 p.

Karavanova E.I., Malinina M.S. Spatial Differentiation of the Chemical Composition of Solid and Liquid Phases in the Main Soil Types of the Central Forest State Natural Biospheric Reserve. *Eurasian Soil Science*, 2009, vol. 42, no. 7, p. 725–737. DOI: 10.1134/S1064229309070035.

Lukina N.V., Orlova M.A., Bakhmet O.N., Tikhonova E.V., Tebenkova D.N., Kasakova A.I., Gornov A.V., Smirnov V.E., Knyazeva S.V., Bakhmet O.N., Kryshen A.M., Shashkov M.P.,

Ershov V.V. The Influence of Vegetation on the Forest Soil Properties in the Republic of Karelia. *Eurasian Soil Science*, 2019, vol. 52, no. 7, p. 793–807. DOI: 10.1134/S1064229319050077

Market B., Franzle S., Wunschmann S. Chemical evolution and the biological system of the elements. Heidelberg: Springer, 2015, 282 p.

Peng K.J., Luo C.L., You W.X. Manganese uptake and interactions with cadmium in the hyperaccumulator – *Phytolacca americana* L. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, vol. 154, no. 1–3, p. 674–681. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.10.080.

Puzachenko Y., Sandlersky R., Sankovski A. Methods of Evaluating Thermodynamic Properties of Landscape Cover Using Multispectral Reflected Radiation Measurements by the Landsat Satellite. *Entropy*, 2013, vol. 15, no. 9, p. 3970–3982. DOI: 10.3390/e15093970.

Reimann C., Fabian K., Birke M., Filzmoser P., Demetriades A., Négrel P., Oorts K., Matschullat J., de Caritat P., Albanese S., Anderson M., Baritz R., Batista M.J., Bel-Ian A., Cicchella D., De Vivo B., De Vos W., Dinelli E., Đuriš M., Dusza-Dobek A., Eggen O.A., Eklund M., Ersten V., Flight D.M.A., Forrester S., Fügedi U., Gilucis A., Gosar M., Gregorauskiene V., De Groot W., Gulan A., Halamić J., Haslinger E., Hayoz P., Hoogewerff J., Hrvatovic H., Husnjak S., Jähne-Klingberg F., Janik L., Jordan G., Kaminari M., Kirby J., Klos V., Kwečko P., Kuti L., Ladenberger A., Lima A., Locutura J., Lucivjansky P., Mann A., Mackovych D., McLaughlin M., Malyuk B.I., Maquil R., Meuli R.G., Mol G., O'Connor P., Ottesen R.T., Pasieczna A., Petersell V., Pfeleiderer S., Poňavič M., Prazeres C., Radusinović S., Rauch U., Salpeteur I., Scanlon R., Schedl A., Scheib A., Schoeters I., Šefčík P., Sellersjö E., Slaninka I., Soriano-Disla J.M., Šorša A., Svrkota R., Stafilov T., Tarvainen T., Tendavilov V., Valera P., Verougstraete V., Vidojević D., Zissimos A., Zomeni Z., Sadeghi M. GEMAS: Establishing geochemical background and threshold for 53 chemical elements in European agricultural soil. *Applied Geochemistry*, 2018, vol. 88, p. 302–318. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2017.01.021.

Rudnick R.L., Gao S. Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*, 2003, vol. 3, p. 1–64. DOI: 10.1016/B0-08-043751-6/03016-4.

Sukhareva T.A., Lukina N.V. Mineral composition of assimilative organs of conifers after reduction of atmospheric pollution in the Kola Peninsula. *Russian Journal of Ecology*, 2014, vol. 45, no. 2, p. 95–102. DOI: 10.1134/S1067413614020088.

Watmough S.A., Eimers M.C., Dillon P.J. Manganese cycling in central Ontario forest: Response to soil acidification. *Applied Geochemistry*, 2007, vol. 22, no. 6, p. 1241–1247. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2007.03.039.

Watmough S.A. Calcium, strontium and barium biogeochemistry in a forested catchment and insight into elemental discrimination. *Biogeochemistry*, 2014, vol. 118, p. 357–369. DOI: 10.1007/s10533-013-9938-x.

Поступила в редакцию 18.02.2020

После доработки 22.05.2020

Принята к публикации 06.08.2020

P.R. Enchilik¹, I.N. Semenov², E.N. Aseeva³,
O.A. Samonova⁴, A.D. Iovcheva⁵, E.V. Terskaya⁶

CATENARY BIOGEOCHEMICAL DIFFERENTIATION IN THE SOUTHERN TAIGA LANDSCAPES (CENTRAL FOREST RESERVE, TVER OBLAST)

A landscape-geochemical catena with Albic Retisols (Loamic) under coniferous-deciduous forest on loess-like loams underlain by carbonate moraine deposits located in the southern part of the Central Forest Reserve on a gentle interfluvial slope was studied to evaluate the migration of trace elements in the soil–plant system. Biogeochemical differentiation of landscapes was analyzed basing on Mn, Fe, Zn, Sr, Cu, Ni, Cr and Pb concentrations in parent rocks, soils and plants. Soils of the catenas have near-Clarke content of Mn and Pb and lower content of Cu, Fe, Zn, Ni, Sr and Cr. In the upper part of the catena, A and O-horizons are enriched in Pb, Mn and Zn. E-horizon is depleted in Fe, Ni, Sr and Zn. B-horizon has a higher content of Cr, Ni and Cu and a lower content of Sr and Mn. Ash proportions in studied coniferous and broadleaved species of coniferous-deciduous forests are 1–4 and 1–8% respectively, while it is 3–12% for the above-ground parts of grasses. The studied plant species contain near-Clarke amounts of Cu, Zn and Ni. Branches and bark of woody plants are depleted in Fe and Cr, while sphagnum has lower content of Sr. Within the lower part of catena Fe content in plants decreases and this of Mn increases. Within the upper part of catena where plant leaves and needles accumulate Mn, Cu, Sr and Zn more actively than within its lower part, the element concentrations in plant organs differ slightly. Spatial differentiation of the total content decreases from Mn, Ni and Fe to Zn, Sr and Cu. Trees are the most active in the uptake and turnover of biophilic Mn and Zn while sphagnum and grasses mostly accumulate Fe, Cr and Pb. At the catena (toe)slope grass-shrub plants and tree leaves accumulate Cu. In the landscapes of the upper part of catena metals show more even distribution compared to the lower part where photosynthetic organs of plants accumulate Mn, Cu, Sr and Zn. Concentrations of Mn, Ni and Fe show the highest differentiation along the catena, while Zn, Sr and Cu are evenly distributed. Needles of *Picea abies* most intensively accumulate Mn in all landscapes (especially in hydromorphic). The photosynthetic organs of *Picea abies*, *Tilia cordata*, *Salix caprea* and *Sphagnum* have the greatest biogeochemical activity with the main contribution of Mn, Cu, Sr, Zn and Ni. The lowest biogeochemical activity is characteristic of *Acer platanoides* and *Ulmus glabra*.

Key words: coniferous-deciduous forests, heavy metals, mobile fractions, biogeochemical specialization, biological absorption, Valdai Upland, potentially toxic elements

Acknowledgements. Field works were financially supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Russian Geographical Society (project no. 04/2018/РГО-РФФИ). Synthesis of the results was financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 19-77-30004). The authors are grateful to Academician N.S. Kasimov for his assistance in data interpretation and discussion of the results, and to R.B. Sandlersky and Yu.G. Puzachenko from the Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, for their participation in field works.

REFERENCES

- Aleksandrova L.M., Lyuzhin M.F., Arshavskaya V.F. *Gumusovye veshchestva pochvy (ih obrazovanie, sostav, svoystva i znachenie v pochvoobrazovanii i plodorodii)* [Humic substances of the soil (their formation, composition, properties and significance for soil formation and fertility)], Zapiski Leningr. s-h. in-ta, 1970, vol. 142, 233 p. (In Russian)
- Avessalomova I.A. *Biogeoхимия ландшафтов* [Biogeochemistry of landscapes], Moscow, MSU Faculty of Geography Publ., 2007, 163 p. (In Russian)
- Avessalomova I.A. *Biogeoхимическая специализация растений полевских ландшафтов Озерной Мещеры* [Biogeochemical specialization of plants in Polesye landscapes of the Meschera Lakeland]. *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2020, no. 5, p. 63–72.
- Bade C., Jacob M., Leuschner C., Hauck M. Chemical properties of decaying wood in an old-growth spruce forest and effects on soil chemistry, *Biogeochemistry*, 2015, vol. 122, p. 1–13. DOI: 10.1007/s10533-014-0015-x.
- Bazilevich N.I., Titlyanova A.A. *Bioticheskiy krugovorot na pjati kontinentah: azot i zol'nye elementy v prirodnyh nazemnyh ekosistemah* [Biotic cycle on five continents: nitrogen and ash elements in natural terrestrial ecosystems], Novosibirsk, Nauka Publ., 2007, 381 p. (In Russian)

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, PhD student; e-mail: polimail@inbox.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: semenkov@geogr.msu.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: aseyeva@mail.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Leading Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: oasamonova@mail.ru

⁵ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Technician, graduate student; e-mail: y_nasta@mail.ru

⁶ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Scientific Researcher; e-mail: Elena_terskaya@mail.ru

- Gandois L., Probst A. Localisation and mobility of trace metal in silver fir needles, *Chemosphere*, 2012, vol. 87, p. 204–210. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2011.12.020.
- Herndon E., Yarger B., Frederick H., Singer D. Iron and Manganese Biogeochemistry in Forested Coal Mine Spoil, *Soil systems*, 2019, vol. 3, no. 1, p. 13. DOI: 10.3390/soilsystems 3010013.
- Hu Z., Gao S. Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update, *Chemical Geology*, 2008, vol. 253, no. 3–4, p. 205–221. DOI: 10.1016/J.CHEMGEO.2008.05.010.
- Huang J.-H., Ilgen G., Matzner E. Fluxes and budgets of Cd, Zn, Cu, Cr and Ni in a remote forested catchment in Germany, *Biogeochemistry*, 2011, vol. 103, no. 1–3, p. 59–70. DOI: 10.1007/s10533-010-9447-0.
- Isachenkova L.B., Tarzaeva M.V. [Comparative biogeochemical characteristics of forest ecosystems], *Ekosistemy shirokolistvenno-hvojnyh lesov juzhnogo Podmoskov'ja* [Ecosystems of broadleaved-coniferous forests in the southern part of the Moscow region]. Moscow, MSU Faculty of Geography Publ., 2006, p. 84–97. (In Russian)
- Kabata-Pendias A. *Trace Elements in Soils and Plants*. CRC Press, 2011, 548 p.
- Karavanova E.I., Belyanina L.A., Shapiro A.D., Stepanov A.A. Effect of litters on the mobility of zinc, copper, manganese, and iron in the upper horizons of podzolic soils. *Eurasian Soil Science*, 2006, vol. 39, no. 1, p. 35–43. DOI: 10.1134/S1064229309070035.
- Karavanova E.I., Malinina M.S. Spatial Differentiation of the Chemical Composition of Solid and Liquid Phases in the Main Soil Types of the Central Forest State Natural Biospheric Reserve, *Eurasian Soil Science*, 2009, vol. 42, no. 7, p. 725–737.
- Kasimov N.S., Lychagin M.Ju., Chalov S.R., Shinkareva G.L. Parageneticheskie assotsiatsii himicheskikh elementov v landshaftah [Paragenetic associations of chemical elements in landscapes]. *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2019, no. 6, p. 20–28. (In Russian)
- Lukina N.V., Orlova M.A., Bakhmet O.N., Tikhonova E.V., Tebenkova D.N., Kasakova A.I., Gornov A.V., Smirnov V.E., Knyazeva S.V., Bakhmet O.N., Kryshen A.M., Shashkov M.P., Ershov V.V. The Influence of Vegetation on the Forest Soil Properties in the Republic of Karelia, *Eurasian Soil Science*, 2019, vol. 52, no. 7, p. 793–807. DOI: 10.1134/S1064229319050077.
- Makarova O.A. *Ekologicheskaja ocenka sodержaniya tjazhelyh metallov v sisteme voda-pochva-rastenie v prirusslovoj chasti pojmy reki Irtysh* [Environmental assessment of heavy metals content in the water-soil-plant system in the near-river part of the Irtysh River floodplain], PhD Thesis in Biology. Omsk, Om. gos. ped. un-t Publ., 2009, 113 p. (In Russian)
- Market B., Franzle S., Wunschmann S. *Chemical evolution and the biological system of the elements*. Heidelberg, Springer, 2015, 282 p.
- Nikonov V.V., Lukina N.V., Bezel' V.S., Bel'skij E.A., Bespalova A.Yu., Golovchenko A.V., Gorbacheva T.T., Dobrovol'skaya T.G., Dobrovol'skij V.V., Zukert N.V., Isaeva L.G., Lapenis A.G., Maksimova I.A., Marfenina O.E., Panikova A.N., Pinskij D.L., Polyanskaya L.M., Stajnes E., Utkin A.I., Frontas'eva M.V., Cibul'skij V.V., Chernov I.Yu., Yacenko-Hmelevskaya M.A. *Rassejannye elementy v boreal'nyh lesah* [Trace elements in boreal forests], Moscow, Nauka Publ., 2004, 616 p.
- Peng K.J., Luo C.L., You W.X. Manganese uptake and interactions with cadmium in the hyperaccumulator – *Phytolacca americana* L. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, vol. 154, no. 1–3, p. 674–681. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.10.080.
- Puzachenko Yu.G., Kozlov D.N. Geomorfologicheskoe razvitiye territorii Central'no-Lesnogo zapovednika [Geomorphological evolution of the Central Forest Nature Reserve territory], *Trudy Central'no-Lesnogo zapovednika*, 2007, vol. 4, p. 125–159. (In Russian)
- Puzachenko Y., Sandlersky R., Sankovski A. Methods of Evaluating Thermodynamic Properties of Landscape Cover Using Multispectral Reflected Radiation Measurements by the Landsat Satellite, *Entropy*, 2013, vol. 15, no. 9, p. 3970–3982. DOI: 10.3390/e15093970.
- Puzachenko Yu.G., Zheltukhin A.S., Kozlov D.N., Korablyov N.P., Fedyayeva M.V., Puzachenko M.Ju., Siunova E.V. *Central Forest State Biosphere Reserve*. Moscow, Delovoj mir Publ., 2007, 84 p.
- Reimann C., Fabian K., Birke M., Filzmoser P., Demetriades A., Négrel P., Oorts K., Matschullat J., de Caritat P., Albanese S., Anderson M., Baritz R., Batista M.J., Bel-Ian A., Cicchella D., De Vivo B., De Vos W., Dinelli E., Đuriš M., Dusza-Dobek A., Eggen O.A., Eklund M., Ernsten V., Flight D.M.A., Forrester S., Fügedi U., Gilucis A., Gosar M., Gregorauskiene V., De Groot W., Gulán A., Halamić J., Haslinger E., Hayoz P., Hoogewerff J., Hrvatovic H., Husnjak S., Jähne-Klingberg F., Janik L., Jordan G., Kaminari M., Kirby J., Klos V., Kwečko P., Kuti L., Ladenberger A., Lima A., Locutura J., Lucivjansky P., Mann A., Mackovych D., McLaughlin M., Malýuk B.I., Maquil R., Meuli R.G., Mol G., O'Connor P., Ottesen R.T., Pasieczna A., Petersell V., Pfeleiderer S., Poňavič M., Prazeres C., Radusinović S., Rauch U., Salpeteur I., Scanlon R., Schedl A., Scheib A., Schoeters I., Šefčík P., Sellersjö E., Slaninka I., Soriano-Disla J.M., Šorša A., Svrkota R., Stafilov T., Tarvainen T., Tendavilov V., Valera P., Verougstraete V., Vidojević D., Zissimos A., Zomeni Z., Sadeghi M. GEMAS: Establishing geochemical background and threshold for 53 chemical elements in European agricultural soil, *Applied Geochemistry*, 2018, vol. 88, p. 302–318. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2017.01.021.
- Rudnick R.L., Gao S. Composition of the Continental Crust, *Treatise on Geochemistry*, 2003, vol. 3, p. 1–64. DOI: 10.1016/B0-08-043751-6/03016-4.
- Semenkov I.N., Terskaya E.V., Kasimov N.S. [Distribution of metal forms in zonal soil-geochemical catenas], *Geohimija landschaftov* [Landscape geochemistry]. K 100-letiju so dnja rozhdenija Aleksandra Il'icha Perel'mana. Moscow, APR Publ., 2016, p. 97–144. (In Russian)
- Semenkov I.N., Terskaya E.V., Kasimov N.S. Lateralnaya differentsiatsiya form soedinenij metallov v pochvennyh cuglinistyh katenah tsentra Zapadno-Sibirskoj ravniny [Lateral differentiation of metal fractions in loamy soil catenas of the central part of Western Siberia Plain]. *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2019, no.3, p. 25–37.
- Smirnova O.V., Zaugolnova L.B., Evstigneev O.I., Korotkov V.N., Hanina L.G. *Sukcessionnye processy v zapovednikah Rossii i problemy sohraneniya biologicheskogo raznoobrazija* [Succession processes in the reserves of Russia and the problems of conservation of biological diversity], St. Petersburg, Rossijskoe botanicheskoe obshchestvo Publ., 1999, 549 p. (In Russian)
- Sukhareva T.A., Lukina N.V. Mineral composition of assimilative organs of conifers after reduction of atmospheric pollution in the Kola Peninsula, *Russian Journal of Ecology*, 2014, vol. 45, no. 2, p. 95–102. DOI: 10.1134/S1067413614020088.
- Terehina N.V. *Metodicheskie ukazaniya k provedeniju fitogeohimicheskikh issledovanij: uchebno-metodicheskoe posobie* [Methods for conducting phytogeochemical studies: manual], St. Petersburg, Akademia, 2010, 25 p. (In Russian)
- Watmough S.A., Eimers M.C., Dillon P.J. Manganese cycling in central Ontario forest: Response to soil acidification, *Applied Geochemistry*, 2007, vol. 22, no. 6, p. 1241–1247. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2007.03.039.
- Watmough S.A. Calcium, strontium and barium biogeochemistry in a forested catchment and insight into elemental discrimination, *Biogeochemistry*, 2014, vol. 118, p. 357–369. DOI: 10.1007/s10533-013-9938-x.
- Zheleznova O.S., Chernyh N.A., Tobratov S.A. Cink i kadmij v fitomasse drevesnyh rastenij lesnyh ekosistem: zakonomernosti translokacii, akumuljacii i bar'ernyh mehanizmov [Zinc and cadmium in tree species of forest ecosystems: patterns of translocation, accumulation and barrier mechanisms], *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 2017, vol. 25, no. 2, p. 253–270. DOI: 10.22363/2313-2310-2017-25-2-253-270. (In Russian)

Received 18.02.2020

Revised 22.05.2020

Accepted 06.08.2020

КРАТКИЕ ЗАМЕТКИ

УДК 911.375.5; 314.145; 394.014

А.С. Хусайнова¹, Н.Ю. Замятина²

ТЕРРИТОРИАЛЬНАЯ ЭТНИЧЕСКАЯ ЭКСКЛЮЗИЯ В ЗАГРЕБЕ

Приведен анализ проявления взаимосвязи городской пространственной структуры и формирования ареалов этнической эксклюзии на примере г. Загреба в Хорватии. Выявлено, что в наибольшей степени подвержены риску развития этнической эксклюзии представители цыганской этнической общности и боснийцы, что во многом связано с их общей миграционной историей и компактным расселением в Загребе. В структуре городского пространства Загреба выявлены элементы, имеющие барьерную функцию для его селитебных зон: реки, железные дороги, крупные автомагистрали, промышленные и торговые площади, зеленые парковые зоны. Выделены жилые районы Загреба, сочетающие характеристики территориальной обособленности и социальной эксклюзии по этническому признаку. Выявлено, что решающий фактор, усугубляющий социальную эксклюзию – территориальная обособленность районов проживания. Основная стратегия поведения цыган и боснийцев, которые стремятся выйти из состояния этнической эксклюзии, – переезд из территориально обособленного жилого района.

Ключевые слова: социальная эксклюзия, городская пространственная структура, цыгане, боснийские мигранты

Введение. Пространственные особенности расселения зачастую влияют на формирование эксклюзии – одного из проявлений социального неравенства [Бородкин, 2000; Abrahamson, 1995; Cameron, 2006; Sibley, 1995]. Изолированные, неудобно расположенные населенные пункты или районы города часто становятся участками концентрации маргинальных групп населения [Jacobs, 1961; Collier, 2013].

Проблема рассмотрена на примере г. Загреба, столицы Хорватии. Выбор региона исследования обусловлен несколькими факторами, которые делают возможным дальнейшее использование результатов исследования в России:

- социалистическое прошлое Хорватии в составе Югославии;
- значительный поток трудовых мигрантов из соседних государств;
- сопоставимый уровень экономического развития Хорватии и России (по данным Всемирного банка, ВВП на душу населения по ППС в Хорватии в 2017 г. составил 26,3 тыс. \$, в России в 2018 г. – 27,1 тыс. \$).

Основная часть населения Загреба – хорваты (93,1% [Popis ..., 2011]). Прочие этнические группы относятся к меньшинствам, наиболее многочисленные из которых – сербы (2,2% населения Загреба), боснийцы (1,0%) и албанцы (0,5%). Примерно равные доли в населении Загреба занимают также цыгане и словенцы (по 0,3%), македонцы и черногорцы (по 0,2%), а также чехи, венгры и итальянцы (по 0,1%) [Popis ..., 2011]. Цыгане и боснийцы – ярко

выраженные меньшинства, у которых в силу специфических социокультурных и экономических особенностей высок риск формирования эксклюзии [Kako ..., 2005].

В данном исследовании по рекомендации хорватских экспертов термин «боснийцы» используется для обозначения всех мигрантов из Боснии и Герцеговины, а также их детей, несмотря на то, что боснийские мигранты могут относить себя к сербской или хорватской этнической группе. Отнесение эксклюзии, испытываемой боснийцами в Загребе, к этнической, обусловлено тем, что хорваты, проживающие в Загребе, не воспринимают боснийцев частью хорватской этнической группы.

Цель данного исследования – анализ взаимодействия территориальной структуры Загреба и особенностей городского расселения этнических меньшинств как факторов формирования ареалов этнической эксклюзии. Для достижения поставленной цели был решен ряд задач:

- выявлены территориально обособленные ареалы жилой застройки Загреба;
- определены этнические общности, населяющие Загреб, в отношении которых проявляется этническая эксклюзия, и районы их проживания;
- рассмотрены аспекты взаимодействия территориальной и этнической эксклюзии, влияющие на формирование городского пространства Загреба.

Актуальность исследования заключается в изучении зарубежного опыта проблем, связанных с особенностями развития городской пространственной

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, кафедра социально-экономической географии зарубежных стран, аспирант; e-mail: khusainova.lina@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, кафедра социально-экономической географии зарубежных стран, вед. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: nadezam@yandex.ru

структуры. Новизна – в выбранном регионе исследования – Хорватии, представленность которой в отечественных научных работах невысока.

Материалы и методы исследования. Междисциплинарный характер темы исследования предопределил применение в нем как географических, так и социологических методов. Исследование построено, в первую очередь, на сопоставлении территориальной структуры города Загреба и ареалов расселения этнических меньшинств, рассмотрены также прочие факторы формирования этнической эксклюзии. Изучение территориальной дифференциации городского пространства было проведено на основе данных генерального плана города Загреба [Generalni ..., 2017] и включало в себя:

- анализ пространственного распределения и сочетания районов города с различными функциями (жилые кварталы, промышленные зоны, торговые площади, зеленые парковые зоны и т. д.);

- определение объектов городского пространства, играющих роль барьеров для районов жилой застройки Загреба – естественных (река Сава, зеленые зоны) и антропогенных (железнодорожные пути, промышленные зоны, торговые и офисные площади);

- выявление районов жилой застройки, территориально обособленных от основного жилого пространства Загреба.

Выявление ареалов концентрации этнической эксклюзии основывалось на определении основных районов проживания этнических групп, испытывающих эксклюзию по этническому признаку. Как группы, так и кварталы их проживания были выделены по результатам изучения работ хорватских ученых, а также в ходе семи глубинных и полуструктурированных интервью с экспертами из Загреба – учеными (географами, социологами, урбанистами), специалистами по работе с цыганами, общественными деятелями и местными жителями.

Сопоставление территориально обособленных жилых районов Загреба и районов концентрации социальной эксклюзии позволили обозначить четыре городских района, в которых наблюдается сочетание территориальной и этнической эксклюзии (рис.). В них было проведено полевое исследование с применением так называемого иконографического метода изучения культурных ландшафтов [The iconography ..., 1988]; в двух из этих районов автор прибегал к помощи представителей местного сообщества. В ходе полевого исследования были выявлены основные характерные чер-



Рис. Районы сочетания этнической и территориальной эксклюзии, в т. ч. районы трудовой миграции боснийцев и цыган (1а – Козари Бок, 1б – Козари Путевы, 1в – Петрушевец), районы позднего переселения цыган (2а – Плинарско Населье, район Канал, 2б – Новый Йелковец), а также районы территориальной эксклюзии без наличия этнической эксклюзии (3а – Кайзерница, 3б – Света Клара)

Fig. Areas of combination of ethnic and spatial exclusion, including areas of labor migration of Bosnians and Roma (1a – Kozari Bok, 1b – Kozari Putevi, 1v – Petrushevec), areas of late resettlement of Roma (2a – Plinarsko naselje, Kanal, 2b – Novi Jelkovec), and areas of territorial exclusion without ethnic exclusion (3a – Kajzerica, 3b – Sveta Klara)

ты ландшафта районов концентрации этнически эксклюзивированных групп населения Загреба, позволяющие идентифицировать места их проживания, а также соответствующие уровню этнической эксклюзии. Кроме того, в ходе полевого исследования была проверена информация, полученная в ходе интервью с экспертами.

Результаты исследований и их обсуждение. В наибольшей степени этническая эксклюзия в Загребе проявляется по отношению к цыганам [Babić, 2004; Šakaja, Šlezak, 2013]. Меньше этническая эксклюзия наблюдается в отношении боснийцев. Большинство представителей данных этнических групп мигрировали в Загреб во второй половине XX века – начале XXI века сначала в рамках трудовой миграции, а затем из-за военных действий в Боснии и Герцеговине [Kako ..., 2005; Šakaja, Šlezak, 2013]. Общая страна исхода цыган и боснийских мигрантов стала одним из факторов их компактного (совместного) расселения в Загребе.

Анализ генерального плана города показал, что, несмотря на относительную непрерывность городской застройки практически на всей территории Загреба, можно предположить, что некоторые группы районов имеют предпосылки для формирования в них процессов эксклюзии: а) районы стихийной застройки мигрантами-рабочими, примыкающие к промышленным кварталам (расположены на востоке и юго-востоке Загреба: Козари Бок, Козари Путевы, Петрушевец); б) районы новой застройки на окраине города, причем как индивидуального жилого строительства (Света Клара на юге города), так многоквартирной (Сопница-Йелковец или Новый Йелковец); в) относительно изолированные районы, возникшие вследствие трансформации городского пространства в последние десятилетия (Плинарско Населье, Кайзерица).

Районы Козари Бок, Козари Путевы и Петрушевец на востоке Загреба отделены от основной жилой застройки крупными промышленными зонами. Сами жилые районы возникли в 1960–70-х гг. вследствие расселения трудовых мигрантов из Боснии и Герцеговины. Позднее, во время и после военных действий на территории бывшей Югославии в конце XX века, районы также принимали боснийских беженцев. Последние 20 лет промышленные зоны на востоке Загреба активно трансформируются в торгово-офисные [Prelogović, 2004; Slavuj et al., 2009], однако данные районы не перестают быть территориально обособленными от прочей жилой части города.

Район многоквартирных домов Сопница-Йелковец построен в начале XXI века буквально «в чистом поле» и отделен от прочей городской застройки зелеными зонами. Часть жилого фонда в границах района используется местными властями как социальное жилье, которое предоставляется разным группам населения: как молодым ученым, так и цыганским семьям. Однако удаленность и обособленность от основного городского пространства и неразвитость инфраструктуры делает район крайне

непопулярным для проживания. Другой район новой застройки, Света Клара, также территориально обособлен зеленой зоной и, по сути, является отдельным поселением внутри городской черты.

Район Плинарско Населье расположен в центре города, но ограничен с одной стороны железной дорогой, а с другой – территорией, активно трансформирующейся в офисно-деловую и торговую. Отсутствие согласия между местными жителями, потенциальными покупателями (застройщиками) и городскими властями в отношении будущего, которое ждет район, приводит к перебоям с коммунальным обеспечением; район покидают жители, а их место занимают цыганские семьи.

Места компактного проживания боснийцев и цыган в значительной степени совпадают с территориально обособленными районами. Выделяются две группы таких районов: а) районы, где мигранты поселились сразу после прибытия в Загреб (Козари Бок, Козари Путевы, Петрушевец); б) районы, куда позже переселялись (Плинарско Населье) или были переселены (Сопница-Йелковец или Новый Йелковец) цыганские семьи. Ко второй группе мог бы относиться район Света Клара, однако местные жители выступили против выделения здесь жилья для цыган. Примечательно, что в районах Козари Бок и Козари Путевы, где проживают как цыгане, так и боснийские мигранты, дома цыганских семей сосредоточены в определенной части района. При этом важно отметить, что ни цыганские, ни боснийские семьи не сосредоточены только в перечисленных районах города, а представлены на всей территории Загреба. Однако именно здесь цыгане занимают целиком значительные площади, формируя характерные особенности городского ландшафта, например, большие кучи мусора, собираемого ради извлечения цветных металлов, и др.

Основная стратегия поведения как цыган, так и боснийских мигрантов, стремящихся выйти из состояния социальной эксклюзии, – это переезд из территориально обособленного района. Однако если для боснийских мигрантов достаточно переехать в другой (территориально не обособленный) район Загреба, то в случае с представителями цыганской этнической общности необходимы более радикальные меры. Вследствие того, что социальная эксклюзия цыган развивается не только из-за воздействия внешних факторов, но и в связи с самоизоляцией цыганских семей от остального общества, а также из-за большого влияния семейных связей на жизнь отдельного человека, для изменения своего социального статуса цыгане вынуждены переезжать в другие населенные пункты и даже государства.

Выводы:

– ключевую роль в сохранении и усугублении социальной эксклюзии представителей цыганской этнической группы и боснийских мигрантов в Загребе играет именно территориальная обособленность районов их компактного проживания;

– формирование основных районов концентрации этнической эксклюзии в Загребе (Козари Бок, Козари Путеви, Петрушевец) было связано с массовыми трудовыми миграциями и привязано к расположению промышленных предприятий;
– смена места проживания (т. е. окружающего пространства) является наиболее эффективной ме-

рой выхода из состояния социальной эксклюзии как для боснийских мигрантов, так и для представителей цыганской этнической общности;

– развитие территориальной обособленности района значительно повышает риск маргинализации его населения (в т.ч. в связи со сменой состава населения).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бородкин Ф.М. Социальные эксклюзии // Социологический журнал. 2000. № 3–4. С. 5–17.

Abrahamson P. Social exclusion in Europe: old wine in new bottles? *Družboslovne razprave*, 1995, vol. 11, no. 19–20, p. 119–136.

Babić D. Stigmatizacija i identitet Roma – pogled izvana: slučaj uienika Roma u naselju Kozari Bok. *Migracijske i etničke teme*, 2004, vol. 20, no. 4, p. 315–338.

Cameron A. Geographies of welfare and exclusion: social inclusion and exception. *Progress in Human Geography*, 2006, vol. 30, no. 3, p. 396–404.

Collier P. *Exodus: How migration is changing our world*. Oxford University Press, 2013, 384 p.

Jacobs J. *The Death and Life of Great American Cities*. New York: Random House, 1961, 458 p.

Kako žive hrvatski Romi = How do Croatian Roma live. Zagreb: Institut društvenih znanosti Ivo Pilar, 2005, 523 p.

Prelogović V. The Socio-spatial structure of a City: the example of Zagreb. *Hrvatski geografski glasnik*, 2004, vol. 66, no. 1, p. 29–46.

Žakaja L., Žlezak H. The Romani (Gypsies) in the social space of post-socialist countries: The example of Croatia. *VII Journadas de Estudio sobre Grandes problemáticas do espacio Europeu*, 2013.

Sibley D. *Geography of Exclusion*. London and New York, Routledge, 1995, 206 p.

Slavuj L., Cvitanović M., Prelogović V. Emergence of problem areas in the urban structure of post-socialist Zagreb. *Spatium*, 2009, no. 21, p. 76–83.

The iconography of landscape. Daniels S., Cosgrove D. (Eds.), Cambridge: Cambridge University Press, 1988, vol. 9.

Электронные ресурсы

Generalni urbanistički plan grada Zagreba (GUP). *Grad Zagreb, Službene stranice*, 2017. URL: <https://www.zagreb.hr/generalni-urbanisticki-plan-grada-zagreba-gup/89066> (дата обращения 05.06.2019).

Popis stanovništva, kućanstava i stanova 2011. Državni zavod za statistiku. URL: <https://www.dzs.hr/> (дата обращения 05.06.2019).

Поступила в редакцию 06.06.2019

После доработки 14.12.2019

Принята к публикации 06.08.2020

A.S. Khusainova¹,

N.Yu. Zamyatina²

TERRITORIAL ETHNIC EXCLUSION IN ZAGREB

Manifestations of the interaction between spatial structure and the formation of ethnic exclusion areas are analyzed through the example of Zagreb (Croatia). Roma ethnic community and Bosnians are most at risk of ethnic exclusion, which is largely due to their common migration history and compact settlement in Zagreb. Elements with a barrier function for the residential areas were identified within the structure of the urban space of Zagreb, namely rivers, railways, large highways, industrial and commercial areas, and green park areas. We distinguished Residential areas that combine characteristics of geographical isolation and social exclusion on ethnic grounds were recognized. It was found out that geographical isolation of the areas of residence was a key factor that aggravated social exclusion. The main behavior strategy of Roma and Bosnians, who are trying to get out of the ethnic exclusion, is to move from a territorially isolated residential area.

Key words: social exclusion, urban spatial structure, Gypsies, Bosnian migrants

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Social-Economic Geography of Foreign Countries, post-graduate student; e-mail: khusainova.lina@yandex.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Social-Economic Geography of Foreign Countries, Leading Scientific Researcher, PhD in Geography; e-mail: nadezam@mail.ru

REFERENCES

- Abrahamson P. Social exclusion in Europe: old wine in new bottles? *Družboslovne razprave*, 1995, vol. 11, no. 19–20, p. 119–136.
- Babić D. Stigmatizacija i identitet Roma – pogled izvana: slučaj učenika Roma u naselju Kozari Bok *Migracijske i etničke teme*, 2004, vol. 20, no. 4, p. 315–338.
- Borodkin F.M. Social'nye jekskljuzii [Social exclusions]. *Sociologičeskij zhurnal*, 2000, no. 3–4, p. 5–17. (In Russian)
- Cameron A. Geographies of welfare and exclusion: social inclusion and exception *Progress in Human Geography*, 2006, vol. 30, no. 3, p. 396–404.
- Collier P. *Exodus: How migration is changing our world*, Oxford University Press, 2013, 384 p.
- Jacobs J. *The Death and Life of Great American Cities*. New York, Random House, 1961, 458 p.
- Kako žive hrvatski Romi=How do Croatian Roma live. Zagreb, Institut društvenih znanosti Ivo Pilar, 2005, 523 p.
- Prelogović V. The Socio-spatial structure of a City: the example of Zagreb *Hrvatski geografski glasnik*, 2004, vol. 66, no. 1. p. 29–46.
- Žakaja L., Žlezak H. The Romani (Gypsies) in the social space of post-socialist countries: The example of Croatia. *VII Journadas de Estudio sobre Grandes problemáticas do espaço Europeu*, 2013.
- Sibley D. *Geography of Exclusion* London and New York, Routledge, 1995, 206 p.
- Slavuj L., Cvitanović M., Prelogović V. Emergence of problem areas in the urban structure of post-socialist Zagreb *Spatium*, 2009, no. 21. p. 76–83.
- The iconography of landscape*. Cosgrove D., Daniels S. (ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 1988, vol. 9.
- Web sources*
- Generalni urbanistički plan grada Zagreba (GUP). Grad Zagreb, Službene stranice. 2017. URL:// <https://www.zagreb.hr/generalni-urbanisticki-plan-grada-zagreba-gup/> (access date 20.03.2019).
- Popis stanovništva, kućanstava i stanova 2011. Državni zavod za statistiku. URL:// <https://www.dzs.hr/> (access date 20.03.2019).

Received 06.06.2019

Revised 14.12.2019

Accepted 06.08.2020

УДК 551.79

Р.Н. Курбанов^{1,2}, Д.В. Семиколенных³, Т.А. Янина⁴, Н.А. Тюнин⁵, Э.С. Мюррей⁶

НОВЫЕ ДАННЫЕ О ВОЗРАСТЕ КАРАНГАТСКОЙ ТРАНСГРЕССИИ ЧЕРНОГО МОРЯ

Карангатская трансгрессия Черного моря – важный этап его плейстоценовой истории. В хронометрической оценке возраста этого события единства среди исследователей в настоящее время нет. В работе представлены результаты датирования карангатских отложений, вскрытых в опорном разрезе Тузла на западном берегу Таманского полуострова. Малакофаунистический состав отложений свидетельствует об отражении в разрезе максимальной фазы трансгрессии. Новая абсолютная хронология получена на основе датирования методом инфракрасной стимулированной люминесценции полевых шпатов. Распределение доверительных интервалов и результаты стандартных тестов полностью соответствуют принятым в современной практике люминесцентного датирования диапазонам, что позволяет считать полученные результаты надежными. Возраст карангатских отложений разреза Тузла охарактеризован интервалом 125–120 тыс. л. н., что соответствует максимуму межледникового потепления (МИС 5е). Воды карангатского бассейна достигли района расположения разреза около 125 тыс. л. н., где на абсолютной высоте 3,5 м началось формирование прибрежно-морских отложений. Уровень бассейна достиг 5,3 м к 120 тыс. л. н., преодолев 1,8 м за 5 тыс. лет. Позднее морское осадконакопление здесь было незначительным. Субаэральная фаза развития западной части Таманского п-ова началась около 100 тыс. л. н. В разрезе отмечается лёссово-почвенная серия с тремя уровнями погребенных почв. Дополнительное геохронологическое исследование верхней части разреза позволит определить возраст этих горизонтов и реконструировать стадии субаэрального этапа развития региона в позднем плейстоцене.

Ключевые слова: поздний плейстоцен, разрез Тузла, датирование, метод инфракрасной стимулированной люминесценции

Введение. Карангатская трансгрессия Черного моря – этап его плейстоценовой истории, важный для понимания закономерностей развития побережий, оценки направления эволюционного развития биоты и корреляции палеогеографических событий с глобальными и региональными изменениями климата и природной среды. Трансгрессия развивалась в начале позднего плейстоцена в области современного Черного и Азовского морей в условиях межледниковья. Уровень бассейна поднимался на пять–семь метров выше современного, а воды его проникали в эстуарии крупных рек, в понижения низменных областей региона, глубоко вдавались в Манычскую депрессию.

В литературе, посвященной карангатской трансгрессии, исследователи выделяют разное количество фаз и циклов трансгрессии. Так, П.В. Федоровым [1963] и А.А. Свиточем [2001, 2009] выделены две фазы, с максимумом трансгрессии во вторую из них. Три этапа развития бассейна, охарактеризованные разным составом малакофауны, установлены Л.А. Невесской [1965]. В.В. Янко [Янко и др., 1990]

на основе детального исследования микрофауны с привлечением циклостратиграфического подхода также выделяет три этапа в развитии карангатской трансгрессии: тарханкутский и тобечикский, собственно карангатский с рядом фаз. А.Л. Чепалыга тоже выделяет три стадии (личное сообщение), каждая из которых соответствует этапам потепления МИС 5. В обобщающей работе [Krijgsman et al., 2019] выделяется четыре этапа развития бассейна: тобечикский, заветнинский, эльтигенский и тарханкутский. Однако большинство исследователей выделяют два главных этапа развития карангатского бассейна. Тобечикская (ранняя) фаза по положению уровня и составу малакофауны была близка современному бассейну. Во вторую, карангатскую, фазу уровень моря был выше современного, достиг своего максимума (+5...+7 м), характеризовался теплопроводностью и наивысшей в плейстоцене соленостью (около 30‰).

Время существования бассейна, по мнению большинства исследователей, соответствует последнему межледниковью – морской изотопной ста-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, лаборатория новейших отложений и палеогеографии плейстоцена, ст. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: kurbanov@igras.ru.

² Институт географии РАН, отдел палеогеографии четвертичного периода, ст. науч. с.

³ Институт географии РАН, аспирант; e-mail: Dasha.Semikolennykh@gmail.com

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, профессор; лаборатория новейших отложений и палеогеографии плейстоцена, зав. лабораторией, докт. геогр. н.; e-mail: paleo@inbox.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, аспирант; e-mail: nictun@mail.ru

⁶ Орхусский университет, Дания, отдел геонаук, Скандинавская лаборатория люминесцентного датирования, профессор; e-mail: andrew.murray@geo.au.dk

дии 5 (МИС 5). Однако проблема возраста отдельных фаз развития трансгрессии остается спорной. Материалы по абсолютному датированию и различные взгляды на корреляцию этапов развития бассейна с региональными и глобальными хроностратиграфическими шкалами отражены нами в работе [Курбанов и др., 2019]. В ней представлены результаты датирования карангатских отложений методом оптически стимулированной люминесценции (ОСЛ), вскрытых в стратотипическом разрезе Эльтиген на восточном побережье Керченского полуострова. Сделано заключение о двух фазах развития карангатской трансгрессии. Ранняя развивалась в условиях потепления МИС 5е (в интервале 131–120 тыс. л. н.), составив +3,6 м. В позднюю фазу (120–100 тыс. л. н.) был достигнут максимальный подъем уровня до ~6,45 м. В период 72 ± 8 тыс. л. н. восточная часть

Керченского п-ова уже развивалась в условиях субаэрального осадконакопления.

Для проверки полученных для разреза Эльтиген результатов ОСЛ датирования и уточнения положения уровня моря на разных этапах развития карангатской трансгрессии нами проведены дополнительные исследования на побережье Керченского пролива. Объектом этого исследования стал разрез Тузла – опорный разрез карангатских отложений восточного побережья Керченского пролива, расположенный на западном окончании Таманского полуострова (рис.).

Материал и методика исследований. Разрез расположен на северном участке берегового обрыва у основания косы Тузла. Берег здесь представляет низменную морскую равнину, закрытую толщей лёссовидных пород. Разрез был неоднократно

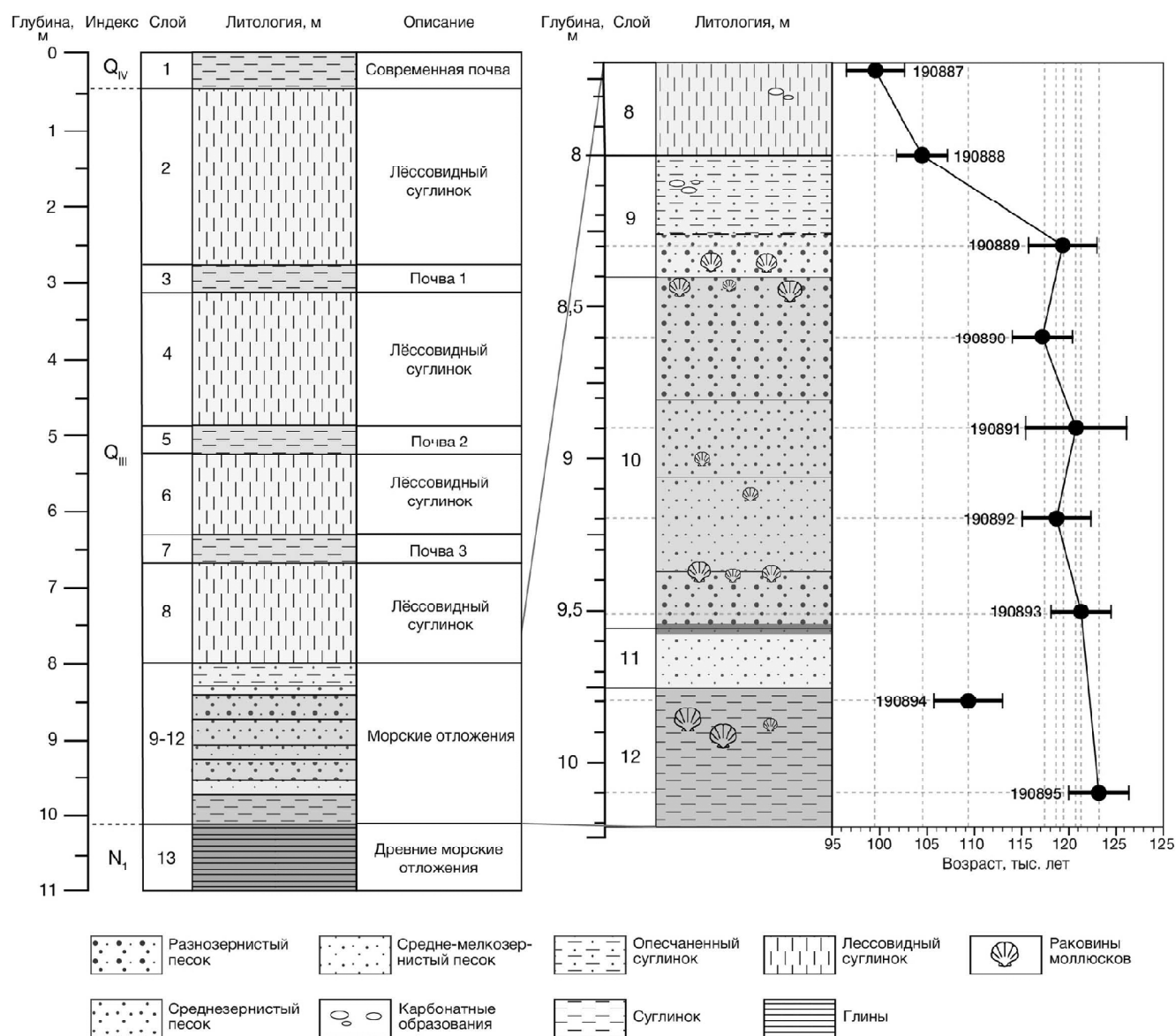


Рис. Строение разреза Тузла и результаты ОСЛ датирования

Fig. Structure of the Tuzla section and results of the OSL-dating

но описан [Андрусов, 1903; Федоров, 1963; Свиточ и др., 2001; Свиточ, 2009], по верхней части морской осадочной толщи разреза получена ОСЛ дата 85 ± 6 тыс. лет [Пилипенко, Трубихин, 2012].

В ходе полевых работ 2018 г. разрез Тузла нами изучен в 150 м к северу от одноименного мыса. Верхняя часть разреза (7–8 м) – лёссы с тремя погребенными почвами, толща имеет цвет от темно-коричневого (голоценовая почва) до светло-палевого, характеризуется столбчатой отдельностью, блоками отседания, карбонатными образованиями (журавчики). Карангатские отложения представлены горизонтом мощностью 2,2 м – это рыжевато-серые плохо сортированные пески с включением фауны моллюсков, преимущественно в виде отдельных прослоев с фауной. Ниже карангатские пески резкой границей переходят в более древнюю толщу зеленоватых суглинков.

Отложения разреза изучены комплексным литологическим, малакофаунистическим и геохронологическим методами. Анализ малакофауны (изучение тафономических особенностей раковинного материала, его систематический и статистический анализ) выполнен с целью биостратиграфического обоснования геологического возраста осадков и понимания палеоэкологических условий их накопления. Абсолютное датирование выполнено методом ОСЛ. Для анализа отобрано 12 образцов. Их отбор осуществлен по стандартной методике в светонепроницаемые пакеты, отдельно отобран материал для гамма-спектрометрического анализа. Предварительная подготовка проб проведена в НИ лаборатории новейших отложений и палеогеографии плейстоцена по принятому в Орхусском университете протоколу [Курбанов и др., 2019]. Непосредственные измерения проведены в Скандинавской лаборатории люминесцентного датирования (NLL) Орхусского университета, Дания.

Результаты, полученные нами для разреза Эльтиген, показали их высокую сходимость по кварцу и полевым шпатам, что позволило сделать вывод о достаточном для полного обнуления нахождении материала в геологическом транспорте (соотношение $pIRIR/Q$ оказалось равным $1 \pm 0,1$ как для образцов и лёссово-почвенных серий, так и для морских отложений). На основании этого для разреза Тузла датирование выполнялось для полевых шпатов методом инфракрасно стимулированной люминесценции (ИКСЛ) по протоколу $pIRIR_{290}$ [Thiel et al., 2011]. В остальном же методика измерения эквивалентной дозы и мощности дозы выполнялись аналогично описанной в [Курбанов и др., 2019] на основе SAR [Murray and Wintle, 2003]. Для уровня водонасыщения отложений приняты те же показатели, что и для Эльтигена: для лёссово-почвенных отложений верхней части разреза принята оценка в 10%, а для прибрежно-морских песков – в 5%.

Результаты исследований и их обсуждение. Обнажение разреза Тузла имеет высоту около 11 м. В его строении (см. рисунок) выделяется три главных стратиграфических подразделения: 1. Глины

плотные зеленоватые, видимая мощность до 2 м, соответствующие горизонту неогеновых отложений (слой 13). 2. Выше с размывом располагается горизонт карангатских прибрежно-морских отложений общей мощностью 2,2 м (слои 9–12). 3. Мощная толща субаэральных отложений, выраженная чередующимися горизонтами лёссов и погребенных почв (слои 1–8, около 8 м).

В составе карангатского горизонта выделяют (сверху вниз) следующие слои:

Слой 9. Песок темно-серый пылеватый с включением мелкого раковинного детрита и целых раковин *Spisula subtruncata triangula*, *Chione gallina*, *Paphia rugata* (0,4 м), переход резкий.

Слой 10. Песок рыжевато-серый, разнотернистый, детритовый, горизонтально слоистый с прослоями раковин *Ostrea edulis*, *Mytilaster lineatus*, *Cerastoderma glaucum*, *Chione gallina* (0,7 м), переход постепенный.

Слой 11. Песок рыжевато-серый, мелко-среднезернистый, горизонтально слоистый, детритовый с редким включением раковин моллюсков, в кровле ожелезненный прослой с тонкостенными раковинами *Mytilaster lineatus*, *Solen vagina*, *Donax trunculus* (0,5 м), переход резкий.

Слой 12. Песок сизо-серый, тонко-среднезернистый, с тонкой горизонтальной слоистостью, встречаются раковины *Ostrea edulis*, *Mytilus galloprovincialis*, *Cardium exiguum*, *Cerastoderma glaucum*, *Paphia discrepans*, *Abra ovata*, *Spisula subtruncata*, *Solen vagina*, (0,6 м), переход резкий, с размывом.

В толще наблюдается нелинейная смена видового состава достаточно типичных для современного Азово-Черноморского бассейна моллюсков. Это, по-видимому, указывает на условия несколько опресненной обстановки, не характерной для солоноводного карангатского бассейна, а также некоторых осцилляций, связанных с изменением его уровня, береговой линии, интенсивности влияния опресненных вод Азовского моря или пресных вод палео-Кубани и палео-Дона.

Для разреза Тузла проведено ИКСЛ датирование по девяти образцам, семь из которых отобраны из карангатских прибрежно-морских отложений (слои 12–9), два – из подошвы перекрывающих их лёссово-почвенных серий (слой 8).

Результаты измерения активности образцов, расчет содержания радионуклидов и итоговые значения мощности дозы для полевых шпатов представлены в табл. 1. Анализ распределения этих показателей позволяет выделить в изученной части разреза четыре горизонта. 1. Серые пески слоя 12, с повышенным содержанием ^{40}K и ^{232}Th , что выразилось в относительно высокой мощности дозы для морских песков с включением раковин моллюсков (3,1–3,4 Гр/тыс. лет). Повышенные значения связаны в основном с ростом содержания ^{40}K . 2. Пески слоев 9–11 с пониженным содержанием радионуклидов и мощностью дозы в пределах 2,6–2,8 Гр/тыс. лет. 3. Переход от песков слоя 9 к лес-

Т а б л и ц а 1

Результаты гамма-спектрометрического анализа. Водонасыщение (WC), содержание радионуклидов в образце, их соотношения и мощность дозы для полевых шпатов

№	Лаб. №	Глубина, м	WC, %	^{226}Ra , Бк/кг ⁻¹	^{232}Th , Бк/кг ⁻¹	^{40}K , Бк/кг ⁻¹	$^{226}\text{Ra} / ^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K} / ^{232}\text{Th}$	Мощность дозы, Гр/тыс. лет
1	190887	7,7	10	43,8±1,0	44,5±0,8	478±16	1,0	11	3,8±0,2
2	190888	8,0	10	17,4±0,9	19,1±0,8	500±19	1,1	26	3,0±0,1
3	190889	8,3	5	13,5±0,4	15,4±0,4	435±11	1,1	28	2,6±0,1
4	190890	8,6	5	11,8±0,5	13,2±0,4	422±12	1,1	32	2,6±0,1
5	190891	8,9	5	14,6±0,9	19,7±0,8	451±20	1,3	23	2,8±0,1
6	190892	9,2	5	15,1±0,2	19,5±0,2	453±4	1,3	23	2,8±0,1
7	190893	9,5	5	11,8±0,2	15,4±0,2	494±4	1,3	32	2,8±0,1
8	190894	9,8	5	18,4±0,4	22,7±0,4	654±12	1,2	29	3,4±0,1
9	190895	10,1	5	16,8±0,9	20,3±0,7	561±19	1,2	28	3,1±0,1

сам слоя 8 (190888), отражающий смешение материала; отмечается увеличение содержания ^{226}Ra и ^{232}Th . 4. Резко отличный от морских песков образец (190887) из низов лёссовой толщи (слой 8); выражено увеличение содержания ^{226}Ra и ^{232}Th . Это указывает не только на различие в генезисе отложений (более длительное воздействие водной среды способствует вымыванию радионуклидов), но и на возможную смену источников сноса. Из всех измеренных образцов выделяется образец 190894 со значительным увеличением содержания ^{40}K и повышенной мощностью дозы (3,4 Гр/тыс. лет), что связано с возможными ошибками в ходе пробоподготовки образца (весовая влажность, содержание органики и т. д.).

Измерение люминесценции полевых шпатов выполнено для 8–10 навесок (в зависимости от объема полученных зерен), по протоколу pIRIR₂₉₀ с регистрацией отклика при нагреве до 290°C. Построение кривой насыщения выполнялось по пяти точкам: 125, 200, 500, 0, 125 Грей. Для всех образцов получена характерная для полевых шпатов кривая люминесценции с постепенным откликом на стимуляцию. Для оценки корректности процедуры очистки образца между циклами SAR выполнен тест восстановления дозы: 12 аликвот были в течение 2 суток подвержены воздействию света в симуляторе солнечного излучения лаборатории NLL. Результаты теста оказались в пределах 1,01–1,05 ($n=12$). Эквивалентные дозы (D_e) и итоговые датировки представлены в табл. 2.

Значения эквивалентных доз по разрезу имеют закономерное послойное распределение. Так, по двум образцам (190894–190895) из нижней части разреза (слой 12) получены дозы 373–381 Гр. Средняя часть разреза (слои 9–11) характеризуется дозами в пределах 299–336 Гр. Образец из слоя 8 дал повышенные значения около 380 Гр.

Итоговое распределение датировок позволяет выделить два разновозрастных горизонта в разрезе.

Возраст карангатской толщи (слои 12–9) охарактеризован 6 датами от 123,1±5,8 до 119,4±6,6 тыс. лет (190895–190889). С учетом доверительных интервалов можно говорить о едином возрасте этих отложений с закономерным постепенным омоложением датировок в верхней части. Этот участок, по видимому, сформировался в достаточно короткое время и отражает трансгрессивную серию прибрежно-морских осадков карангатского бассейна. Из полученной серии выбивается лишь одна дата: 109,5±6,6 тыс. лет (190894). Незначительная инверсия однозначно связана с завышенным значением мощности дозы. Учет этого факта позволяет считать карангатские слои 12–9 разреза Тузла близкими по возрасту, формирование которых происходило в интервале 125–120 тыс. л. н.

Для отобранного из плохо выраженной границы между слоями 9 и 8 образца 190888 получена дата 104,5±5,4 тыс. л. н., указывающая на начало субэрального этапа в районе расположения разреза Тузла. Основание горизонта лёссов (слой 8) охарактеризовано датой 99,5±5,6 тыс. л. н.

Выводы:

– разрез Тузла является важным объектом для характеристики этапов развития карангатской трансгрессии. Малакофаунистический состав отложений свидетельствует об отражении в разрезе максимальной фазы трансгрессии. Ее воды имели соленость ниже, чем у западного берега пролива (разрез Эльтиген), что объясняется опресняющим влиянием палео-Кубани, впадавшей в Черное море;

– для разреза Тузла получена новая абсолютная хронология на основе ИКСЛ датирования полевых шпатов. Распределение доверительных интервалов, результаты стандартных тестов (циклы SAR, восстановление дозы), полностью соответствуют принятым в современной практике люминесцентного датирования диапазоном, что позволяет считать полученные результаты и итоговую хронологию надежными;

Таблица 2

Результаты ИКСЛ датирования разреза Тузла

№	Образец	Лаб. №	Глубина, м	Абс. высота, м	Слой в разрезе		Измерения по полевым шпатам (Fs), протокол pIRIR ₂₉₀		
					№ слоя	Тип отложений	D _e , Грей	N	Возраст, тыс. лет
1	TZ-0	190887	7,7	5,9	8	Лёсс	379,3±13,2	8	99,5±5,6
2	TZ-1	190888	8,0	5,6	8–9	Переветанный песок и лёсс	318,4±8,1	8	104,5±5,4
3	TZ-2	190889	8,3	5,3	9	Опесчаненный суглинок	316,1±11,5	8	119,4±6,6
4	TZ-3	190890	8,6	5,0	10	Разнозернистый песок	299,8±7,7	8	117,5±5,8
5	TZ-4	190891	8,9	4,7	10	Среднезернистый песок	335,1±22,5	8	120,9±9,7
6	TZ-5	190892	9,2	4,4	10	Средне-мелкозернистый песок	329,7±12,4	7	118,7±6,6
7	TZ-6	190893	9,5	4,1	10	Разнозернистый песок	336,7±7,9	9	121,3±5,8
8	TZ-7	190894	9,8	3,8	12	Суглинок	373,8±16,2	9	109,5±6,6
9	TZ-8	190895	10,1	3,5	12	Суглинок	381,4±7,3	9	123,1±5,8

– возраст карангатских отложений разреза Тузла охарактеризован интервалом 125–120 тыс. л. н., что соответствует максимуму межледникового потепления (МИС 5е). Воды карангатского бассейна достигли района расположения разреза около 125 тыс. л. н., где на абсолютной высоте 3,5 м началось формирование прибрежно-морских отложений. Уровень бассейна достиг 5,3 м к 120 тыс. л. н., т. е. произошел достаточно быстрый подъем уровня на 1,8 м за интервал около 5 тыс. лет;

– в разрезе Тузла представлены осадки лишь максимальной фазы развития карангатской трансгрессии, что отличает его от опорного разреза Керченского полуострова Эльтиген. После 120 тыс. л. н.

морское осадконакопление здесь было незначительным. Мы допускаем эоловую переработку и перенос морских осадков верхней части карангатской толщи в посткарангатский регрессивный этап развития бассейна;

– субаэральная фаза развития западной части Таманского п-ова в районе разреза Тузла началась уже около 100 тыс. л. н. Здесь отмечается более полная, по сравнению с разрезом Эльтиген, лёссово-почвенная серия с тремя уровнями погребенных почв. Дополнительное геохронологическое исследование верхней части разреза позволит определить возраст этих горизонтов и реконструировать стадии субаэрального этапа развития региона в позднем плейстоцене.

Благодарности. Исследования выполнены при поддержке проекта РФФИ № 18-05-00296 (полевые работы) и проекта РНФ № 16-17-10103 (геохронологический анализ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андрусов Н.И. Геологические исследования на Таманском полуострове // Материалы для геологии России. Т. XXI. 1903. № 2. С. 257–283.

Курбанов Р.Н., Янина Т.А., Мюррей А.С., Семиколених Д.В., Свистунов М.И., Штыркова Е.И. Возраст Карангатской трансгрессии (поздний плейстоцен) Черного моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2019. № 6. С. 29–39.

Невеская Л.А. Позднечетвертичные двустворчатые моллюски Черного моря, их систематика и экология. М.: АН СССР, 1965. 392 с.

Пилипенко О.В., Трубихин В.М. Геологическая и палеомагнитная корреляция плейстоценовых разрезов юга России, Украины и Азербайджана // Бюл. Ком. по изуч. четверт. пер. 2012. № 72. С. 136–148.

Свиточ А.А. Стратотипы карангата Таманского и Керченского полуостровов (сравнительный анализ) // Доклады академии наук. № 424. 2009. С. 669–671.

Свиточ А.А., Благодатских О.С., Большаков В.А., Янина Т.А. Новые данные по малакофауне и палеомагнетизму опорных разрезов морского плейстоцена Таманского полуострова // Доклады академии наук. 2001. Т. 376. № 1. С. 110–113.

Федоров П.В. Стратиграфия четвертичных отложений Крымско-Кавказского побережья и некоторые вопросы геологической истории Черного моря. М.: АН СССР, 1963. 164 с.

Янко В.В., Фролов В.Т., Мотненко И.В. Фораминиферы и литология стратотипического разреза карангатского горизонта (антропоген Керченского полуострова) // Бюлл. МОИП. Отд. Геологии. 1990. № 65. С. 83–97.

Krijgsman W., Tesakov A., Yanina T., Lazarev S., Danukalova G., Van Baak C.G.C., Agustí J., Alçiçek M.C., Aliyeva E., Bista D., Bruch A., Büyükmeriç Y., Bukhsianidze M., Flecker R., Frolov P., Hoyle T.M., Jorissen E.L., Kirscher U., Koriche S.A., Kroonenberg S.B., Lordkipanidze D., Oms O., Rausch L., Singarayer J., Stoica M., van de Velde S., Titov V.V., Wesselingh F.P. Quaternary time scales for the Pontocaspian domain: Interbasinal connectivity and faunal evolution. *Earth-Science Rev.*, 2019, no. 188, p. 1–40.

Murray A.S., Wintle A.G. The single aliquot regenerative dose protocol: potential for improvements in reliability. *Radiation measurements*, 2003, no. 37(4–5), p. 377–381.

Thiel C., Buylaert J.-P., Murray A.S., Terhorst B., Hofer I., Tsukamoto S., Frechen M. Luminescence dating of the Stratzing loess profile (Austria) – Testing the potential of an elevated temperature post-IR IRSL protocol. *Quaternary International*, 2011, no. 234, p. 2–31.

Поступила в редакцию 04.07.2020

После доработки 18.07.2020

Принята к публикации 06.08.2020

R.N. Kurbanov^{1,2}, D.V. Semikolennykh³, T.A. Yanina⁴,
N.A. Tyunin⁵, A.S. Murray⁶

NEW DATA ON THE AGE OF THE KARANGATIAN TRANSGRESSION OF THE BLACK SEA

The Karangatian transgression of the Black Sea is a significant stage in its Pleistocene history. There is no consensus on the chronometric estimate of the age of this event. The paper presents the dating results for the Karangatian deposits cored from the Tuzla key section on the western coast of the Taman Peninsula. The mollusk shell composition of sediments indicates that the section reflects the peak phase of the transgression. A new absolute chronology bases on the dating by the method of infrared stimulated luminescence of feldspars. The distribution of credible intervals and the results of standard tests are in exact accordance with the ranges accepted in the operational practice of luminescence dating, thus the obtained results could be considered as reliable. The age of the Karangatian deposits of the Tuzla section matches with the time interval of 125–120 ka BP, which corresponds to the peak of the interglacial period (MIS 5e). The waters of the Karangat basin reached the section area about 125 ka BP, and the coastal-marine deposition began at 3.5 m AMSL. The basin level reached 5.3 m AMSL in 120 ka BP, the rise of 1.8 m during 5 thousand years. After 120 ka BP, the local marine sedimentation was insignificant. The subaerial deposition stage in the western part of the Taman Peninsula began about 100 ka BP. The section contains a loess-soil series with three layers of buried soils. An additional geochronological study of the upper part of the section will determine the age of these layers and reconstruct the substages of subaerial deposition stage of the Late Pleistocene regional history.

Key words: Late Pleistocene, the Tuzla section, dating, IRSL method

Acknowledgements. The studies were financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-05-00296, field studies) and by the Russian Science Foundation (project no. 16-17-10103, geochronological analysis).

REFERENCES

Andrusov N.I. Geologicheskie issledovaniya na Tamanskom poluostrove [Geological studies on the Taman Peninsula]. *Materialy dlya geologii Rossii*, 1903, vol. XXI, no. 2, p. 257–283. (In Russian)

Fedorov P.V. *Stratigrafiya chetvertichnykh otlozhenij Krymsko-Kavkazskogo poberezh'ya i nekotorye voprosy geologicheskoy istorii Chernogo morya* [Stratigraphy of the Quaternary sediments of the Crimean-Caucasian coast and some issues of the geological history of the Black Sea], Moscow, Izd-vo AN SSSR Publ., 1963, 164 p. (In Russian)

Krijgsman W., Tesakov A., Yanina T., Lazarev S., Danukalova G., Van Baak C.G.C., Agustí J., Alçiçek M.C., Aliyeva E., Bista D., Bruch A., Büyükmeriç Y., Bukhsianidze M.,

Flecker R., Frolov P., Hoyle T.M., Jorissen E.L., Kirscher U., Koriche S.A., Kroonenberg S.B., Lordkipanidze D., Oms O., Rausch L., Singarayer J., Stoica M., van de Velde S., Titov V.V., Wesselingh F.P. Quaternary time scales for the Pontocaspian domain: Interbasinal connectivity and faunal evolution. *Earth-Science Rev.*, no. 188, 2019, p. 1–40.

Kurbanov R.N., Yanina T.A., Murray A.S., Semikolennykh D.V., Svistunov M.I., Shtyrkova E.I. Vozrast Karangatskoy transgressii (pozdnij pleystotsen) Chornogo morya [The age of the Karangatian (Late Pleistocene) transgression of the Black Sea], *Vestnik MGU Seriya 5. Geografiya*, 2019, no. 6, p. 29–39. (In Russian)

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Recent Deposits and Pleistocene Paleogeography, Senior Scientific Researcher, PhD in Geography; e-mail: kurbanov@igras.ru

² Institute of Geography RAS, Department of Quaternary Paleogeography, Senior Researcher; e-mail:

³ Institute of Geography of Russian Academy of Science, PhD student; Dasha.Semikolennykh@gmail.com

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography, Professor; Laboratory of Recent Deposits and Pleistocene Paleogeography, Head of the Laboratory, D.Sc. in Geography; e-mail: paleo@inbox.ru

⁵ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography, PhD student; e-mail: nictun@ail.ru

⁶ Aarhus University, Denmark, Department of Geosciences, Nordic Luminescence Laboratory, Professor; e-mail: andrew.murray@geo.au.dk

Murray A.S., Wintle A.G. The single aliquot regenerative dose protocol: potential for improvements in reliability *Radiation measurements*, 2003, no. 37(4–5), p. 377–381.

Nevevskaya L.A. *Pozdnechetvertichnye dvustvorchatye molluski Chornogo morya, ikh sistematika i ekologiya* [Late Quaternary bivalves of the Black Sea, their systematics and ecology], Moscow, Izd-vo AN SSSR Publ., 1965, 392 p. (In Russian)

Pilipenko O.V., Trubikhin V.M. Geologicheskaya i paleomagnitnaya korrelyatsiya pleystotsenovykh razrezov yuga Rossii, Ukrainy, Azerbaidzhan [Geological and paleomagnetic correlation of the Pleistocene sections of the south of Russia, Ukraine and Azerbaijan], *Bulletin of the Commission on Studying the Quaternary Period*, 2012, no. 72, p. 136–148. (In Russian)

Svitoch A.A. Stratotipy karangata Tamanskogo i Kerchenskogo poluostrovov (sravni-tel'nyy analiz) [Karangatian stratotypes of the Taman and Kerch Peninsulas (comparative analysis)]. *Doklady Akademii Nauk*, 2009, no. 424, p. 669–671. (In Russian)

Svitoch A.A., Blagodatskikh O.S., Bolshakov V.A., Yanina T.A. Novye dannye po malakofaune i paleomagnetizmu opornykh razrezov morskogo pleystotsena Tamanskogo poluostrova [New data on the malacofauna and paleomagnetism of the key sections of marine Pleistocene sediments of the Taman Peninsula]. *Doklady Akademii Nauk*, 2001, vol. 376, no. 1, p. 110–113. (In Russian)

Thiel C., Buylaert J.-P., Murray A.S., Terhorst B., Hofer I., Tsukamoto S., Frechen M. Luminescence dating of the Stratzing loess profile (Austria) – Testing the potential of an elevated temperature post-IR IRSL protocol. *Quaternary International*, 2011, no. 234, p. 23–31.

Yanko V.V., Frolov V.T., Motnenko I.V. Foraminifery i litologiya stratotipicheskogo razreza karangatskogo gorizonta (antropogen Kerchenskogo poluostrova) [Foraminifera and lithology of the stratotype section of the Karangatian layer (the Quaternary of the Kerch Peninsula)]. *Bull. MOIP. Otd. Geologii*, 1990, no. 65, p. 83–97. (In Russian)

Received 04.07.2020

Revised 18.07.2020

Accepted 06.08.2020

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ И МАТЕРИАЛОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2020 г.		
Авторы	№	Стр.
Авессаломова И.А. Биогеохимическая специализация растений полесских ландшафтов Озерной Мещеры	5	6
Аверкиева К.В. Участие горожан в развитии сельской местности: гостевые дома на Русском Севере	2	66
Агафонова Е.А., Полякова Е.И. Палеогеографические события в Двинском заливе Белого моря в послеледниковое время	5	73
Агирречу А.А. Студенческие учебные практики в первые десятилетия кафедры экономической географии СССР географического факультета МГУ	2	115
Александрова А.Ю. Изменения туристского геопространства в эпоху всеобщей мобильности	2	3
Алексеев А.И. Экономико-географическая характеристика по Баранскому: какой она может быть сегодня?	1	17
Аристархова Е.А., Сулова Е.Г., Шадчинов С.М. Разнообразие и распространение лишайников рода бриория (<i>Bryoria</i>) в Московской области	5	88
Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А., Никольский Н.В. Внутригодовая изменчивость поля температуры в Арктическом бассейне	2	100
Бабкин Р.А. Оценка численности населения муниципальных образований Московского столичного региона по данным операторов сотовой связи	4	1
Болысов С.И., Неходцев В.А. Концепция субрельефа подземных полостей	2	13
Бредихин А.В., Еременко Е.А., Харченко С.В., Беляев Ю.Р., Романенко Ф.А., Болысов С.И., Фузеина Ю.Н. Районирование Российской Арктики по типам антропогенного освоения и сопутствующей трансформации рельефа на основе кластерного анализа	1	42
Васильев О.Д. Картографирование средообразующих функций лесов и их сравнительный анализ в ландшафтах Московской области	6	21
Гаврилов А.А. Некоторые особенности соотношений орографических элементов и гидросети	6	99
Герасимова М.И., Головлева Ю.А., Лаврова А.М., Красильников П.В. Количественная оценка почвенного разнообразия при разных масштабах исследования на примере Республики Карелии	3	47
Гизатуллин А.Т., Алексеенко Н.А., Моисеева Н.А. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга возгораний торфопоразработок	2	45
Голосов В.Н., Кумани М.В., Иванова Н.Н., Беляев В.Р., Шамшурина Е.Н. Заиление малого водохранилища в условиях климатических изменений и урбанизации водосбора (Поповский пруд, г. Курск)	6	51
Горбаренко Е.В. Эмпирическая модель изменчивости компонентов радиационного баланса подстилающей поверхности	2	23
Гребенкина С.А., Хрусталева Е.Ю., Славянов А.С. Методические основы обеспечения устойчивого развития региона	1	63
Гречушников М.Г., Косицкий А.Г., Айбулатов Д.Н., Школьный Д.И., Алексеева А.А., Карашова М.И. Трансформация стока воды и осадконакопление Чернореченского водохранилища	1	97
Григорьев В.Ю., Миллионщикова Т.Д., Сазонов А.А., Чалов С.Р. Влияние изменения климатических параметров на сток рек бассейна Байкала во второй половине XX – начале XXI вв.	5	3

Авторы	№	Стр.
Даньшина А.В., Иванов В.В., Чанцев В.Ю. Изменения вертикальной устойчивости верхнего слоя моря Лаптевых на фоне сокращения ледяного покрова	6	110
Дрегуло А.М. Влияние климатических факторов на эксплуатацию природно-технических систем обработки отходов водоотведения	6	32
Дьяконов К.Н. Геофизические факторы положения верхней границы леса на экваториально-тропических островах Тихого и Индийского океанов	6	3
Енчилик П.Р., Семенков И.Н., Асеева Е.Н., Самонова О.А., Иовчева А.Д., Терская Е.В. Катенарная биогеохимическая дифференциация в южнотаежных ландшафтах (Центрально-Лесной заповедник, Тверская область)	6	121
Ерина О.Н., Терешина М.А., Ефимова Л.Е., Соколов Д.И. Современный режим биогенных веществ в Можайском водохранилище	3	81
Завадский А.С., Сурков В.В., Чернов А.В., Ботавин Д.В., Головлев П.П., Морозова Е.А. Природные территориальные комплексы поймы р. Москвы в нижнем течении в условиях интенсивного хозяйственного использования	3	3
Замятина Н.Ю., Гончаров Р.В. Арктическая урбанизация: феномен и сравнительный анализ	4	6
Землянский Д.Ю., Махрова А.Г., Медведникова Д.М. Методические подходы к составлению комплексных индексов социально-экономического развития городов	4	21
Земцов С.П., Шартова Н.В., Константинов П.И., Варенцов М.И., Кидяева В.М. Уязвимость населения районов Москвы к опасным природным явлениям	4	3
Килесо А.В., Демидов А.Н., Гриценко В.А. Орографический фактор в формировании вдольсклоновых течений в юго-восточной Балтике	3	1
Колесников С.Ф. Четвертичные отложения полуострова Широкостан	4	9
Кондратьев С.И., Видничук А.В. Вертикальное распределение кислорода и сероводорода в Черном море в 2016 г.	3	91
Королев А.Ю. Специализация и структура районов природоориентированного туризма	5	2
Крутских Н.В., Белашев Б.З. База данных вызовов скорой медицинской помощи как информационная основа геоэкологических исследований урбанизированных территорий	5	52
Крюков В.А., Голубева Е.И. Оценка вклада экологических и социальных факторов в комфортность проживания в Москве	4	32
Кудр Е.В., Кожин М.Н. История освоения и растительный покров острова Медвежий в Порьей губе Белого моря	5	79
Кузьмина Е.М., Чалов Р.С. Гидролого-морфологическая характеристика широкопойменного разветвленного русла Средней Лены	1	87
Куксина Л.В., Голосов В.Н., Промахова Е.В. Причины возникновения и география внезапных ливневых паводков	1	11
Куракова А.А., Чалов Р.С. Морфология русла и размывы берегов нижней Оби (в пределах ХМАО-Югры)	6	41
Курбанов Р.Н., Семиколенных Д.В., Янина Т.А., Тюнин Н.А., Мюррей Э.С. Новые данные о возрасте карангатской трансгрессии Черного моря	6	139
Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Неверов Н.А. Новые данные о влиянии тектонических узлов на состояние окружающей среды на севере Русской плиты.	5	12
Листван М.И. Экономико-географические особенности «сланцевой революции» в США	1	114

Авторы	№	Стр.
Малахова Т.В., Малахова Л.В., Будников А.А., Иванова И.Н. Пространственно-временная изменчивость содержания метана в Севастопольской бухте и его эмиссии в атмосферу	3	73
Мишурицкий Д.В., Бредихин А.В. Рекреационно-геоморфологическое информационное обеспечение туристической деятельности	4	42
Морачевская К.А., Зиновьев А.С., Краснов А.И., Краснова М.В. Динамика территориальной структуры молочной отрасли российско-белорусского приграничья в 2010-е годы	3	63
Мороз Е.А., Зарайская Ю.А., Сухих Е.А., Соколов С.Ю., Ермаков А.В., Абрамова А.С. Рельеф и строение верхней части осадочного чехла в районе свода Федынского по акустическим данным	2	82
Низовцев В.А., Новенко Е.Ю., Эрман Н.М., Мазей Н.Г., Матасов В.М., Лаврова Н.Б., Филимонова Л.В. Эволюция ландшафтов бассейна Средней Протвы в голоцене	1	73
Рахуба А.В., Шмакова М.В. Моделирование распределения мутности воды в Куйбышевском водохранилище	4	51
Репкина Т.Ю., Луговой Н.Н., Романенко Ф.А., Лукьянова С.А. Берега Российской Арктики: виды и хронология антропогенных изменений	6	10
Рогов В.В., Стрелецкая И.Д., Таратунина Н.А., Курчатова А.Н., Курбанов Р.Н., Янина Т.А. Позднеплейстоценовый криогенез в Нижнем Поволжье	6	73
Романов А.А., Коблик Е.А., Редькин Я.А., Кожемякина Р.В., Яковлев В.О., Мурашев И.А., Попов И.Ю. Авифауна острова Уруп (Большая Курильская гряда)	5	98
Рябушко В.И., Козинцев А.Ф., Тоичкин А.М. Пространственное распределение мышьяка в прибрежье Крымского полуострова (Черное и Азовское моря)	4	14
Савоскул М.С. Иммиграция в ФРГ во второй половине XX века	6	86
Серых И.В., Толстиков А.В. О причинах долгопериодной изменчивости приповерхностной температуры воздуха над Белым морем	4	83
Сидорчук А.Ю. Формирование комплекса террас в речной долине: опыт морфологического анализа	1	3
Слука Н.А., Колясев Е.Ф. География центров международных организаций	5	1
Слука Н.А., Кузовлев С.С. Современный образ Парижа в русскоговорящем сегменте Интернета	2	110
Смирнова А.А. Изменение низовой муниципальной структуры региона: тверской опыт	5	1
Смирнов И.П., Смирнова А.А., Ткаченко А.А. Итоги проведения политики сселения малых деревень в Нечерноземье (на примере Тверской области)	4	1
Смирнова М.А., Геннадиев А.Н., Чендев Ю.Г. Влияние лесополос на накопление полиаренов в почвах (Белгородская область)	3	14
Стефанович А.А., Воскресенская Е.Н., Лубков А.С. Оценка биоклиматического потенциала черноморских курортов Крыма для развития туризма в регионе	5	35
Тихоцкая И.С., Баратинский В.И. Типология городских зон занятости в Японии	2	73
Тургунов Д.М., Сазонов А.А., Хикматов Ф.Х., Фролова Н.Л. Маловодья на горных реках Республики Узбекистан: причины и особенности	1	23
Федотова А.А., Демидов А.Н., Артамонова К.В. Водные массы моря Содружества	1	101

Авторы	№	Стр.
Харченко С.В., Шварев С.В. Прогнозирование оползневой опасности в окрестностях Красной Поляны на основе линейного дискриминантного анализа	3	22
Хусаинова А.С., Замятина Н.Ю. Территориальная этническая эксклюзия в Загребе	6	134
Цибульникова М.Р. Роль природного капитала в устойчивом развитии региона	3	1
Чалов С.Р., Цыпленков А.С. Роль крупномасштабной турбулентности в изменении мутности речных вод	3	34
Чистяков П.А., Ромашина А.А., Петросян А.Н., Шевчук Е.И., Бабурин В.Л. Центры экономического роста Российской Федерации на муниципальном уровне	4	58
Чупина В.И. Почвы Никитского ботанического сада и их геоботанические свойства	1	31
Чурюлина А.Г., Бочарников М.В., Огуреева Г.Н. География караганы гривастой (<i>saragana jubata</i> (pall.) poir.) и ее фитоценотическая роль в растительном покрове гор	3	1
Чучкалов А.С., Алексеев А.И. Эффект колеи в эволюции сельских населенных пунктов Республики Марий Эл	2	53
Шартова Н.В., Крайнов В.Н., Малхазова С.М., Тикунов В.С. Пространственный анализ смертности городского населения	5	45
Эдельштейн К.К., Гречушникова М.Г., Гончаров А.В. Влияние изменчивости погоды на биопродуктивность водохранилища	2	36
Яицкая Н.А., Магаева А.А. Ледовый режим Северного Каспия	6	63

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 опубликованию 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), 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. 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 номерам рисунков (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. 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)-939-29-23. Сайт журнала <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/index>. Электронная почта: vestnik_geography@mail.ru

Плата за публикацию не взимается.

УЧРЕДИТЕЛИ:

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;
географический факультет МГУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

С.А. ДОБРЮЛОВ, доктор географических наук, профессор, член-корреспондент 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, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, professor (*Editor-in-chief*)
V.S. TIKUNOV, doctor of science, professor (*Deputy Editor-in-chief*)
E.A. EREMENTKO, candidate of science (*Secretary-General*)
A.I. ALEKSEEV, doctor of science, professor
S.I. BOLYSOV, doctor of science, professor
K.N. D'YAKONOV, doctor of science, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, professor
N.L. FROLOVA, doctor of science, professor
A.N. GENNADIYEV, doctor of science, professor
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. KONECNÝ, 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)
V.E. SHUVALOV, candidate of science, associate professor
S.A. SOKRATOV, candidate of science, PhD
P.E. TARASOV, professor (Free Berlin University, Germany)
T.A. YANINA, doctor of science, professor
V.V. YANKO-KHOMBACH, doctor of science, professor (Avalon Institute of Applied Sciences, Winnipeg, Canada)
S.S. ZILITINKEVICH, doctor of science, professor (Finnish Meteorological Institute, Finland)
O.G. ZOLINA, professor (Fourier University, Grenoble, France)

Номер подготовили члены редколлегии

К.Н. ДЪЯКОНОВ, Т.А. ЯНИНА

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 Сут. Бумага офсет. № 1. Офсетная печать. Усл. печ. л. 18
Уч.-изд. л. 00,0. Тираж экз. Изд. № 00000. Заказ №

Типография МГУ.

119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 15.