

# Вестник Московского университета

Серия 5 ГЕОГРАФИЯ

Издательство Московского университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в ноябре 1946 г.

2024 • Т. 79 • № 4

ИЮЛЬ–АВГУСТ

Выходит один раз в два месяца

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### *Динамика природных процессов*

- Голосов В.Н., Мавлюдов Б.Р., Харченко С.В., Навас А., Гаспар Л., Лизага И., Кастильо А.* Сток наносов на малом приледниковом водосборе (остров Кинг Джордж (Ватерлоо), Антарктика) ..... 3
- Высоцкая А.А., Медведков А.А.* Климатогенные изменения ландшафтов курумов на западе Среднесибирского плоскогорья в зональных условиях средней тайги ..... 17
- Дьяконов К.Н., Мазей Н.Г., Прокушкин А.С., Шатунов А.Е., Зазовская Э.П., Новенко Е.Ю.* Депонирование углерода в карстовом болоте Мордовского заповедника в позднем голоцене ..... 30

### *Методы географических исследований*

- Ильин В.И., Архипкин В.С.* Особенности приливного водообмена в Курильских проливах по данным моделирования ..... 44
- Хорошев А.В.* Концепция структурной карты геосистем ..... 55

### *География и экология*

- Котельянец Е.А., Совга Е.Е., Коновалов С.К.* Пространственное распределение тяжелых металлов в донных отложениях бухт Севастопольского региона ..... 68
- Кузина А.А., Минникова Т.В., Гайворонский В.Г., Ревина С.Ю., Колесников С.И.* Лабораторное моделирование экологически безопасных концентраций мазута в почвах Крыма ..... 80

### *Региональные исследования*

- Чендев Ю.Г., Геннадиев А.Н., Смирнова М.А., Лебедева М.Г.* Лесные полосы как фактор почвообразования в агроландшафтах юга Среднерусской возвышенности ..... 94
- Свиточ А.А.<sup>†</sup>, Макшаев Р.Р., Ключиткина Т.С., Ткач А.А.* К вопросу о гирканских отложениях Нижней Волги ..... 109
- Чалов Р.С., Голубцов Г.Б., Завадский А.С., Куракова А.А.* Условия формирования и особенности морфодинамики разветвленного русла среднего Иртыша ..... 119

### *Краткие сообщения*

- Блажевич Ф.В., Слуга Н.А.* География «фабрик мысли» ..... 133

CONTENTS

***Dynamics of natural processes***

<i>Golosov V.N., Mavlyudov B.R., Kharchenko S.V., Navas A., Gaspar L., Lizaga I., Castillo A.</i> Sediment runoff formation in a small periglacial catchment on the King George (Vaterloo) island, Antarctica.....	3
<i>Vysotskaya A.A., Medvedkov A.A.</i> Climate-driven changes of Kurum landscapes in the west of the central Siberian plateau within the middle taiga zone.....	17
<i>Dyakonov K.N., Mazei N.G., Prokushkin A.S., Shatunov A.E., Zazovskaya E.P., Novenko E.Yu.</i> Carbon sequestration in a karst mire of the Mordovian reserve during the late Holocene.....	30

***Methods of geographical research***

<i>Iljin V.I., Arkhipkin V.S.</i> Specific features of tidal exchange in the Kuril straits according to modeling data.....	44
<i>Khoroshev A.V.</i> The concept of a structural map of geosystems.....	55

***Geography and ecology***

<i>Kotelyanets E.A., Sovga E.E., Kononov S.K.</i> Spatial distribution of heavy metals in the bottom sediments of bays of the Sevastopol region.....	68
<i>Kuzina A.A., Minnikova T.V., Gaivoronsky V.G., Revina S.Yu., Kolesnikov S.I.</i> Laboratory modeling of environmentally safe concentrations of fuel oil in the soils of Crimea.....	80

***Regional studies***

<i>Chendev Yu.G., Gennadiev A.N., Smirnova M.A., Lebedeva M.G.</i> Shelterbelts as a factor of soil formation in agrolandscapes of the southern part of the central Russian upland.....	94
<i>Svitoch A.A.†, Makshaev R.R., Klyuvitkina T.S., Tkach A.A.</i> On the Hyrkanian sediments of the lower Volga region.....	109
<i>Chalov R.S., Golubtsov G.B., Zavadskiy A.S., Kurakova A.A.</i> Conditions responsible for the formation and morphodynamics features of the middle Irtysh branched channel.....	119

***Short communications***

<i>Blazhevich F.V., Sluka N.A.</i> Geography of “think tanks”.....	133
--	-----

## ДИНАМИКА ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 551.4.042

### СТОК НАНОСОВ НА МАЛОМ ПРИЛЕДНИКОВОМ ВОДОСБОРЕ (ОСТРОВ КИНГ ДЖОРДЖ (ВАТЕРЛОО), АНТАРКТИКА)

В.Н. Голосов<sup>1</sup>, Б.Р. Мавлюдов<sup>2</sup>, С.В. Харченко<sup>3</sup>, А. Навас<sup>4</sup>,  
Л. Гаспар<sup>5</sup>, И. Лизага<sup>6</sup>, А. Кастильо<sup>7</sup>

<sup>1,3</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет*  
<sup>1-3</sup> *Институт географии РАН*

<sup>4,5</sup> *Испанский национальный исследовательский совет, Сарагоса, 50059, Испания*  
<sup>6</sup> *Гентский университет, 9000, Гент, Бельгия*

<sup>7</sup> *Южный университет Чили, Лас Энсинас, 220, Вальдивия, Чили*

<sup>1</sup> *Лаборатория эрозии почв и русловых процессов, вед. науч. сотр., д-р геогр. наук;*  
*e-mail: gollossov@gmail.com*

<sup>2</sup> *Отдел гляциологии, ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: bulatrm@bk.ru*

<sup>3</sup> *Кафедра геоморфологии и палеогеографии, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук;*  
*e-mail: xar4enkoff@yandex.ru*

<sup>4</sup> *Экспериментальная станция Аула Деи, проф., д-р геогр. наук; e-mail: anavas@eead.csic.es*

<sup>5</sup> *Экспериментальная станция Аула Деи, постдок, канд. геогр. наук; e-mail: lgaspar@eead.csic.es*

<sup>6</sup> *Департамент зеленой химии и технологии, постдок, канд. геогр. наук; e-mail: Ivan.Lizaga@UGent.be;*

<sup>7</sup> *Институт химических наук, проф., д-р геогр. наук; e-mail: acastill@uach.cl*

Глобальные климатические изменения наиболее значимо повлияли на приполярные регионы. Повышение температуры воздуха стимулировало таяние ледников в Арктике и Антарктике, что способствовало изменениям в формировании стока воды и наносов. Однако количественных оценок особенностей перераспределения наносов в приледниковых водосборах приполярных регионов крайне мало. Особенности стока воды и наносов исследованы в пределах водосбора ручья Корабельный, расположенного на полуострове Файлдс в Антарктиде рядом с ледниковым куполом Беллинсгаузен. Основная цель исследования состояла в изучении условий формирования стока воды и наносов и выявлении долевого вклада в сток наносов ручья продуктов смыва и размыва, поступающих с приледниковой и внеледниковой частей его водосбора. Набор методов и подходов, включая: а) оценки индекса связности потоков наносов; б) метод поиска питающих провинций; в) гидрометеорологические наблюдения; г) крупномасштабную геоморфологическую съемку, был использован для выявления условий формирования поверхностного стока и смыва, механизмов перераспределения наносов в различных звеньях флювиальной сети и количественной оценки соотношения долевого вклада различных источников наносов в сток наносов ручья. Для проведения геохимических и спектрометрических анализов почв и отложений использовалась фракция с размером частиц  $\leq 63$  мкм. Всего было проанализировано содержание в общей сложности 34 элементов: 6 радиоизотопов, а также 28 стабильных элементов. Установлено, что, несмотря на существенные различия в строении рельефа приледниковой и внеледниковой частей водосбора, индексы связности потоков наносов достаточно близки и составляют  $-1,35$  и  $-1,79$  соответственно. Значительная часть материала, транспортируемого временными потоками со склонов водосбора, переоткладывается в понижениях рельефа, частично занятых водоемами. Основной объем наносов, составляющий не менее 60–66% от суммарного стока наносов, в замыкающем створе ручья Корабельного поступает с приледниковой части водосбора. Это связано с повышенными относительно внеледниковой части водосбора расходами воды, формирующимися за счет таяния снега и льда, накапливающихся на ледниковом куполе, высокой размываемостью моренных отложений, не защищенных растительным покровом, и наличием ледяного ядра в моренах, которое препятствует фильтрации воды.

**Ключевые слова:** глобальные изменения климата, перераспределение наносов, эрозия, аккумуляция, морена

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.1

## ВВЕДЕНИЕ

Последние десятилетия характеризуются значительными климатическими изменениями, которые наиболее ощутимы в приполярных областях [Mokhov, Parfenova, 2021]. В Антарктике тренд повышения температур выявлен только в пределах Антарктического полуострова с 1960-х гг., а начиная с 2000-х гг. дальнейшего повышения среднегодовых температур не наблюдается, хотя отмечается высокая межгодовая вариабельность [Turner et al., 2019]. Повышение температур воздуха, зафиксированное в Арктике, провоцирует увеличение стока воды и наносов на водосборах малых ручьев и рек [Beel et al., 2018] и способствует росту стока наносов в Мировой океан [Syvitski, 2002]. Немногочисленные данные об условиях формирования стока воды и наносов на малых приледниковых водотоках Антарктического полуострова [Rosa et al., 2014; Kavan et al., 2017] указывают на то, что они в целом аналогичны условиям, наблюдающимся на приледниковых водотоках различных частей арктической зоны [Hodson et al., 1998; Hodgkins et al., 2003].

Широко используемые подходы к оценке особенностей поступления наносов с различных участков исследуемого водосбора в постоянный водоток включают метод поиска питающих провинций (ППП) [Koiter et al., 2013; Owens et al., 2016] и расчет коэффициента доставки наносов на основе выявления связности потоков наносов [Borselli et al., 2008]. Каждый из этих подходов имеет свои ограничения. Метод ППП наиболее эффективен для различных источников наносов, генетически отличающихся друг от друга, которые содержат в своем составе химические элементы или другие измеряемые свойства (цвет, органическое вещество и т. д.) химически пассивные при транспортировке наносов со склона и могут быть идентифицированы уже в стоке наносов водотока [Collins et al., 1996; Haddadchi et al., 2013]. Достоверность оценок долевого вклада различных источников в сток наносов возрастает с ростом числа подобных трассеров, используемых в расчетах [Lizaga et al., 2020]. Использование данного метода предполагает гидро-геоморфологическую оценку путей доставки наносов со склонов и их последующего транспорта в постоянном водотоке.

Расчет связности потоков наносов, который базируется на анализе цифровых моделей рельефа (ЦМР), отчасти количественно характеризует особенности путей доставки наносов в различных частях водосбора [Cavalli et al., 2013]. Но при этом должно учитываться проективное покрытие поверхности склонов растительностью, во многом определяющее возможности склонового потока

производить отрыв частиц почвы или отложений и их последующую транспортировку [Coulthard, Van De Wiel, 2017]. Использование набора методов и подходов позволяет охарактеризовать механизмы формирования стока наносов для конкретного водосбора без проведения длительных мониторинговых наблюдений.

Цель данного исследования состоит в оценке условий формирования стока наносов на водосборе малого приледникового водотока, расположенного на западе острова Кинг-Джордж (Ватерлоо), и оценке долевого вклада основных источников наносов, поставляющих материал, смываемый с площади водосбора во временные водотоки и непосредственно в основной ручей.

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Водосбор ручья Корабельный располагается на полуострове Файлдс острова Кинг Джордж (Ватерлоо), который является самым большим островом в архипелаге Южных Шетландских островов (рис. 1). Ручей протекает вдоль западного края ледникового купола Беллинсгаузен. Его водосбор общей площадью 2,83 км<sup>2</sup> состоит из двух частей. Первая, приледниковая, включает ледниковую часть водосбора площадью 1,16 км<sup>2</sup> [Braun et al., 2001] и область распространения отложений краевых морен ледника, которая протягивается поясом вдоль края ледника и имеет площадь 0,32 км<sup>2</sup>. Остальная часть водосбора площадью 1,35 км<sup>2</sup> занимает восточную часть Центрального массива (возвышенность Дейвиса) и разделяющую ее и ледник приморскую равнину. Данная часть водосбора сложена коренными породами, местами перекрытыми маломощным чехлом рыхлообломочных отложений различного генезиса (кора выветривания коренных пород, делювиальные отложения, аллювий), на которых сформировались почвы мощностью 10–15 см, представленные литоземами, петроземами и криоземами [Абакумов, Андреев, 2011].

В составе растительного покрова на внеледниковой части водосбора преобладают низшие растения – лишайники, мхи, грибы, водоросли. Они, наряду с сосудистыми растениями, представленными щучкой *Deshampsia antarctica* [Абакумов, Андреев, 2011], формируют преимущественно разреженный растительный покров с проективным покрытием 0–80%. Граница между приледниковой и внеледниковой частями водосбора проходит по внешнему краю вала конечной морены ледника. Морена с ледяным ядром протягивается вдоль ледника, но прерывается достаточно широким понижением, по которому сток с ледника и приледниковой части водосбора поступает в озеро Месяц, служащее истоком ручья Корабельного (см. рис. 1).

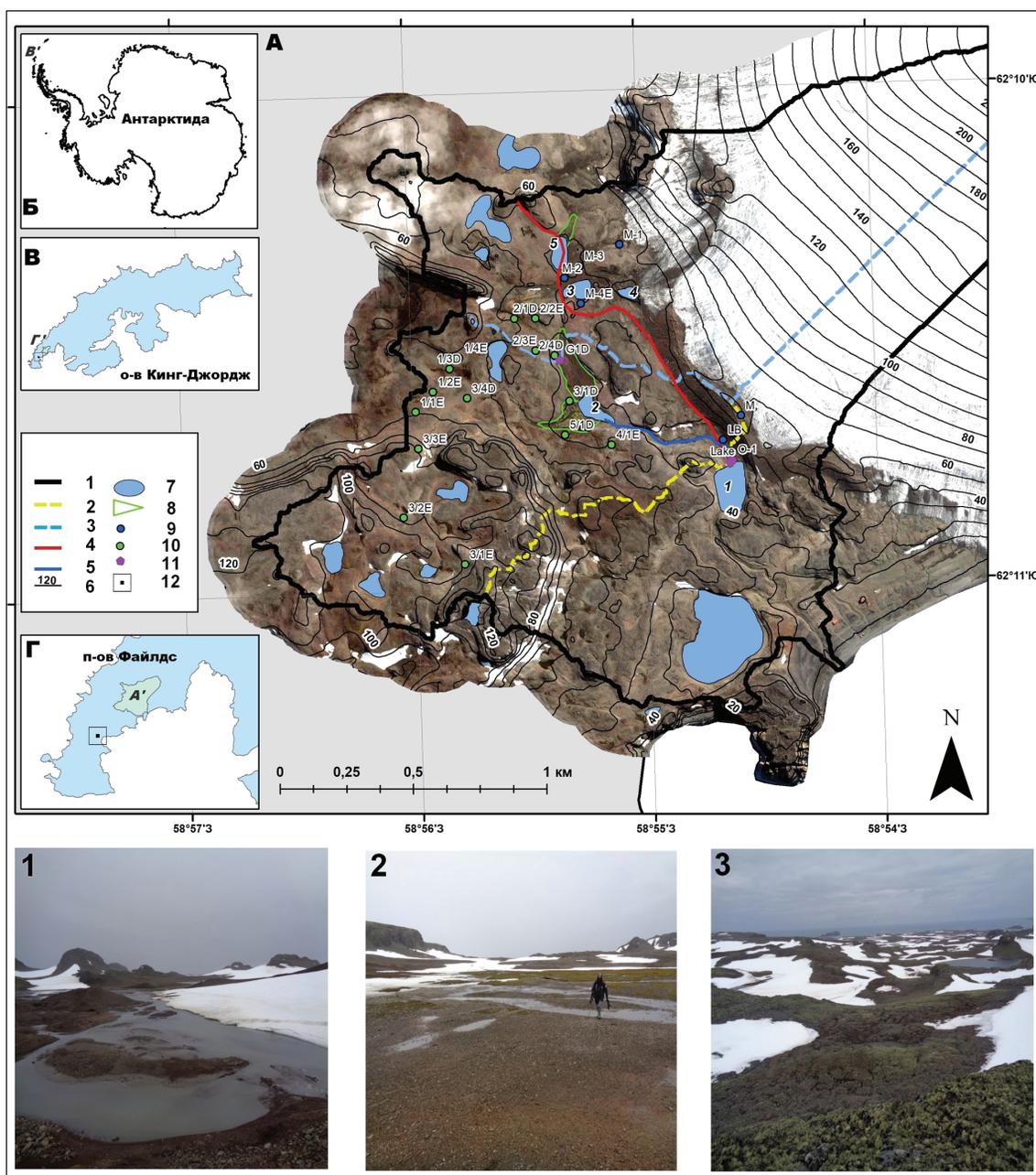


Рис. 1. Расположение водосбора руч. Корабельный в пределах полуострова Файлдс и гидрографическая сеть ручья: 1 – граница водосбора; 2 – граница подводосбора точек отбора проб грунта на берегу и дне оз. Приледникового; 3 – граница подводосбора точки отбора проб в котловине оз. Месяц; 4 – граница внеледниковой и приледниковой частей водосбора; 5 – исследованный участок руч. Корабельный; 6 – изолинии, м над уровнем моря; 7 – озера (1 – Приледниковое; 2 – Месяц; 3–5 – мелкие водоемы, улавливающие часть наносов, поступающих из приледниковой области); 8 – дельты ручьев, впадающих в оз. Месяц; 9 – точки пробоотбора в приледниковой области; 10 – точки пробоотбора во внеледниковой области; 11 – точки отбора смешанных проб в областях аккумуляции наносов; 12 – метеостанция. Фотографии: 1 – временный водоем, сформировавшийся по краю ледника; 2 – приморская равнина, слева уступ Центрального массива; 3 – рельеф Центрального массива с отдельными озерными котловинами, перехватывающими значительную часть стока воды и наносов

Fig. 1. Location of the catchment of the Korabelny Stream within the Fildes Peninsula and the hydrographic network of the stream: 1 – boundary of the catchment; 2 – boundary of the catchment above the locations where sediment mixtures were taken upstream from the Prilednikovoe Lake and from bottom of this lake; 3 – boundary of the catchment above the location where a sediment mixture was taken near the Lake Mesyats; 4 – boundary between the proglacial and periglacial parts of the catchment; 5 – studied reach of the Korabelny stream; 6 – contours, m a.s.l.; 7 – lakes (1 – Prilednikovoe; 2 – Mesyats; 3–5 – shallow waterbodies trap some sediment transported from the glacierized part of the catchment); 8 – deltas of Lake Mesyats; 9 – sampling points of sediment sources in the glacierized part of the catchment; 10 – sampling points of sediment sources in the periglacial part of the catchment; 11 – sampling points of sediment mixtures; 12 – the meteorological station. Photos: 1 – temporary water body formed along the edge of the glacier; 2 – coastal plain and on the left outcrop of the Northern Tablelands; 3 – relief of the Northern Tablelands with separate lake catchments intercepting a significant part of the water and sediment runoff

Коренные породы водосбора ручья представлены в основном магматическими лавами различного состава. Согласно [Smellie et al., 1984], вдоль края ледника полосой протягивается андезит-дацитовая лава. За ней следует расширяющаяся к западу полоса базальтовой лавы. Часть Центрального массива сложена агломератами и также андезит-дацитовыми лавами. Эти участки разделены интрузией основного и среднего состава.

Центральный массив возвышается над окружающей его приморской равниной, сформировавшейся в период повышения уровня моря. Он отделяется от равнины достаточно крутым уступом, местами прорезанным эрозионными понижениями. Относительные высоты в пределах водосбора ручья составляют около 70–80 м. Склоны в пределах Центрального массива достаточно короткие и часто крутые. В пределах приморской равнины преобладают склоны средней длины вогнутой формы, что создает условия для переотложения части наносов у их подножий. Для приледниковой части водосбора

характерно наличие моренных гряд и понижений. Часть понижений в сезон абляции трансформируется в неглубокие водоемы, которые из-за небольших размеров и малой глубины являются проточными. Краевая моренная гряда с ледяным ядром имеет крутой внешний склон, обращенный к днищу притоков ручья Корабельный. Перед участком понижения моренной гряды сохранились небольшие моренные холмы.

Для района исследований характерны относительно небольшие внутригодовые перепады температур воздуха и умеренное количество осадков, которое составляет в среднем 700 мм/год. Несмотря на большие запасы снега и отсутствие низких температур в холодное время года, промерзание почвы распространено повсеместно в пределах водосбора. Постоянный сток в ручье Корабельном формируется в период сезона абляции, продолжающегося с декабря по март, иногда до начала апреля, когда среднемесячные температуры воздуха положительные (табл. 1).

Таблица 1

**Некоторые метеорологические характеристики теплого времени года (декабрь–март)  
за период 2009–2020 гг.**

Параметры	2009/2010	2010–2014	2014/2015	2015–2019	2019/2020
Средняя температура в XII/I/II/III месяце, °С	0,1/0,5/0,2/0,0	–0,4/0,8/0,9/0,3	0,4/0,7/1,4/0,8	0,3/1,1/1,3/0,8	0,5/2,7/2,5/0,8
Средняя температура за декабрь–март, °С	0,2	0,4	0,65	0,88	1,6
Продолжительность периода абляции, дни	124	110	117	128	156
Сумма среднесуточных $T > 0$ , °С	98,6	116,7	108,9	141,2	250,3
Число дней с $T > 0/T < 0$	84/40	87/23	86/31	97/31	118/38
Доля дней с $T < 0$ в течение сезона абляции, %	32	21	27	24	24
Количество атмосферных осадков за декабрь–март, мм	258,9	222,7	250,6	259,7	240
Число дней с дождем/с дождем и снегом или со снегом за декабрь–март	21/67	51/43	75/34	60/55	38/21
Число дней с туманами	–	23	33	41	–

Для полуострова Файлдс отмечается тренд постепенного роста температур воздуха в теплое время года, прерывавшийся понижением температуры в 2012–2013 гг. Летом в среднем выпадает около трети годового слоя осадков, преимущественно в виде дождя, дождя со снегом или мокрого снега. Сход снега с площади водосбора ручья происходит постепенно, и к началу января площадь проталин

начинает превышать 50%. Именно после этого начинается формирование стока наносов.

Установлена достаточно тесная связь между ходом температуры воздуха и расходами воды для большей части сезона абляции [Chinarro, 2014]. Исключением являются начальный и заключительный периоды, на долю которых приходится от трети до четверти от общей продолжительности сезона абля-

ции, когда ночные температуры регулярно переходят через  $0^{\circ}$  [Chinarro, 2014]. Для основной части сезона абляции, составляющего в разные годы от 2,5 до 4–5 месяцев (см. табл. 1), характерна положительная температура воздуха в течение всех суток с редкими понижениями ночных температур ниже нуля, что способствует непрерывному таянию снега и льда.

Гидрографическая сеть водосбора ручья включает серии озер и временных водоемов, формирующихся в основном в приледниковой части водосбора, в том числе и в его основном русле (см. рис. 1). Большая часть стока с внеледниковой и приледниковой частей водосбора, состоящих из приморской равнины (см. рис. 1-1) и Центрального массива (возвышенность Дейвиса) (см. рис. 1-2), поступает в озеро Месяц.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для выполнения основной задачи исследований, состоящей в количественной оценке долевого вклада наносов, поступающих в ручей Корабельный с приледниковой и внеледниковой частей водосбора, применялись два независимых метода. Для использования метода ППП в пределах внеледниковой части бассейна ручья было выделено пять подводосборов, поставляющих наносы в русла временных и постоянных водотоков. В пределах каждого подводосбора были отобраны пробы почв на склонах и переотложенных наносов в днищах понижений (см. рис. 1). Приледниковая часть рассматривалась как единый подводосбор. Здесь были отобраны пробы отложений морены и наносов. В качестве смешанных были отобраны три пробы свежих наносов, отложившихся на участках впадения временного водотока, дренирующего большую часть приледниковой и восточную часть внеледниковой частей водосбора в озеро Месяц, также пробы из ручья Корабельного в месте впадения его в озеро Приледниковое и донных наносов из озера Приледникового.

Каждая проба отбиралась в 3–4 укола с помощью пробоотборника с внутренним диаметром 5 см с поверхности до глубины 1,8 см. Проба донных отложений отобрана из озера Приледникового пробоотборником USC 06000 фирмы UWTEC с внутренним диаметром 6,3 см. Для целей данного исследования использовался только приповерхностный слой данной пробы мощностью 2,5 см.

Всего для аналитических работ в лаборатории было отобрано 23 пробы почвы и отложений. Образцы почв и наносов были высушены, измельчены, гомогенизированы и просеяны. Для проведения анализов использовалась фракция с размером частиц  $\leq 63$  мкм, которая была выделена методом сухого просеивания после сушки, измельчения и

перемешивания навески [Owens et al., 2016]. Размер зерен во фракции  $\leq 63$  мкм анализировали методом лазерной дифрактометрии после удаления органического вещества. Всего было проанализировано содержание в общей сложности 34 элементов: 6 радиоизотопов и 28 стабильных элементов [Navas, Machin, 2002].

Органический углерод почвы (SOC), а также фракции активного и стабильного углерода анализировали с помощью многофазного анализатора углерода LECO RC-612 (LECO Corporation, Сент-Джозеф, Мичиган, США, LECO). Фракционирование фракций SOC проводили в соответствии с протоколами. Содержание неорганического углерода в почве (SIC) (%) анализировали с использованием метода кальциметра давления [Gaspar et al., 2019].

Анализ радиоизотопов  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  проводились с использованием сверхчистого германиевого коаксиального гамма-детектора с высоким разрешением и низким фоном (Canberra Xtra, КПД 50%, разрешение 1,9 кэВ). Калибровка проводилась с использованием стандартных сертифицированных образцов той же геометрии, что и измеряемые образцы. Активность  $^{137}\text{Cs}$  определяли по фотопику 661,6 кэВ;  $^{210}\text{Pb}$  измерено при 46,5 кэВ;  $^{226}\text{Ra}$  определяли по линии 351,9 кэВ  $^{214}\text{Pb}$ , короткоживущих дочерних изотопов  $^{226}\text{Ra}$ , после достижения равновесия. Атмосферную составляющую  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  оценивали вычитанием содержания  $^{226}\text{Ra}$  из общего  $^{210}\text{Pb}$ ;  $^{238}\text{U}$  определен по линии 63 кэВ  $^{234}\text{Th}$ ;  $^{232}\text{Th}$  оценивался по фотопику  $^{228}\text{Ac}$  с энергией 911 кэВ, а  $^{40}\text{K}$  определялся по фотопику с энергией 1461 кэВ. Время счета 86 400 с. Активность радионуклидов определялась в Бк/кг сухой почвы.

Анализ долевого вклада наносов, поступающих в озеро Месяц и далее в озеро Приледниковое, произведен с использованием алгоритма FingerPro (пакет языка R) [Lizaga et al., 2020]. Все трассеры были протестированы на предмет возможности их использования для определения долевого вклада наносов, поступающих из двух основных источников.

Для выявления вклада различных источников в наносы, отобранные на участке впадения ручья Корабельного в озеро Месяц, оказались репрезентативными следующие трассеры: гранулометрический состав наносов – массовая доля алеврита (63–2 мкм), содержание  $^{232}\text{Th}$ , концентрация В, общий углерод, а также его стабильная фракция. Для наносов, отобранных на участке впадения ручья Корабельного в озеро Приледниковое и в самом озере (приповерхностный слой донных отложений), репрезентативны концентрации Р, Ti, Pb, Al, Na, Ca,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ .

Другой подход к оценке долевого вклада различных частей водосбора ручья Корабельного в сток

наносов базируется на оценке индекса связности потоков наносов [Borselli et al., 2008; Cavalli et al., 2013]. Для картирования данного индекса использовалась цифровая модель рельефа REMA с разрешением 2 м [Howat et al., 2022]. Подход основан на расчете отношения шансов отрыва рыхлообломочных частиц и доставки их в приемный бассейн. Восходящая составляющая пропорциональна средним значениям топографической шероховатости и крутизны выше по склону, квадратному корню из водосборной площади, нисходящая – прямо пропорциональна длине склона, обратно пропорциональна топографической шероховатости и крутизне участка склона в пикселе, для которого проводится расчет. Их соотношение тем выше, чем выше шансы на отрыв частиц от поверхности и ниже вероятность их переотложения вниз по падению склона. От логарифма отношения шансов (connectivity index) нетрудно перейти к вероятности сноса и доставки рыхлообломочных частиц в приемный бассейн/устьевую точку водосбора – коэффициенту доставки наносов (sediment delivery ratio, SDR) согласно следующему выражению:

$$SDR = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{IC_0 - IC}{k}\right)},$$

где  $IC_0$  – нулевое значение индекса связности потоков наносов, выше которого преобладает вынос и транзит наносов, ниже аккумуляция. Чаще используется значение 0,5, хотя этот параметр нуждается в калибровке на местности и может быть как меньше, так и больше этой величины;  $IC$  – рассчитанное значение индекса связности потоков наносов в каждом пикселе;  $k$  – параметр формы связи между индексом связности потоков наносов и SDR. Чем он ниже, тем более резок скачок в доле доставляемых в приемный бассейн наносов из мобилизованной их массы. В первом приближении он может быть равен 1.

Само значение вклада разных частей водосбора в итоговый баланс наносов рассчитывалось для этих частей как произведение их площади и среднего SDR. Затем суммарная величина для всего водосбора принималась за 100%, и определялись доли каждой из частей.

Так как коэффициент доставки наносов зависит от проективного покрытия поверхности почв (ПРПП) или отложений растительностью, то необходимо учитывать изменения ПРПП по площади водосбора. Для приледниковой части водосбора оно неизменно в период снеготаяния и фактически равно 0 (рис. 2А). В пределах приморской равнины ПРПП изменяется по площади и по мере схода снега варьирует от 0 до 60–80%. Растительностью осваиваются в основном плоские участки в по-

нижениях (см. рис. 2Б). На склонах возвышенных участков на приморской равнине наибольшая густота растительного покрова отмечена в верхних частях склонов (см. рис. 2В), тогда как вниз по склону ПРПП снижается до 0–20%. Аналогичная ситуация характерна и для склонов Центрального массива, но здесь ПРПП на привершинных участках достигает 80% (см. рис. 2Г).

Для анализа используются данные метеорологических наблюдений на станции Беллинсгаузен, расположенной к западу от водосбора (см. табл. 1). Визуальные наблюдения за динамикой схода снега и особенностями формирования стока воды на водосборе ручья Корабельного в период снеготаяния выполнялись в период 2011–2020 гг.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Формирование стока воды и наносов на водосборе ручья Корабельного контролируется в основном двумя факторами – особенностью строения рельефа и динамикой схода снега. Причем для внеледниковой и приледниковой частей водосбора оба эти фактора достаточно тесно взаимосвязаны. Рельеф определяет особенности накопления и схода снежного покрова. В пределах внеледниковой части водосбора снег сдувается с привершинных участков и накапливается в понижениях. В результате именно привершинные участки склонов раньше освобождаются от снега. Это приводит к тому, что на начальной фазе снеготаяния происходит постепенное насыщение оттаивающей почвы влагой. По мере появления проталин на привершинных участках формирующийся поверхностный сток уже в средних частях склона фильтруется в сохранившиеся снежники. Фактически размыв поверхности почвы начинается только с момента появления проталин. Это способствует более быстрому добеганию стока до ложбинных понижений, в которых происходит концентрация стока воды. Формирующиеся таким образом в ложбинах потоки способны прорезать русла в снежниках, сохранившихся на их пути. По мере слияния отдельных потоков уже на плоских участках понижений приморской равнины потоки, частично разгружаясь от транспортируемых наносов, впадают в расположенное в центре водосбора озеро Месяц.

В приледниковой части водосбора моренные валы, протягивающиеся перед ледником, и собственно сам ледниковый купол служат естественным барьером для перемещения снега, так как в холодное время года преобладают западные и северо-западные ветры. Это способствует накоплению больших запасов снега на западном склоне моренных валов и во фронтальной части ледника, обра-

щенной в сторону водосбора ручья Корабельного. В результате в первую очередь от снега освобождаются привершинные участки моренных холмов. Лед, сохранившийся в теле моренных холмов, препятствует фильтрации влаги и даже на привершинных частях моренных холмов формируются микроводоемы, которые, переполняясь, в виде микроселей сбрасывают воду и наносы вниз по крутым склонам валов, прорезая в них русла и частично откладывая наносы.

Аналогично, в начале сезона абляции по периферии самого ледника формируется несколько довольно крупных водоемов, которые наполняются талой

водой. В дальнейшем сток из этих водоемов формирует сеть временных водотоков, которые в итоге, сливаясь в единый ручей, поставляют наносы в озеро Месяц. При этом временные водоемы являются одновременно и ловушками наносов.

В целом, особенности строения рельефа водосбора руч. Корабельного такова, что путь транспорта смытого материала со склонов в днище долины ручья проходит через участки с низкими значениями индекса связности потоков наносов. Данные участки присутствуют как внутри Центрального массива и на приморской равнине, так и в приледниковой части водосбора (рис. 3).

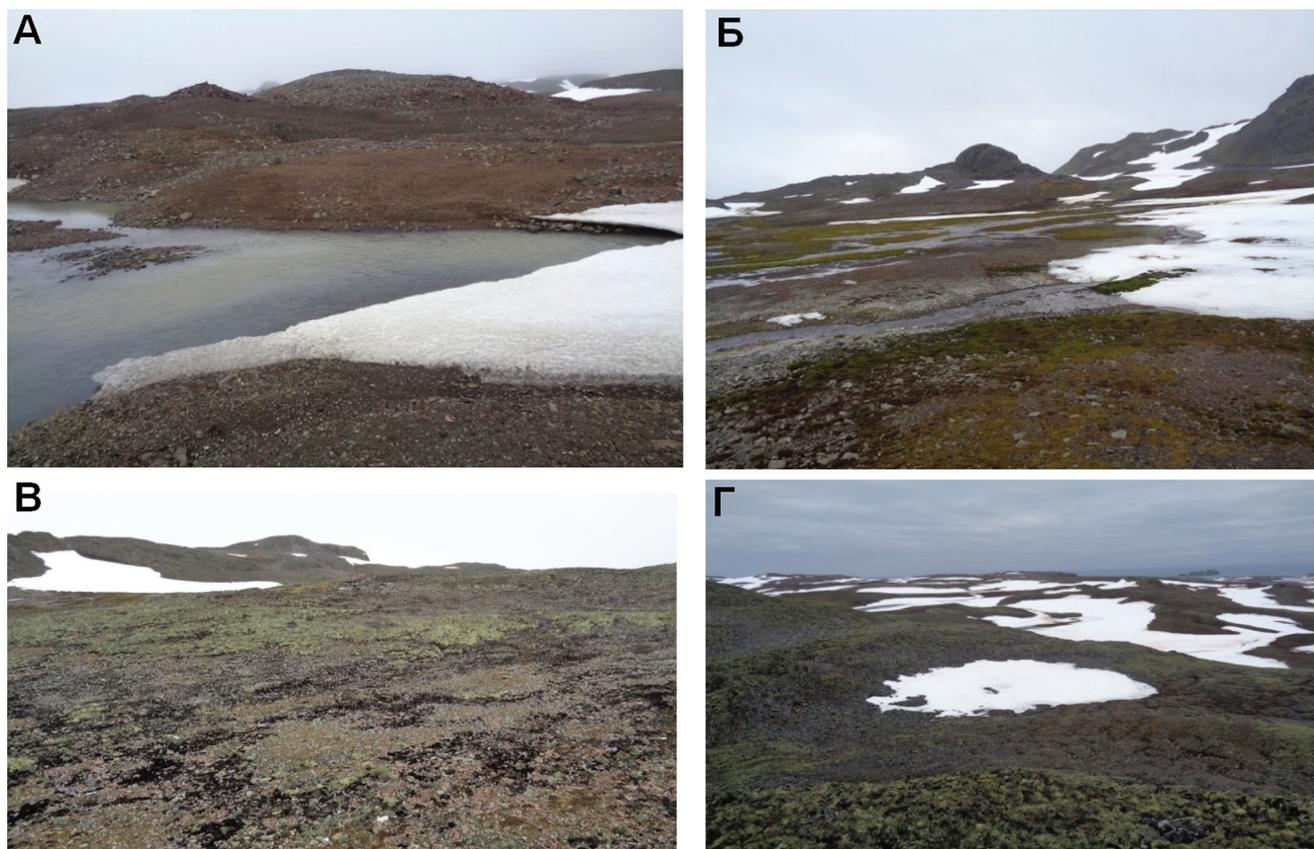


Рис. 2. Проективное покрытие почвы и отложений растительностью на различных участках водосбора руч. Корабельного: А – моренные валы приледниковой части водосбора, сложенные отложениями различной крупности; Б – плоские участки понижений приморской равнины; В – склоны холмов на приморской равнине; Г – привершинные участки склонов Центрального массива

Fig. 2. Projective vegetation cover of soil in different parts of the Korabelny Stream catchment: А – moraine swells of the glacierized area, comprising folded deposits of various sizes; Б – flat areas within depressions of the coastal plain; В – upper part of slopes on the coastal plain; Г – near-top areas of the slopes of the Northern Tablelands

Для части водосбора ручья, расположенного к востоку от озера Месяц и собирающего сток воды преимущественно с приледниковой области водосбора, согласно индексу связности потоков наносов

основной объем смытого материала формируется именно в этой его области (табл. 2). Аналогичные результаты получены и при использовании метода ППП (см. табл. 2).

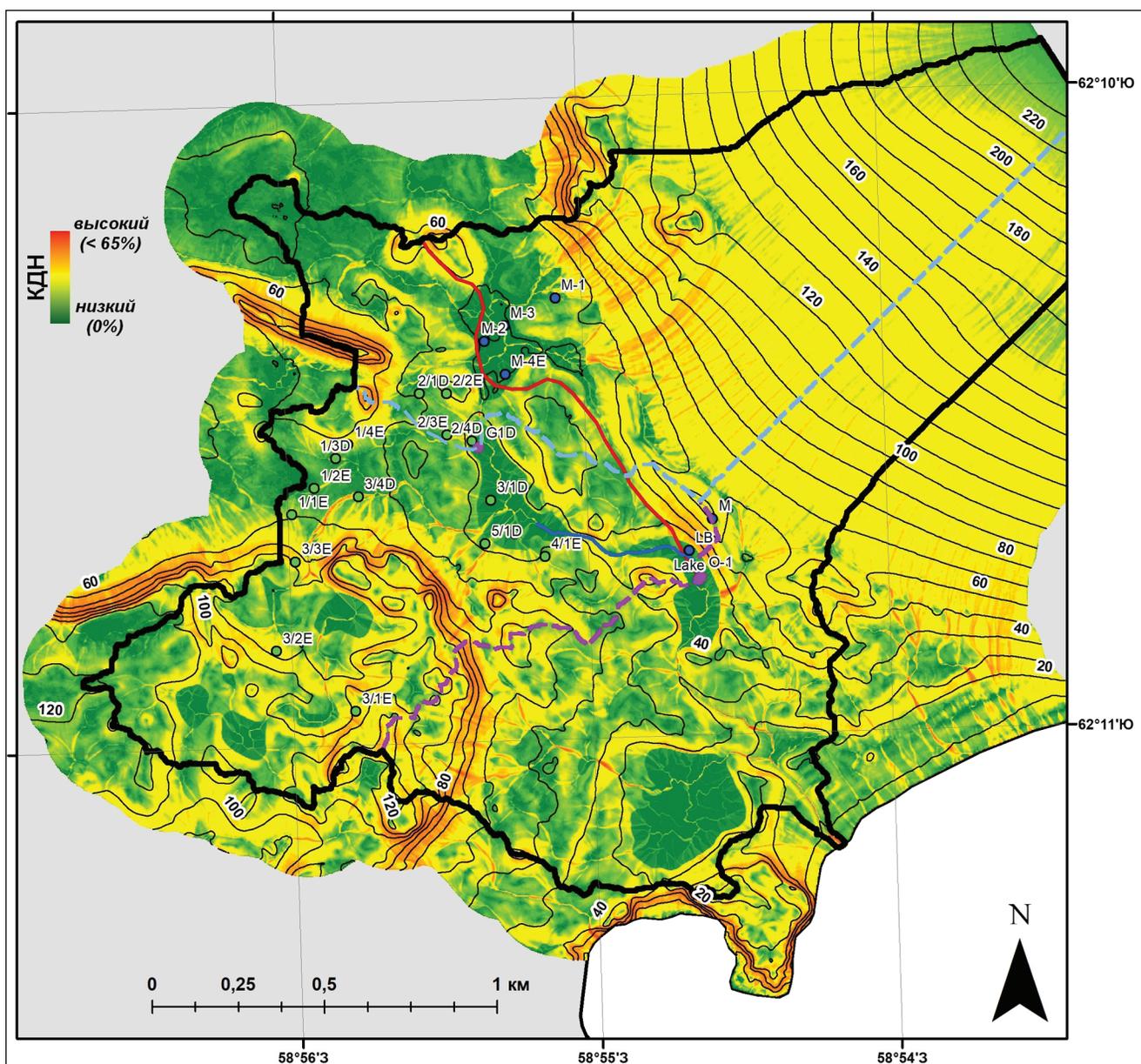


Рис. 3. Карта коэффициента доставки наносов для водосбора руч. Корабельного. Границы исследованного водосбора, подводосборов, точки отбора проб, изогипсы показаны так же, как на рис. 1

Fig. 3. Map of the sediment delivery ratio based for the Korabelny Stream catchment. Boundaries of the studied catchment; sub-catchments, contours are shown as on Fig. 1

Таблица 2

**Оценка долевого вклада внеледниковой и приледниковой частей водосбора на участке впадения стока с восточной части водосбора в озеро Месяц**

Часть водосбора ручья	Площадь, км <sup>2</sup>	Индекс связности потоков наносов (IC)	SDR <sup>1</sup> , %	Доля наносов по IC, %	Доля наносов по методу ППП <sup>2</sup> , % ± %
Приледниковая область	1,165/0,315 <sup>3</sup>	-1,36/-1,78	22/18	96/88	81 ± 23/57 ± 28
Внеледниковая область	0,291	-2	15	4/12	19 ± 23/43 ± 28

Примечания. <sup>1</sup> SDR – коэффициент доставки наносов. <sup>2</sup> Числитель – для набора трассеров с некоторыми неконсервативными элементами; знаменатель – для набора трассеров только с консервативными элементами. <sup>3</sup> В остальных случаях: числитель – с учетом площади ледника; знаменатель – без площади ледника.

Несколько иное соотношение долевого вклада приледниковой и внеледниковой частей водосбора на основе метода ППП выявлено в целом для исследуемого водосбора (замыкающий створ – озеро Приледниковое). Результаты, полученные на основе метода ППП для двух смешанных образцов,

отобранных на участке впадения в озеро Приледниковое, руч. Корабельного и поверхностного слоя керна донных наносов озера, достаточно близки (табл. 3). При этом доля наносов, поступающих с приморской равнины и Центрального массива, составляет 34–40%.

Таблица 3

**Оценка долевого вклада внеледниковой и приледниковой частей водосбора руч. Корабельный**

Часть водосбора ручья	Площадь, км <sup>2</sup>	Индекс связности потоков наносов (IC)	SDR <sup>1</sup> , %	Доля наносов по IC, %	Доля наносов по методу ППП, % ± %	Доля наносов по методу ППП, % ± % (донные наносы озера)
Приледниковая область	1,2/0,35 <sup>2</sup>	-1,35/-1,72	22/19	84/60	60 ± 10	66 ± 10
Внеледниковая область	1,35	-1,79	17	16/40	40 ± 10	34 ± 10

Примечания. <sup>1</sup> SDR – коэффициент доставки наносов. <sup>2</sup> В остальных случаях: числитель – с учетом площади ледника; знаменатель – без площади ледника.

Обратное соотношение вклада двух основных частей водосбора в сток наносов получено в данном случае при использовании индекса связности потоков наносов, так как в этом случае оценка базируется на морфологии склонов и соотношении площадей водосбора, относящихся к приледниковой и внеледниковой частям водосбора. Фактически в этом случае не учитываются два ключевых фактора, влияющие на отрыв и транспорт частиц почвы или поверхностных отложений. Во-первых, не учитывается, что моренные отложения легче размываются плоскостным и ручейковым стоком, т. к. они не защищены никакой растительностью. Во-вторых, таяние собственно ледника ведет к поддержанию высоких расходов воды круглосуточно, т. к. внутрисуточные колебания температуры воздуха не оказывают никакого влияния на таяние ледника. В совокупности эти факторы способствуют перемещению значительно большего потока наносов с приледниковой части водосбора, даже учитывая переотложение части продуктов размыва в формирующихся вдоль края ледника временных водоемах.

Полученные оценки соотношения долевого вклада приледниковой и внеледниковой частей водосбора в сток наносов руч. Корабельного во многом отражают условия формирования стока воды и наносов в период сезона абляции 2014–2015 гг. Но есть и общие закономерности формирования стока наносов в пределах водосбора ручья Корабельного. В первую очередь следует отметить уникальность данного водосбора, а именно то обстоятельство,

что приморская равнина и Центральный массив, составляющие его внеледниковую часть, в целом характеризуются преобладанием вогнутых склонов. Склоны опираются на достаточно широкие ложбинные понижения, по днищам которых идет сток, а уклоны днищ снижаются вниз по течению. В пределах Центрального массива присутствуют озерные котловины, в которых накапливается вода, и только при их переполнении сток направляется далее в сторону приморской равнины. Центральная часть приморской равнины, куда поступает сток воды и наносов с Центрального массива и склонов самой приморской равнины, характеризуется достаточно плоским рельефом (см. рис. 2Б). В итоге характер расчленения рельефа способствует достаточно низкой связности потоков наносов во внеледниковой части водосбора (см. табл. 3).

Другим фактором, существенно влияющим на формирование стока наносов во внеледниковой части водосбора, являются промерзание почв и их малая мощность. В результате в процессе таяния снега, которое идет достаточно медленно до момента появления проталин, потоки с проталин фильтруются сквозь снег, продолжительное время сохраняющийся в днищах ложбин. Плоскостной и фрагментарно ручейковый смыв на склонах формируется в этой части водосбора только при интенсивном таянии снежного покрова. И только в днищах ложбин за счет выклинивания внутрипочвенного стока формируются поверхностные водотоки, которые способны транспортировать ограниченные объемы наносов.

Формирование стока наносов в пределах приледниковой части водосбора принципиально иное. На начальном этапе снеготаяния происходит формирование ряда мелких временных водоемов, расположенных по периферии современного края ледника. Вода в эти водоемы поступает как с поверхности ледникового купола, так и с отгороженной от остальной части водосбора валом краевой морены приледниковой части водосбора. При переполнении временных водоемов происходит паводковый сброс стока по направлению к озеру Месяц. В свою очередь, при переполнении озера Месяц за счет стока как с приледниковой, так и с внеледниковой части водосбора вода сбрасывается по руслу руч. Корабельного к озеру Приледниковому и далее к морю. При полном таянии снега поверхность морены с ледяным ядром обнажается, и моренные отложения по льду сползают к истокам руч. Корабельного. Наносы частично переоткладываются в приледниковых водоемах, а частично выносятся в озеро Месяц.

По данным [Chinagto, 2014] сток воды с ледника в целом составляет не менее 80% суммарного стока, поступающего в руч. Корабельный. Наши наблюдения показывают, что в начале сезона абляции сток с ледниковой и приледниковой частей водосбора примерно одинаков, а в конце лета сток с приледниковой части территории достигает 80–90%. До появления проталин на приледниковой части водосбора наносы формируются только за счет размыва русла ручья на участке между озерами Месяц и Приледниковое. С появлением проталин и последующим сходом снега активизируются процессы быстрой солифлюкции по бортам моренных холмов.

Сезон абляции 2014–2015 гг. характеризовался повышенными запасами снега на ледниковом куполе. Поэтому таяние льда не повлияло на формирование стока воды и наносов.

Для полуострова Файлдс осадки со слоем свыше 10 мм в сутки в период абляции сравнительно редки, их число составляет от одного до четырех

в месяц. Причем часто это дождь со снегом. Собственно, сезон абляции 2014–2015 гг. не отличался от остальных лет по числу таких осадков, но поздний сход снежного покрова снизил величину стока наносов в период отбора проб.

Резюмируя, можно отметить, что условия формирования стока наносов на водосборе руч. Корабельного в сезон абляции 2014–2015 гг. отличались от среднемноголетних. Сток воды с ледникового купола был невелик, т. к. таял только снег, а у него довольно высокое альbedo по сравнению со льдом. Обычно расходы воды в сезон абляции резко возрастают при активном таянии льда. Поэтому полученные на основании применения метода ППП соотношения между вкладом приледниковой и внеледниковой частей водосбора в сток наносов руч. Корабельного несколько завышены в пользу вклада внеледниковой части водосбора.

Гранулометрический состав почв и наносов, переотложенных в днищах ложбинных понижений на приморской равнине, в среднем практически идентичен (табл. 4). Это говорит о том, что в процессе транспортировки наносов не происходит их разделения на взвешенные и влекомые. То есть временные водотоки имеют небольшую глубину и незначительную турбулентность. В противном случае в составе отложившихся наносов наблюдался бы рост доли песка.

Совершенно иная картина характерна для приледниковой части водосбора, где донные наносы в основном состоят из песка, тогда как в моренных отложениях доминирует алеврит (см. табл. 4). Песок перемещается в придонном слое и откладывается на участках падения скоростей в мелководных водоемах, тогда как более легкие частицы переносятся потоком за их пределы. Таким образом, временные водотоки, формирующиеся в ложбинных понижениях в пределах приморской равнины, обладают невысокой транспортирующей способностью и низкой турбулентностью в отличие от временных потоков в приледниковой части водосбора.

Таблица 4

**Гранулометрический состав почв, морены и наносов, отобранных в различных частях водосбора руч. Корабельный**

Место отбора	Число проб <sup>1</sup>	2000–50 мкм, %	50–2 мкм, %	<2 мкм, %
Почва, приморская равнина	9	24,8	67,4	7,8
Донные наносы, приморская равнина	7	25,5	66,1	8,4
Морена, приледниковая часть водосбора	6	18,5	73	8,5
Донные наносы водоема у ледника, стрежень потока	11	84,7	13,7	1,6
Донные наносы водоема у ледника, периферия	11	75,5	22	2,5
Донные наносы, Приледниковое озеро	19	77,6	20,3	2,5

*Примечание.* <sup>1</sup> Использовались в том числе послойные пробы донных отложений, отобранных в водоеме у ледника (22 пробы) и в Приледниковом озере.

## ВЫВОДЫ

Основной сток наносов на водосборе руч. Корабельного формируется с момента появления проталин в период сезона абляции, которой начинается с декабря и завершается в конце марта – апреле. Данные наблюдений за особенностями накопления и схода снега и температурным режимом воздуха в период сезона абляции позволяют утверждать, что сезон 2014–2015 гг. отличался от предшествующих и последующих аномально поздним сходом снега на ледниковом куполе Беллинсгаузен и прилегающих территориях.

Совместное использование метода ППП, расчетов индекса связности потока наносов и коэффициента доставки наносов в сочетании с анализом различий в проективном покрытии почв (ПРПП) растительностью различных участков позволило количественно оценить долевого вклад наносов, поступающих в руч. Корабельный с двух основных частей водосбора: приледниковой, сложенной с поверхности моренными отложениями, и с внеледниковой части водосбора, представленной приморской равниной и возвышающимся над ней на 70–80 м Центральным массивом.

Установлено, что, несмотря на различия в рельефе этих двух частей водосбора, сказывающихся на особенностях формирования стока воды, средние по площади индексы связности потоков наносов у них сравнительно близки и составляют –1,79 и –1,35 для внеледниковой и приледниковой частей соответственно. Причина схожести связана с наличием ловушек наносов в виде временных водоемов в пределах приледниковой части водосбора, озерных котловин на Центральном массиве и плоской депрессии в центральной части приморской равнины. При этом моренные отложения приледниковой части водосбора не защищены от смыва и размыва растительным покровом.

В пределах приморской равнины и Центрального массива ППП растительностью варьирует от 0 до 20% в нижних частях склонов и от 0 до 80% на их приводораздельных частях и на большей части плоской депрессии приморской равнины. Это, а также наличие ледяной корки в начальный период снеготаяния и просачивание воды в грунт после появления проталин, способствует существенному снижению смыва и только фрагментарному размыву почв во внеледниковой части водосбора ручья. Значимыми факторами, обеспечивающими большой поток наносов, формирующийся в пределах приледниковой части водосбора, являются более высокие расходы воды за счет активного таяния снега и льда на ледниковом куполе, наличие сети эрозионных врезов на освободившемся ото льда бывшем подножье ледяного купола и наличие ледяного ядра в краевой морене, препятствующего фильтрации талой воды.

Результаты оценок долевого вклада внеледниковой и приледниковой частей водосбора руч. Корабельного на основе использования метода ППП получены отдельно для восточной половины водосбора и всего водосбора ручья. В первом случае они составили 19 и 81% соответственно. В целом для водосбора руч. Корабельного соотношение долевого вклада внеледниковой и приледниковой частей водосбора в сток наносов ручья оценено в 34–40 и 60–66% соответственно. Преобладание вклада наносов, поступающих с приледниковой части водосбора, представляется вполне логичным. Но оно несколько ниже оценок ранее установленного соотношения долевого вклада стока воды, поступающего с двух основных частей водосбора [Chinarro, 2014]. Это связано с тем, что сезон абляции 2014–2015 гг., когда проводился отбор проб, характеризовался поздним сходом снега по сравнению со среднелетними значениями.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абакумов Е.В., Андреев М.П. Температурный режим гумусовых почв острова Кинг-Джордж, Западная Антарктика // Вестник СПбГУ. Сер. 3. 2011. Вып. 2. С. 129–133.
- Beel C.R., Lamoureux S.F., Orwin J.F. Fluvial response to a period of hydrometeorological change and landscape disturbance in the Canadian High Arctic, *Geophysical Research Letters*, 2018, vol. 45, p. 10446–10455, DOI: 10.1029/2018GL079660.
- Borselli L., Cassi P., Torri D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment, *Catena*, 2008, vol. 75, p. 268–277, DOI: 10.1016/j.catena.2008.07.006.
- Braun M., Simões J.C., Vogt S. et al. An improved topographic database for King George Island: compilation, application and outlook, *Antarctic Science*, 2001, vol. 13, no. 1, p. 41–52.
- Cavalli M., Trevisani S., Comiti F. et al. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments, *Geomorphology*, 2013, vol. 188, p. 31–41, DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.05.007.
- Chinarro D. *System Engineering Applied to Fuenmayor Karst Aquifer (San Julián de Banzo, Huesca) and Colins Glacier (King George Island, Antarctica)*, Doctoral Thesis accepted by the University of Zaragoza, Spain, 2014, XX, 161 p.
- Collins A., Walling D.E., Leeks G.J.L. Composite fingerprinting of the spatial source of fluvial suspended sediment: a case study of the Exe and Severn River basins, United Kingdom, *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 1996, no. 2, p. 41–53.
- Coulthard T.J., Van De Wiel M. Modelling long term basin scale sediment connectivity, driven by spatial land use

- changes, *Geomorphology*, 2017, vol. 277, p. 265–281, DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.05.027.
- Gaspar L., Quijano, L., Lizaga, I. et al. Effects of land use on soil organic and inorganic C and N at <sup>137</sup>Cs traced erosional and depositional sites in mountain agroecosystems, *Catena*, 2019, vol. 181, DOI: 10.1016/j.catena.2019.05.004.
- Haddadchi A., Ryder D.S., Evrard O. et al. Sediment fingerprinting in fluvial systems: review of tracers, sediment sources and mixing models, *Int. J. Sediment Res.*, 2013, vol. 28, p. 560–578.
- Hodgkins R., Cooper R., Wadham J. et al. Suspended sediment fluxes in a high-Arctic glacierised catchment: implications for fluvial sediment storage, *Sediment Geol.*, 2003, vol. 162, p. 105–117.
- Hodson A., Gurnell A., Tranter M. et al. Suspended sediment yield and transfer processes in a small high-artic glacier basin, Svalbard, *Hydrol. Process.*, 1998, vol. 12, p. 73–86.
- Howat I., Porter C., Noh M.-J. et al. The Reference Elevation Model of Antarctica – Mosaics, Version 2, 2022, DOI: 10.7910/DVN/EBW8UC, Harvard Dataverse, V1.
- Kavan J., Ondruch J., Nývlt D. et al. Seasonal hydrological and suspended sediment transport dynamics in proglacial streams, James Ross Island, Antarctica, *Geografiska Annaler. Series A. Physical Geography*, 2017, vol. 99, no. 1, p. 38–55, DOI: 10.1080/04353676.2016.1257914.
- Koiter A.J., Owens P.N., Petticrew E.L. et al. The behavioural characteristics of sediment properties and their implications for sediment fingerprinting as an approach for identifying sediment sources in river basins, *Earth Sci. Rev.*, 2013, vol. 125, p. 24–42.
- Lizaga I., Latorre B., Gaspar L. et al. FingerPro: an R package for tracking the provenance of sediment, *Water Resources Management*, 2020, vol. 34, no. 12, p. 3879–3894.
- Mokhov I.I., Parfenova M.R. Relationship of the extent of Antarctic and Arctic ice with temperature changes, 1979–2020, *Dokl. Earth Sci.*, 2021, vol. 496, no. 1, p. 66–71.
- Navas A., Machin J. Spatial distribution of heavy metals and arsenic in soils of Aragón (northeast Spain): Controlling factors and environmental implications, *Applied Geochemistry*, 2002, vol. 17, p. 961–973.
- Owens P.N., Blake W.H., Gaspar L. et al. Fingerprinting and tracing the sources of soils and sediments: Earth and ocean science, geoarchaeological, forensic, and human health applications, *Earth Sci. Rev.*, 2016, vol. 162, p. 1–23, DOI: 10.1016/j.earscirev.2016.08.012.
- Rosa K.K., Vieira R., Borges G. et al. Meltwater drainage and sediment transport in a small glacierized basin, Wanda glacier, King George Island, Antarctica, *Geociências*, 2014, vol. 33, p. 181–191.
- Smellie J.L., Pankhurst R., Thomson M. et al. The geology of the South Shetland Islands: VI. Stratigraphy, Geochemistry and Evolution, *Br. Antarct. Surv. Sci. Rep.*, 1984, no. 87, 85 p.
- Syvitski J.P.M. Sediment discharge variability in Arctic rivers: implications for a warmer future, *Polar Research*, 2002, vol. 21, no. 2, p. 323–330, DOI: 10.3402/polar.v21i2.6494.
- Turner J., Marshall G.J., Clem K. et al. Antarctic temperature variability and change from station data, *International Journal of Climatology*, 2019, vol. 40, p. 2986–3007, DOI: 10.1002/joc.6378.

Поступила в редакцию 15.06.2023

После доработки 10.03.2024

Принята к публикации 24.04.2024

## SEDIMENT RUNOFF FORMATION IN A SMALL PERIGLACIAL CATCHMENT ON THE KING GEORGE (VATERLOO) ISLAND, ANTARCTICA

V.N. Golosov<sup>1</sup>, B.R. Mavlyudov<sup>2</sup>, S.V. Kharchenko<sup>3</sup>, A. Navas<sup>4</sup>, L. Gaspar<sup>5</sup>, I. Lizaga<sup>6</sup>, A. Castillo<sup>7</sup>

<sup>1,3</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography

<sup>1-3</sup> Institute of Geography, Russian Academy of Sciences

<sup>4,5</sup> Spanish National Research Council, Zaragoza, 50059, Spain

<sup>6</sup> Ghent University, 9000, Ghent, Belgium

<sup>7</sup> University of Southern Chile, Las Encinas, 220, Valdivia, Chile

<sup>1</sup> Laboratory of Soil Erosion and Channel Processes, Leading Scientific Researcher,  
D.Sc. in Geography; e-mail: golossov@gmail.com

<sup>2</sup> Glaciology Department, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: bulatrm@bk.ru

<sup>3</sup> Department of Geomorphology and Paleogeography, Leading Scientific Researcher,  
Ph.D. in Geography; e-mail: xar4enkoff@yandex.ru

<sup>4</sup> Aula Dei Experimental Station, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: anavas@eead.csic.es

<sup>5</sup> Aula Dei Experimental Station, Post-doctoral researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: lgaspar@eead.csic.es

<sup>6</sup> Department of Green Chemistry and Technology, Post-doctoral researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: Ivan.Lizaga@UGent.be

<sup>7</sup> Institute of Chemical Sciences, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: acastill@uach.cl

Global climate change has most significantly affected the Polar Regions. The increase in air temperature has stimulated the melting of glaciers in the Arctic and Antarctic, which has contributed to changes in the formation of water and sediment runoff. However, there are very few quantitative estimates of the sediment redistribution in the periglacial catchments of the Polar Regions. Specific features of water and sediment runoff were studied within the catchment area of the Korabelnyj Stream located on the Fildes Peninsula in Antarctica near the Bellingshausen Ice Dome. The main aim of the study was to investigate the conditions for the formation of water and sediment runoff and to identify the proportional contribution of washout and erosion material coming from the periglacial and maritime parts of the catchment area to the sediment runoff of the stream. A set of methods and approaches, including: a) estimates of the sediment flow connectivity index; b) fingerprinting technique; c) hydrometeorological observations; d) large-scale geomorphological survey and others, was applied to identify the conditions for the formation of surface runoff and washout, the mechanisms of sediment redistribution in various parts of the fluvial network and to quantify the proportional contribution of two main sediment sources to the sediment runoff of the stream. A fraction with a particle size of  $\leq 63 \mu\text{m}$  was used for geochemical and spectrometric analyzes of soils and sediments. In total, the content of 34 elements was analyzed, i.e. 6 radioisotopes and 28 stable elements. It has been established that despite the significant differences in the relief of the near-glacial and maritime parts of the catchment area, the indices of sediment connectivity are quite close and amount to  $-1,79$  and  $-1,35$ , respectively. A significant part of the material transported by temporary streams from the slopes of the catchment area is redeposited in relief depressions partially occupied by water bodies. The main volume of sediments, which is at least 60–66% of the total sediment runoff in the outlet section of the Korabelnyj Stream, comes from the periglacial part of the catchment area. This is due to the increased water discharge relative to the non-glacial part of the catchment area, which results from the melting of snow and ice accumulated on the ice dome, the high erosion of moraine deposits unprotected by vegetation, and the presence of an ice core in moraines, which prevents water filtration.

**Keywords:** global climate change, sediment redistribution, erosion, sedimentation, moraine

## REFERENCES

- Abakumov E.V., Andreyev M.P. Temperaturnyj rezhim gumusovykh pochv ostrova King-Dzhorszh, Zapadnaya Antarktika [The temperature regime of humus horizons of soils of King George Island, Western Antarctica], *Vestn. Sankt-Peterburg. un-ta, Ser. 3*, 2011, no. 2, p. 129–133. (In Russian)
- Beel C.R., Lamoureux S.F., Orwin J.F. Fluvial response to a period of hydrometeorological change and landscape disturbance in the Canadian High Arctic, *Geophysical Research Letters*, 2018, vol. 45, p. 10446–10455, DOI: 10.1029/2018GL079660.
- Borselli L., Cassi P., Torri D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment, *CATENA*, 2008, vol. 75, p. 268–277, DOI: 10.1016/j.catena.2008.07.006.
- Braun M., Simões J.C., Vogt S. et al. An improved topographic database for King George Island: compilation, application and outlook, *Antarctic Science*, 2001, vol. 13, no. 1, p. 41–52.
- Cavalli M., Trevisani S., Comiti F., Marchi L. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments, *Geomorphology*, 2013, vol. 188, p. 31–41, DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.05.007.
- Chinarro D. *System Engineering Applied to Fuenmayor Karst Aquifer (San Julián de Banzo, Huesca) and Colins Glacier (King George Island, Antarctica)*, Doctoral Thesis accepted by the University of Zaragoza, Spain, 2014, XX, 161 p.
- Collins A., Walling D.E., Leeks G.J.L. Composite fingerprinting of the spatial source of fluvial suspended sediment: a case study of the Exe and Severn River basins, United Kingdom, *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 1996, no. 2, p. 41–53.
- Coulthard T.J., Van De Wiel M. Modelling long term basin scale sediment connectivity, driven by spatial land use changes, *Geomorphology*, 2017, vol. 277, p. 265–281, DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.05.027.
- Gaspar L., Quijano L., Lizaga I., Navas A. Effects of land use on soil organic and inorganic C and N at  $^{137}\text{Cs}$  traced erosional and depositional sites in mountain agroecosystems, *Catena*, 2019, vol. 181, 104058, DOI: 10.1016/j.catena.2019.05.004.
- Haddadchi A., Ryder D.S., Evrard O. et al. Sediment fingerprinting in fluvial systems: review of tracers, sediment sources and mixing models, *Int. J. Sediment Res.*, 2013, vol. 28, p. 560–578.
- Hodgkins R., Cooper R., Wadham J. et al. Suspended sediment fluxes in a high-Arctic glacierised catchment: implications for fluvial sediment storage, *Sediment Geol.*, 2003, vol. 162, p. 105–117.
- Hodson A., Gurnell A., Tranter M. et al. Suspended sediment yield and transfer processes in a small high-artic glacier basin, Svalbard, *Hydrol Process*, 1998, vol. 12, p. 73–86.
- Howat I., Porter C., Noh M.-J. et al. *The Reference Elevation Model of Antarctica – Mosaics, Version 2*, 2022, DOI: 10.7910/DVN/EBW8UC, Harvard Dataverse, V1.
- Kavan J., Ondruch J., Nývlt D. et al. Seasonal hydrological and suspended sediment transport dynamics in proglacial streams, James Ross Island, Antarctica, *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography*, 2017, vol. 99, no. 1, p. 38–55, DOI: 10.1080/04353676.2016.1257914.
- Koiter A.J., Owens P.N., Petticrew E.L. et al. The behavioural characteristics of sediment properties and their implications for sediment fingerprinting as an approach for identifying sediment sources in river basins, *Earth Sci. Rev.*, 2013, vol. 125, p. 24–42.
- Lizaga I., Latorre B., Gaspar L., Navas A. FingerPro: an R package for tracking the provenance of sediment, *Water Resources Management*, 2020, vol. 34, no. 12, p. 3879–3894.
- Mokhov I.I., Parfenova M.R. Relationship of the extent of Antarctic and Arctic ice with temperature changes, 1979–2020, *Dokl. Earth Sci.*, 2021, vol. 496, no. 1, p. 66–71.

- Navas A., Machín J. Spatial distribution of heavy metals and arsenic in soils of Aragón (northeast Spain): Controlling factors and environmental implications, *Applied Geochemistry*, 2002, vol. 17, p. 961–973.
- Owens P.N., Blake W.H., Gaspar L. et al. Fingerprinting and tracing the sources of soils and sediments: Earth and ocean science, geoarchaeological, forensic, and human health applications, *Earth Sci. Rev.*, 2016, vol. 162, p. 1–23, DOI: 10.1016/j.earscirev.2016.08.012.
- Rosa K.K., Vieira R., Borges G. et al. Meltwater drainage and sediment transport in a small glacierized basin, Wanda glacier, King George Island, Antarctica, *Geociências*, 2014, vol. 33, p. 181–191.
- Smellie J.L., Pankhurst R., Thomson M. et al. *The geology of the South Shetland Islands*: VI. Stratigraphy, Geochemistry and Evolution. Br. Antarct. Surv. Sci. Rep., 1984, no. 87, 85 p.
- Syvitski J.P.M. Sediment discharge variability in Arctic rivers: Implications for a warmer future, *Polar Research*, 2002, vol. 21, no. 2, p. 323–330. DOI: 10.3402/polar.v21i2.6494.
- Turner J., Marshall G.J., Clem K. et al. Antarctic temperature variability and change from station data, *International Journal of Climatology*, 2019, vol. 40, p. 2986–3007, DOI: 10.1002/joc.6378.

Received 15.06.2023

Revised 10.03.2024

Accepted 24.04.2024

## КЛИМАТОГЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЛАНДШАФТОВ КУРУМОВ НА ЗАПАДЕ СРЕДНЕСИБИРСКОГО ПЛОСКОГОРЬЯ В ЗОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ СРЕДНЕЙ ТАЙГИ

А.А. Высоцкая<sup>1</sup>, А.А. Медведков<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
кафедра физической географии мира и геоэкологии

<sup>1</sup>Аспирант; e-mail: an.vys@yandex.ru

<sup>2</sup>Доц., канд. геогр. наук; e-mail: a-medvedkov@bk.ru

Рассмотрено изменение биопродукционных показателей на курумных склонах западной части Среднесибирского плоскогорья в условиях современного потепления климата. Оценено изменение теплообеспеченности за период с 1991 по 2020 г. по сравнению с 1961–1990 гг., отмечено увеличение суммы активных температур воздуха выше 5 и 10°C в среднем на 165°C и на 8 дней в каждом из случаев. Курумные склоны в районах исследования дешифрированы на основе обработки данных дистанционного зондирования (космических снимков серии Landsat с 30-метровым разрешением и Sentinel-2 с 10-метровым разрешением), рассчитаны ряды вегетационных индексов (NDVI и NDMI) с использованием архивов указанных снимков. Это позволило оценить динамику фотосинтетически активной фитомассы и увлажнения наземного покрова с 1992 по 2023 г. Значения индексов рассчитаны как максимальные за вегетационный период (июль–август) анализируемого года по всем доступным для наблюдения малооблачным сценам Landsat и Sentinel-2. В целом межгодовое изменение усредненных по анализируемым курумам величин NDVI и NDMI имеет тенденцию к росту. Отмечается положительная динамика в колебаниях обоих вегетационных индексов за исследуемый период. Проведена типизация курумных ландшафтов по скорости их зарастания, выявлены курумы с наибольшей, средней и наименьшей разницей полученных значений и оценено их пространственное распределение. Проанализирована роль морфометрических характеристик склонов (в т. ч. их экспозиции) в процессах зарастания курумов. Выявлено, что максимальные величины прироста значений вегетационных индексов соответствуют склонам холодных экспозиций (северной, северо-западной и восточной), а влияние крутизны незначительно. Положительная динамика значений вегетационных индексов позволяет говорить о «позеленении» курумных ландшафтов, что также подтверждается результатами повторных исследований на ключевых участках. Зарастание курумов проявляется в увеличении площади и мощности мохово-лишайникового покрова, появлении кустарников, активного роста молодых мелколиственных деревьев и редкого подроста хвойных пород. «Позеленение» курумных склонов сопровождается вытаиванием гольцового льда, поэтому среднетаежные курумы Среднесибирского плоскогорья переходят в состояния, более характерные для южной тайги, что свидетельствует об изменении зонально-ландшафтных условий в районах их развития.

**Ключевые слова:** перигляциальная среда, каменные глетчеры, потепление климата, дистанционные данные, спектральные характеристики, изменения растительности, деградация многолетней мерзлоты, Енисейская Сибирь

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.2

### ВВЕДЕНИЕ

Актуальным направлением оценки состояния ландшафтов в условиях изменения климата является изучение информативных природных объектов, характеризующихся наибольшей чувствительностью к внешним воздействиям. В данном качестве могут выступать отдельные типы природных комплексов разного иерархического ранга, располагающиеся в экотонных условиях. В ландшафтах-экотонах природные процессы протекают значительно быстрее, а явления-отклики наиболее доступны для натуральных наблюдений [Медведков, 2016; Медвед-

ков, 2018]. Весьма информативны в этом контексте природные объекты в пределах южной криолитозоны (т. е. функционирующие в условиях островного и прерывистого развития высокотемпературных многолетнемерзлых пород), подверженные большей изменчивостью при трансформации климатических условий [Горшков и др., 2003].

Применительно к условиям Среднесибирского плоскогорья, ландшафты курумов в сибирской тайге являются одним из наиболее откликающихся типов природных комплексов на потепление климата [Медведков, 2014; Medvedkov, 2016], что заметно

отражается на их состоянии и внешнем облике. Сегодня происходит зарастание протаявших курумов<sup>1</sup> лишайниками, кустарничками и отдельными деревьями [Медведков, 2016; Медведков, 2018]. Выявленные в ходе повторных наблюдений изменения могут быть экстраполированы на значительно большие по охвату территории с использованием данных дистанционного зондирования (ДДЗ).

Курумы представляют собой скопления преимущественно глыбового материала на склоновых поверхностях, имеющие криогенный генезис и покровный характер залегания, в связи с чем их образно называют «каменными реками» или «каменными морями». Вместе с тем имеются и некоторые расхождения в представлениях о курумах как геологических образованиях, связанные с их происхождением, размером глыб и характером движения [Железняк и др., 1992]. В целом, несмотря на относительную изученность курумов с точки зрения геоэкологии и инженерной геологии, исследовательских работ по их ландшафтному анализу и индикаторной роли чрезвычайно мало. Вместе с тем курумы – это не только один из типов склоновых десерпционных отложений, их также можно рассматривать и как специфичные ландшафты, обладающие рядом отличительных особенностей (сортировка материала в вертикальном разрезе от крупных глыб к мелкозему, развитие курумодесерпции, суффозии и гольцового льдообразования, разреженная растительность, почвы скелетные или неполного развития). Данные специфические черты объединяют курум в единую геосистему, целостно реагирующую на климатические сигналы и одновременно взаимосвязанную с соседними ландшафтами посредством сложных вещественно-энергетических потоков (в том числе через солифлюкционные процессы, поверхностный сток, микроклиматическую циркуляцию воздуха и др.). Отдельно отметим, что курумам присущ особый тип почвообразования [Майзенберг, 1991], характерная флора и фауна [Алексеев, 2018] и заметная ресурсно-экологическая роль в традиционном хозяйстве местного населения [Medvedkov, 2013]. Совокупность перечисленных положений характеризует курумы как интересный объект для ландшафтного анализа.

**Район исследования** расположен на западе Среднесибирского плоскогорья, в пределах его низкого плато в нижней части бассейна реки Подкаменная Тунгуска. В административном отношении он находится на территории Эвенкийского муниципаль-

<sup>1</sup> Это каменные россыпи, которые полностью или частично лишены гольцового льда, что фиксируется по исчезновению подповерхностных холодных ручейков, отсутствию гольцового льда в межглыбовом пространстве, обилию глыб в неустойчивом положении и вогнутой в плане форме курума.

ного района Красноярского края. С точки зрения природно-географической зональности район представлен ландшафтами средней тайги и расположен в области спорадического развития многолетней мерзлоты.

На исследуемой территории курумовые ландшафты встречаются широко, занимая различные по крутизне и экспозиции склоны. В основном они приурочены к бортам долин малых и средних рек. Выходы скальных пород, на которых развиваются курумы, представлены обнажениями траппов и скарнов.

В качестве ключевых были выбраны два района исследования: «Алексис» (57 км<sup>2</sup>) и «Большая Черная» (540 км<sup>2</sup>), располагающиеся в бассейнах одноименных рек – притоков Подкаменной Тунгуски (рис. 1). Ключевые участки представляют собой типичные ландшафты низкого плато с плосковыпуклыми водоразделами под темнохвойной тайгой со значительной примесью мелколиственных пород и густой глубокой сетью эрозионного расчленения.

#### **Тенденции изменения теплообеспеченности.**

Климат района исследования характеризуется чертами переходного от умеренного континентального к умеренному резко-континентальному. Среднегодовые температуры воздуха по данным зональной гидрометеостанции (ЗГМО) «Бор» (рис. 2) слабо отрицательные и колеблются в среднем от –2 до –4°C, внутрigoдoвые амплитуды достигают 37–42°C. Осадки отличаются большой неравномерностью во времени как по сезонам года, так и в многолетних интервалах. В среднем за год выпадает 450–650 мм, из них на теплый период (май–сентябрь) приходится 150–400 мм (около 60%). По данным ЗГМО «Бор», безморозный период продолжается 70–85 дней, средняя температура июля составляет 17–18°C, января – –23...–24°C.

Значения среднегодовых температур воздуха (по данным ЗГМО «Бор») фиксируют начало потепления климата с 1980-х гг., несмотря на сильно выраженную изменчивость по годам и десятилетиям (см. рис. 2). Данная ситуация отражена линией скользящего среднего: потепление 1990-х гг. сменилось стабилизацией и относительно (по сравнению с концом 1990-х гг.) слабым похолоданием 2000-х гг., а после 2010 г. вновь отмечается рост. Интегральная разностная кривая суммирует отклонения температур от средней и указывает на их явную тенденцию к росту в современный период (1991–2020 гг.). Наибольший вклад в увеличение температур воздуха за 1991–2020 гг. по сравнению с периодом климатической нормы 1961–1990 гг. вносят февральские (увеличение на 3,3°C) и мартовские (увеличение на 2,7°C) температуры воздуха, а также апрельские (на 2,2°C) и октябрьские (на 1,4°C). В целом среднего-

довая температура воздуха возросла на 1,3°C, а в 2019–2020 гг. перешла рубеж 0°C, что повторилось и в 2022 г.

Данные изменения температурного режима значительно влияют на теплообеспеченность ландшафтов. Для оценки происходящих изменений рассчитаны продолжительность вегетационного периода и суммы активных температур более 5 и более 10°C в периоды 1961–1990 гг. (норма) и 1991–2020 гг. (современный). Сумма активных температур выше 10°C характеризует условия для развития древесной растительности. Эта сумма за период с 1991 по 2020 г. по сравнению с 1961–1990 гг. увеличилась в среднем на 166°C

и на 8 дней, достигнув 1600°C. Сумма активных температур воздуха выше 5°C определяет условия вегетации мхов и других растений напочвенного яруса, этот показатель также имеет положительную динамику: за 30 лет (с 1991 г.) рост на 164°C и на 8 дней. Период с температурами воздуха ниже 5°C – это часть года с пониженным функционированием биологической среды [Золотокрылин и др., 2012], а сумма температур ниже 0°C определяет «запасы холода», способствующие консервации состояния многолетней мерзлоты и мерзлотных ландшафтов. Так, по данным ЗГМО «Бор», «запасы холода» уменьшились за последние 30 лет на 311°C по сравнению с нормой 1961–1990 гг.

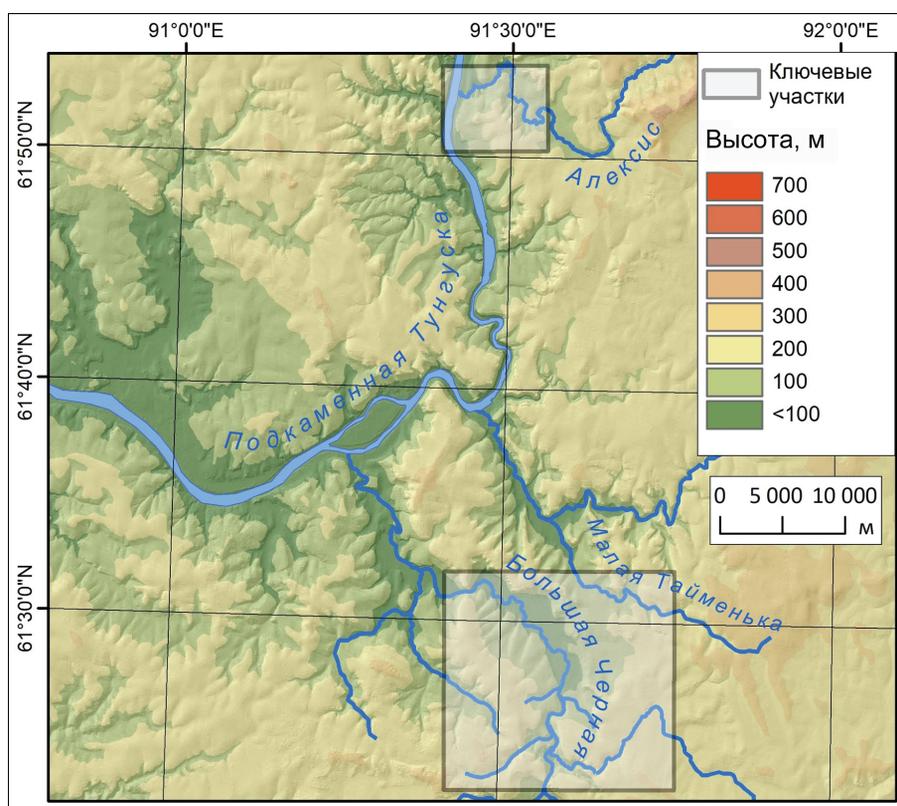


Рис. 1. Расположение ключевых районов исследования (именуются по названию рек, впадающих в р. Подкаменную Тунгуску)

Fig. 1. Location of key research areas (named after small rivers flowing into the Podkamennaya Tunguska River)

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общая схема работы с данными дистанционного зондирования представлена на рис. 3. На начальном этапе дешифрированы курумы и созданы маски их открытых частей. Затем в Google Earth Engine были подобраны подходящие снимки Landsat и Sentinel-2 и замаскированы облака, далее – рассчитаны индексы *NDVI* и *NDMI*, составлены композиты их максимальных показателей за период активной вегетации каждого года (т. е. каждому пикселю независимо присва-

ивались максимальные значения – для минимизации влияния облачности). Отдельно проводился анализ связи изменения значений *NDVI* и *NDMI* с морфометрическими характеристиками курумовых склонов.

Основным источником исходных данных для оценки изменений курумовых ландшафтов таежной зоны являлся архив космических снимков Landsat (разрешение 30 м), полученных со съемочных систем TM, ETM+ и OLI. Использовались сцены второго уровня обработки, который включает не

только радиометрическую и геометрическую, но и атмосферную коррекцию, т. е. значения космоснимков соответствуют отражению земной поверхности (Surface Reflectance), что позволяет не проводить дополнительную подготовку снимка при расчете вегетационных индексов. Обработка снимков осуществлялась с использованием облачной платформы Earth Engine, позволяющей производить работу с архивами снимков непосредственно на сервере. Для доступа к Earth Engine (Earth Engine JavaScript API) использовалась специализированная веб-среда (Code Editor), применяющая протоколы на языке Java. Отбор снимков производился по ключевым

районам исследования с учетом следующих критериев: минимальная облачность (<10%), даты съемки – с 01.07.1992 по 31.08.2023, месяцы – июль и август. Снимки с разных спутников Landsat были объединены в единую коллекцию изображений, при этом данные с Landsat OLI предварительно калибровались для сопоставления с предыдущими спутниками Landsat TM и ETM+ с использованием коэффициентов, предложенных в работе [Roy et al., 2016]. Для верификации дополнительно использовались снимки Sentinel-2, они также имеют второй уровень обработки, но отличаются более высоким пространственным разрешением (10 м).

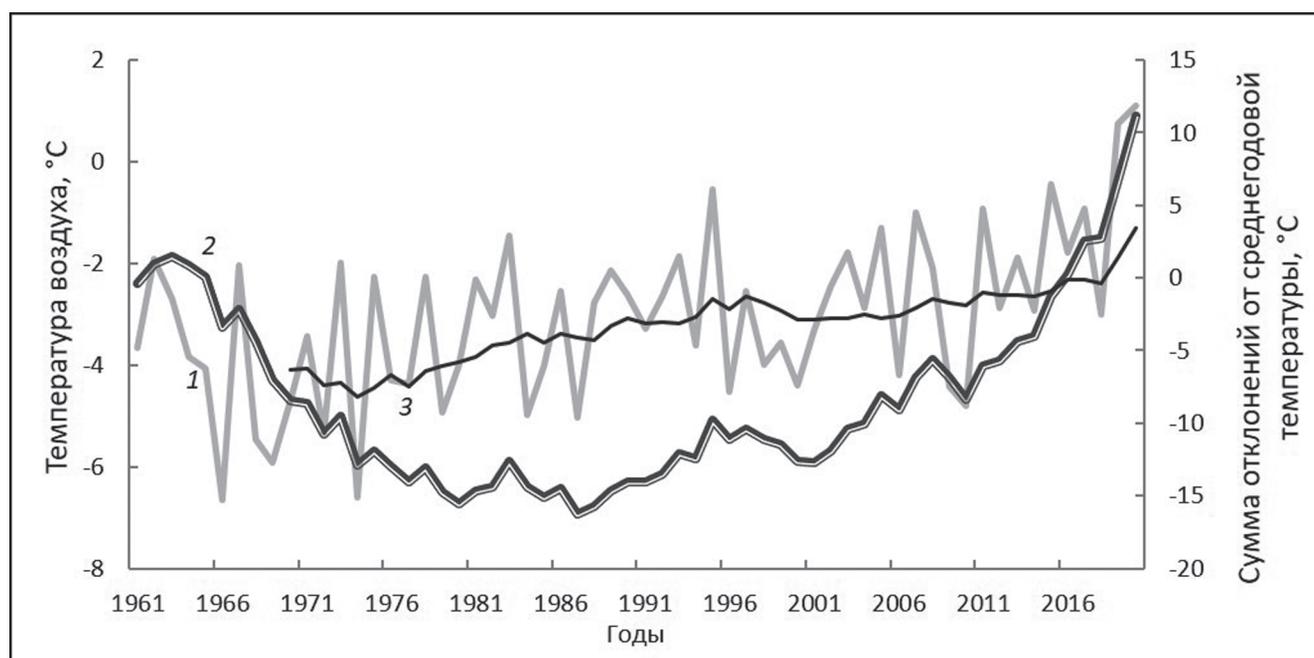


Рис. 2. Изменение температуры воздуха: 1 – среднегодовая температура воздуха; 2 – разностная интегральная кривая; 3 – 10-летнее скользящее среднее. Составлено по данным ЗГМО «Бор»

Fig. 2. Change in air temperature:

1 – Average annual air temperature; 2 – Difference integral curve; 3 – 10-year moving average. Compiled for the ZGMO “Bor”

**Дешифрирование и составление базы данных курумов.** На этапе дешифрирования составлялась база данных курумов по ключевым районам исследования. Отличительными признаками курумов являются: небольшая площадь открытой части склонов вытянутой формы, относительно высокая яркость и светлый тон на космических снимках, склоны с крутизной от 10°. Необходимо было отделить курумы от схожих по спектральным и морфологическим характеристикам болот, часто встречающимся в долинах рек, а также речных отмелей. Болота расположены на пойме, обычно близко к речному руслу. Для них характерны очень пологие поверхности и в основном они уже были отмечены на топокарте. В сложных случаях для уточнения

использовались космоснимки сверхвысокого разрешения (с сервисов Google и Yandex). Учитывая, что курумы приурочены к скальным выходам на крутых поверхностях и склонах средней экспозиции (это участки, где реки «прорезают» плотные породы), при отсутствии данных условий объект не считался курумом. Отмели располагаются в пределах русла и рядом с ним, отличаются высокой яркостью, поэтому они легко идентифицировались и не учитывались в исследовании. Кроме того, если площадь открытой части курума была недостаточно большой, такие участки также исключались из анализа. Выделение участков с курумами проводилось вручную по снимкам Sentinel-2 и топографическим картам, а при необходимости производилось уточ-

нение по снимкам сверхвысокого разрешения, находящимся в открытом доступе. В качестве эталонов использованы курумы, закартированные в ходе полевых исследований. В итоге были получены два полигональных слоя (по одному на каждый район исследования), состоящие из набора полигонов. В созданных слоях отображается очерчивание каждым полигоном местности, в пределах которой находится открытая часть склоновых поверхностей с курумами. Так, если склон существенно менял свою экспозицию, то для дальнейшего анализа создавал-

ся новый полигон. Всего для анализа был создан 41 полигон: 21 – для района «Большая Черная» и 20 – для района «Алексис» (рис. 4 и 5).

Далее внутри каждого полигона с использованием снимка Landsat-4 (14.07.1992) и снимка Sentinel-2 (09.08.2020) проведена классификация с обучением для выделения двух классов: «лес» и «открытый курум». Классу «лес» присваивались значения NoData, что позволило попиксельно выделить открытые части курумов для проведения дальнейшего анализа. Полученные растры векторизовались.

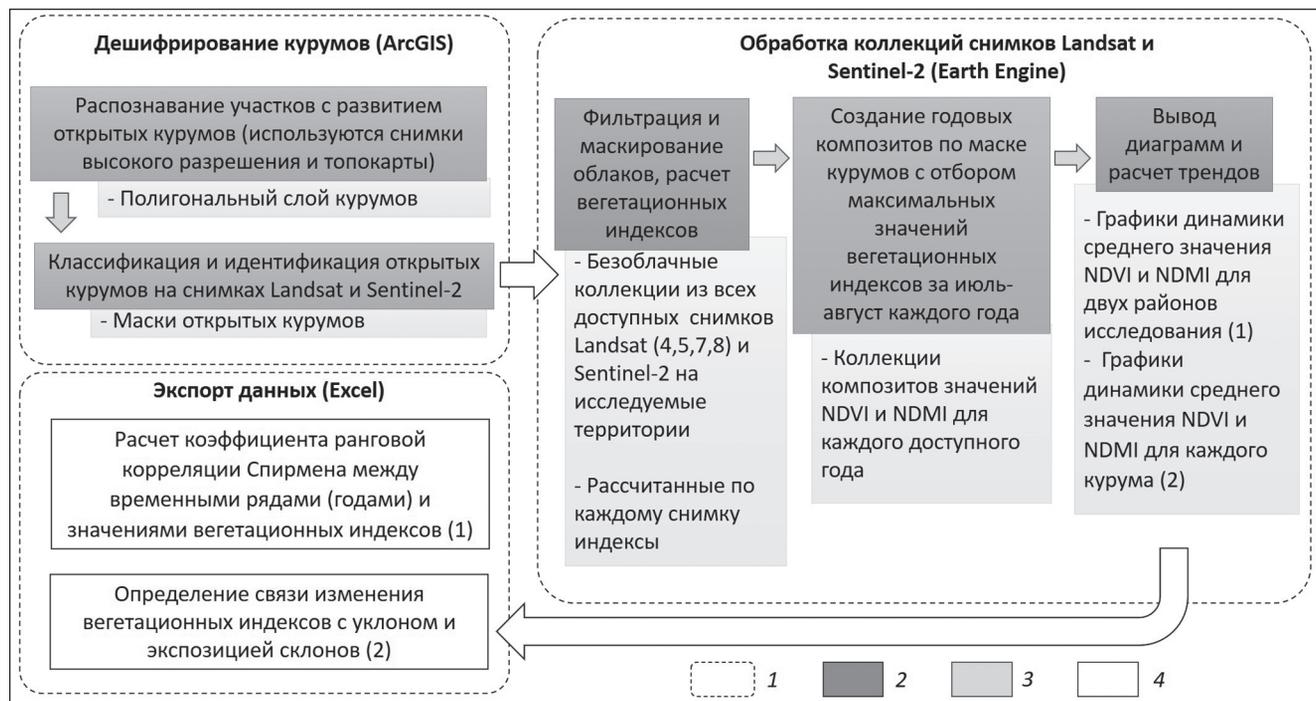


Рис. 3. Алгоритм исследования: 1 – основные этапы; 2 – описание процедуры; 3 – результат выполнения процедуры; 4 – итоговые результаты

Fig. 3. Algorithm of the study: 1 – the main stages; 2 – description of the procedure; 3 – the result of the procedure; 4 – final results

С целью проведения морфометрического анализа по топографической карте с масштабом 1 : 100 000 были оцифрованы горизонтали, по которым с использованием слоя рек проинтерполирована земная поверхность (инструмент TopoRaster в ArcGIS). Была получена цифровая модель рельефа, которая использовалась для расчета средних уклонов и экспозиции каждого участка анализируемого курума.

**Обработка снимков в Earth Engine.** После фильтрации всех снимков из архива Landsat, маскирования облаков и объединения их в единую коллекцию были рассчитаны индексы *NDVI* и *NDMI*. Индекс *NDVI* является показателем фотосинтетически активной фитомассы, которая напрямую связана с плотностью растительного покрова. Он рассчитывается по формуле:

$$NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED), \quad (1)$$

где *RED* – красный (0,63–0,69), *NIR* – ближний инфракрасный (0,77–0,89) каналы.

Индекс *NDMI* рассчитывается на основе среднего инфракрасного канала, который чувствителен к содержанию влаги в листьях, поэтому позволяет оценивать увлажнение растительного покрова. *NDMI* рассчитывается по формуле:

$$NDMI = (NIR - SWIR)/(NIR + SWIR), \quad (2)$$

где *SWIR* – средний инфракрасный канал (1,5–1,7 мкм).

Оба индекса нормализованные, что позволяет сравнивать их значения за разные годы. Показатели рассчитывались по каждому снимку,

затем из снимков одного вегетационного сезона (июль–август) составлялся композит максимальных значений используемых индексов. Этот подход широко используется при анализе динамики *NDVI* для удаления остаточного влияния облачности, снижающей значения данного индекса. Затем значения индексов усреднялись с использованием векторизованной маски открытых частей курумов,

полученной при их дешифрировании и классификации на предыдущем этапе. Так были получены осредненные максимальные значения по каждому участку курумов за каждый анализируемый год. Затем значения данного года усреднялись по всем курумам исследуемого района. Все временные ряды были экспортированы в MS Excel для их дальнейшего анализа.

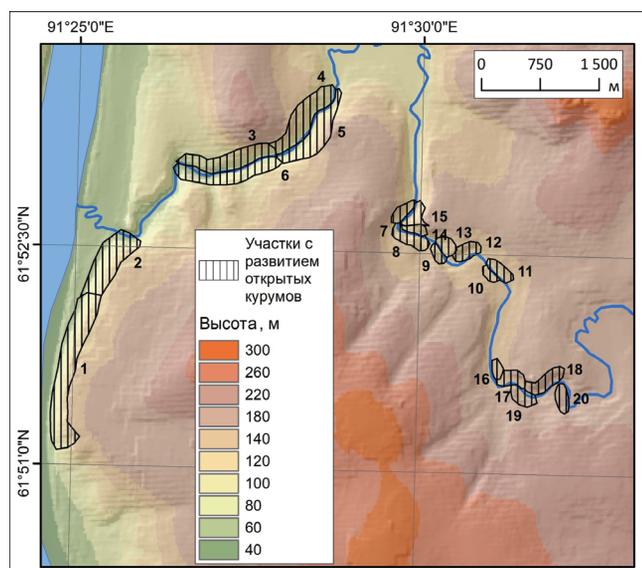


Рис. 4. Расположение изучаемых курумов в районе исследования «Алексис»

Fig. 4. Location of studied kurums in the area of the “Alexis” study

Для определения устойчивости трендов изменения индексов их годовые ряды и сами годы были ранжированы по порядку. Далее между ними был рассчитан ранговый коэффициент корреляции Спирмена. Если в каждый следующий период (в данном случае год) ранг значения больше предыдущего, то ряд устойчиво растет и его коэффициент равен 1, в случае уменьшения значений ряда отмечается отрицательная тенденция, при 0 – нет устойчивой тенденции.

Таким образом, по разнице значений 1992 и 2023 гг. рассчитано изменение вегетационных индексов за 32 года ( $\Delta NDVI$  и  $\Delta NDMI$ ).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Морфометрические параметры курумов.** Значительная часть дешифрированных курумов занимает склоны юго-западной и южной экспозиций (около 40%), очень редко (менее 10% от общего количества) каменистые россыпи отмечаются на склонах, обращенных на север и восток. Исследуемые курумы располагаются на склонах с разной

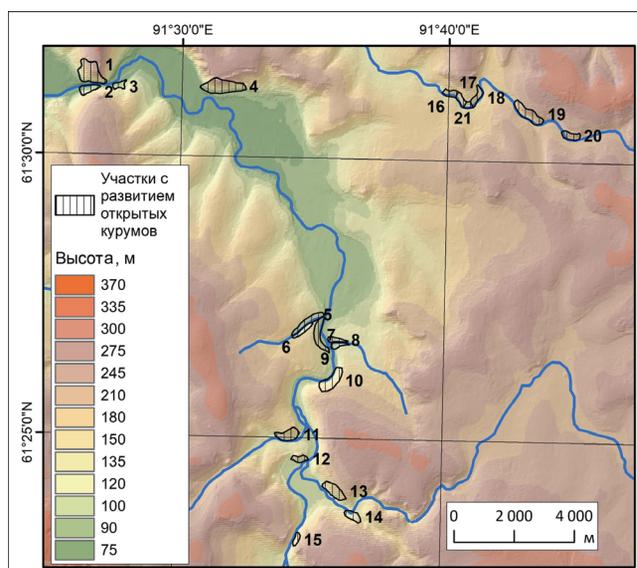


Рис. 5. Расположение изучаемых курумов в районе исследования «Большая Черная»

Fig. 5. Location of studied kurums in the area of the “Big Black” study

крутизной (от 5 до 22°), в среднем – около 11° (±4°). Курумы района «Алексис» встречаются на несколько более низких гипсометрических позициях (50–150 м) в сравнении с грубообломочными накоплениями района «Большая Черная» (70–180 м). Размер курумовых «островов» колеблется от 900 до 151 тыс. км<sup>2</sup> (медиана по району «Большая Черная» – 3600 м<sup>2</sup>, а по району «Алексис» – 4500 м<sup>2</sup>) (табл. 1). Данные значения относятся к открытой части курумов (т. е. той, которая была определена как курум в ходе классификации). В реальности открытые курумы имеют размытые границы, к тому же они постепенно переходят в «закрытые» (т. е. заросшие), простираясь далее под лесным пологом.

**Соотношение динамики *NDVI* и *NDMI* для индикации изменений.** Использование *NDVI* для целей ландшафтной индикации климатических изменений широко распространено в мировой практике. Так, в ряде работ зарубежных ученых [Ichii et al., 2002; Jia et al., 2009; Ju, Masek, 2016; Housset et al., 2019] отмечена связь между ростом *NDVI* и увеличением среднегодовых температур воздуха в северных широтах. К подобным же вы-

водам приходят и российские ученые [Кравцова, Лошкарева, 2013; Тишков и др., 2016; Цепелев и др., 2015; Титкова, Виноградова, 2019; Высоцкая, Медведков, 2022]. Тенденции изменения *NDVI* в большинстве случаев сопровождаются ростом альбедо, что свидетельствует об увеличении лесистости территорий.

Учитывая важную роль мхов в процессе зарастания курумов, необходимо оценить их вклад в изменение значений *NDVI* при разных условиях увлажнения. В данном отношении мы опираемся на одно из исследований [May, Parker, Ungeret, 2018], в котором проанализирована роль мхов в изменении

значений *NDVI* в увязке с динамикой наземного увлажнения и величиной первичной продукции. Отмечена важная особенность, что на значения *NDVI* в районах преимущественного развития мхов сильно влияет степень их увлажнения. Это проявляется в следующем виде: при высыхании мхов *NDVI* снижается, а сразу после намочения снова достигает значений, близких к начальным, хотя первичная продукция при этом не меняется. Такого эффекта не отмечено для сосудистых растений, так как они всегда имеют внутренний запас воды, поэтому значения *NDVI* и первичной продукции в данном случае имеют прямую связь [May et al., 2018].

Таблица 1

### Основные морфометрические характеристики курумов в двух районах исследования

Район исследования	Абсолютная высота, м	Площадь, тыс. м <sup>2</sup>	Крутизна, град.	Преобладающая экспозиция
«Алексис»	50–150	<20 и 60–150	7–17	Юго-запад, запад
«Большая Черная»	70–180	<50	5–21	Юг, юго-запад

В связи с отмеченной ролью увлажнения мхов в колебаниях значений *NDVI*, нами для курумов исследуемых районов были сопоставлены показатели *NDVI* и *NDMI*. Полученный результат показывает прямую корреляционную зависимость между вегетационными индексами: для района «Алексис» –  $R^2 = 0,93$  и для района «Большая Черная» –  $R^2 = 0,488$ . Эти результаты позволяют сделать предположение о не столь значимой роли мхов в формировании спектральных характеристик курумных ландшафтов района «Алексис», естественно, в сравнении с курумами района «Большая Черная».

В данной работе анализируются оба вегетационных индекса (*NDVI* и *NDMI*), они широко используются для оценки биофизической специфики подстилающей поверхности [Wilson, Sader, 2002]. Повышение значений *NDVI* интерпретируется нами как рост продуктивности вегетирующей растительности за счет увеличения площади и мощности мохово-лишайникового покрова, а также развития древесного подроста. Высокие значения *NDMI* могут подтвердить наличие в поверхностном слое курума влаги, необходимой для регенерации гольцового льда и возобновления курумодесерпции. Рассчитав изменения вегетационных индексов для курумов исследуемых районов, можно выявить те из них, которые характеризуются наибольшим приростом фитомассы. Соответственно, такие курумы и представляют наибольший интерес с точки зрения исследования феномена потенциальной аградации многолетней мерзлоты в условиях потепления климата.

**Анализ пространственно-временных особенностей динамики *NDVI* и *NDMI*.** Для описания динамики значений индексов, осредненных по курумам ключевых районов, используется линейный тренд, так как это наиболее простая функция, отражающая тенденцию происходящих изменений.

*NDVI*. В пространственном отношении изменение индекса *NDVI* характеризуется неравномерностью, что проявляется не только в масштабе ключевых районов исследования (рис. 6), но и в пределах отдельных курумов. Так, в границах одного и того же курума  $\Delta NDVI$  (разница значений между 1992 и 2023 гг.) может варьировать от +0,07 до +0,16, что свидетельствует о «пятнистом» характере их зарастания.

На более мелкомасштабном уровне изменения имеют иной характер. Так, в районе «Алексис» среднее значение *NDVI* несколько меньше, и  $\Delta NDVI$  (разница значений между 1992 и 2023 гг.) менее выражена по сравнению с районом «Большая Черная». Ряд значений *NDVI* по курумным ландшафтам района «Алексис» аппроксимируется прямой с коэффициентом детерминации ( $R^2 = 0,819$ ),  $\Delta NDVI$  достигает +0,173. Тогда как для курумных геосистем района «Большая Черная» коэффициент ниже ( $R^2 = 0,716$ ), и  $\Delta NDVI$  также менее выражена, составляя +0,111 (см. рис. 5). Среднеголетнее изменение *NDVI* по курумам района «Алексис» составляет +0,054 за 10 лет, по району «Большая Черная» +0,035 за 10 лет, что сопоставимо с тенденциями «позеленения» тундровых, лесотундровых и северотаежных ландшафтов в Средней Сибири [Титкова, Виноградова, 2019]. Полученные значения, со-

гласно данным повторных полевых исследований, свидетельствуют об увеличении площадного покрытия мхов, кустарников и подроста из мелколиственных пород древостоя [Медведков, 2016; 2018].

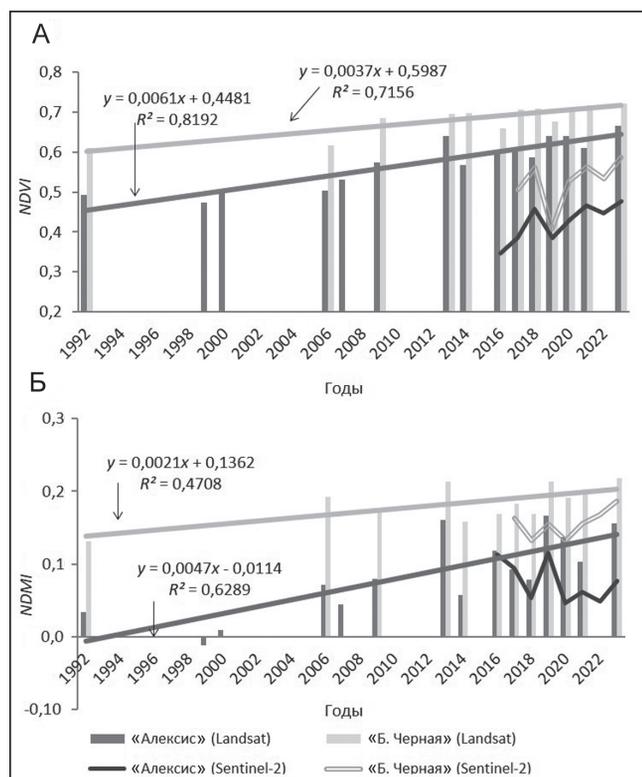


Рис. 6. Межгодовая динамика индексов:  
А – *NDVI*; Б – *NDMI*

Fig. 6. The interannual dynamics of *NDVI* (A) and *NDMI* (B) indices

*NDMI*. Изменение *NDMI*, как и *NDVI*, характеризуется пространственно-временной неоднородностью, в общих чертах схожей с картиной по *NDVI*. В целом с начала исследуемого периода (с 1992 г.) отмечается тенденция к увеличению значений *NDMI* по районам развития курумных ландшафтов (см. рис. 6). Так, для района «Алексис» увеличение *NDMI* составляет в среднем +0,038 за 10 лет,  $R^2 = 0,628$ , а изменения индекса в бассейне р. Большой Черной более стагнирующие: увеличение *NDMI* составляет в среднем +0,027 за 10 лет,  $R^2 = 0,471$ . При этом заметим, что значения *NDMI* в районе «Алексис» в среднем ниже, чем на каменистых россыпях района «Большая Черная», что, по-видимому, обусловлено их большей залесенностью в бассейне р. Большой Черной.

Для верификации рядов, полученных при работе со снимками Landsat TM, аналогичные расчеты выполнены и по снимкам Sentinel-2. Они охватывают гораздо более короткий период (с 2016–2017 гг.), но имеют более высокое пространственное раз-

решение, что позволяет точнее оценить тенденции зарастания открытых курумов. Рассчитанные по снимкам Sentinel-2 значения *NDVI* и *NDMI* для района «Большая Черная» хорошо коррелируют со значениями, полученными по снимкам Landsat TM ( $R = 0,961$  и  $R = 0,681$ ), но при этом аналогичные характеристики для района «Алексис» показывают слабую корреляцию ( $R = 0,32$  и  $R = 0,35$ ). Отметим, что значения индексов, рассчитанных по снимкам Sentinel-2, в обоих случаях несколько ниже показателей, полученных с использованием архива космоснимков Landsat. Данная особенность объясняется лучшей идентификацией открытых частей склонов, произведенной по снимкам Sentinel-2. Не столь высокая корреляция по району «Алексис», по-видимому, связана с тем, что в первый год, когда была доступна съемка с Sentinel-2 (2016 г.), облака закрывали большую часть данной территории. Тем не менее для двух районов исследования отмечается тенденция к росту значений *NDVI* как по данным, полученным при обработке снимков Landsat TM, так и Sentinel-2. По *NDMI* отмечается менее выраженный рост значений, что особенно заметно по результатам обработки снимков Sentinel-2.

Несмотря на выраженный рост анализируемых значений вегетационных индексов, следует отметить колебательный характер их динамики (см. рис. 6). Данная особенность может быть объяснена соответствующим «поведением» прироста мхов, обусловленного погодными колебаниями на протяжении всего вегетационного периода. Так, например, наибольший линейный прирост у сфагновых мхов, произрастающих в карельской тайге, отмечен в вегетационные периоды с теплой весной и теплым влажным летом [Grabovik, Nazarova, 2013], а в хибинской тайге отмечаются схожие тенденции прироста у зеленых мхов – максимальная скорость их роста фиксировалась при достаточном увлажнении при температуре теплого периода от 11 до 17°C [Ermolaeva et al., 2013]. Таким образом, не только прирост тепла, о котором говорилось выше, является фактором роста фитомассы мхов, но и вариабельность увлажнения на протяжении вегетационного периода также оказывает заметное влияние на динамику биопродукционного процесса и его характер.

При анализе пространственного распределения значений вегетационных индексов учитывалась крутизна склоновых поверхностей и их экспозиция (рис. 7). Роль крутизны склоновых поверхностей в динамике вегетационных индексов явно не выражена (см. рис. 7Б). Возможно, это связано с тем, что исследуемые курумы мало отличаются по крутизне, так как на пологих склонах они не получают развития. Роль экспозиционного фактора проявляется

в более выраженных положительных изменениях  $NDVI$  на склонах, обращенных на север и северо-восток, где курумовые ландшафты более чувствительны к росту теплообеспеченности (см. рис. 7А). При этом следует отметить, что на начало исследуемого периода (1992 г.) курумы западной и северо-

ро-западной экспозиций отличались наименьшими значениями  $NDVI$ , т. е. находились на более ранних стадиях зарастания. Наибольшие изменения  $NDMI$  характерны для курумов, расположенных на склонах северной, отчасти – северо-западной и юго-западной экспозиций (см. рис. 7А).

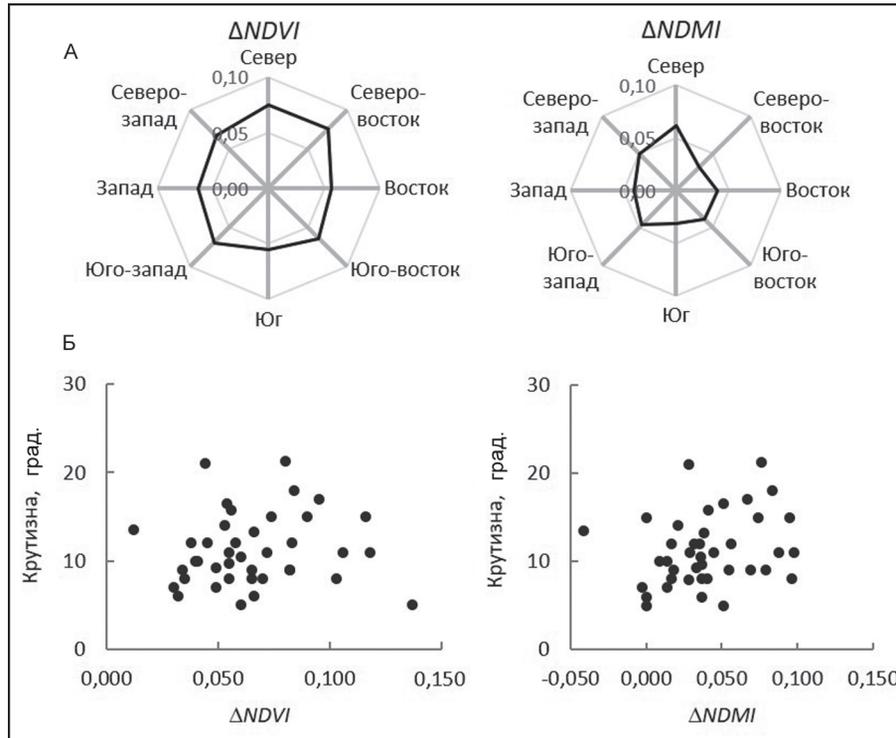


Рис. 7. Зависимость  $NDVI$  и  $NDMI$  от экспозиции (А) и крутизны (Б) склонов, на которых расположены курумы  
Fig. 7. Dependence of  $NDVI$  and  $NDMI$  on the exposure (А) and steepness (Б) of the slopes on which the kurums are located

Общая корреляция между положительной динамикой обоих индексов высокая ( $R = 0,930$ ). На курумах района «Алексис» отмечается высокая степень корреляционной зависимости ( $R = 0,930$ ), на курумах района «Большая Черная» она проявляется меньше ( $R = 0,48$ ). Таким образом, динамика значений вегетационных индексов ( $NDVI$  и  $NDMI$ ) позволяет выявить наиболее и наименее откликающиеся на климатические изменения курумы.

**Типизация курумов по скорости изменений.** В зависимости от характера динамики вегетационных индексов все курумы были разделены на три группы (табл. 2): с максимальным приростом обоих индексов ( $\Delta NDVI > 0,15$ ;  $\Delta NDMI > 0,1$ ); со средними значениями положительной динамики или ярко выраженным откликом одного из индексов и с минимальным приростом обоих индексов ( $\Delta NDVI < 0,1$ ;  $\Delta NDMI < 0,05$ ).

Практически всю первую группу составляют глыбовники района «Алексис», в основном совсем небольшие по площади каменистые россыпи. Высокая скорость их зарастания, вероятно, объясня-

ется тем, что оно началось позже, чем на курумах Большой Черной. Увеличение  $NDMI$  на склонах «холодных» экспозиций может быть связано с активным нарастанием сфагновых мхов, скорость роста которых достигает 8–9 мм/год [Гончарова, 2005], что наблюдается в условиях повышенного наземного увлажнения.

Курумы второй группы весьма неоднородны. В нее входят те курумовые ландшафты, которые характеризуются средними значениями обоих вегетационных индексов или имеют выраженные изменения только по одному из них.

Курумы третьей группы – это те глыбовники, которые в течение исследуемого периода практически не меняли своего состояния. Они встречаются в пределах района «Алексис» и на территории района «Большая Черная». Более  $\frac{2}{3}$  курумов из данной категории располагаются на склонах южной, юго-западной и юго-восточной экспозиций. Вероятно, часть из них уже перешла в стабильное (реликтовое) состояние.

**Механизм трансформации.** Представляется, что процесс зарастания курумов в условиях потепления климата развивается следующим образом. В основании курума вытаивает гольцовый лед, вызывая ослабление курумодесерпции и суффозии. В дальнейшем это способствует кольматации межглыбового пространства курума и созданию условий для закрепления растений. На кольматированной мелкоземом поверхности курума поселяются не только лишайники, мхи, способствующие формированию органогенного горизонта, но и мелколиственные породы – чаще береза, иногда с примесью рябины, в нижних частях склонов – ива. Отмечено, что в местах скопления лишайников скорость накопления мелкозема выше, по-видимому, за счет более интенсивного биохимического выветривания. Далее развивается процесс почвообразования, в результате чего курумоземы переходят в маломощные скелетные буротаежные почвы. Отдельные разоб-

щенные участки почвенно-растительного покрова сливаются в единое образование и постепенно формируется мощный теплоизолирующий торфо-растительный слой. При этом, зачастую увеличивается и доля сфагновых мхов. Почва становится торфянистой и/или торфяной. Конечной стадией становится переход курума в «висячее» болото [Медведков, 2016]. Данный процесс способствует накоплению влаги в куруме, что может приводить к новообразованию гольцового льда.

Сегодня курумы находятся на различных стадиях зарастания «позеленения»: часть из них начала зарастать раньше исследуемого периода и уже не отличается от залесенных территорий на космоснимках, а другая часть находится на начальной стадии зарастания. Несмотря на указанную дифференциацию, общий тренд «позеленения» курумов имеет сходные черты, это фиксируется по материалам космосъемки и подтверждается данными повторных наземных наблюдений.

Таблица 2

### Группы курумов, различающиеся по реакции растительности на потепление климата

Группа по динамике значений	$\Delta NDMI$	$\Delta NDMI$	Преобладающая экспозиция	Номера курумов (рис. 4 и 5)	Кол-во курумов
Максимальные (1-я группа)	$>0,15$	$>0,11$	Юго-запад и северо-запад	«Алексис»: 1, 2, 6, 7, 10, 11, 18, 20; «Большая Черная»: 5, 6, 21	11
Средние (2-я группа)	$0,1-0,15$	$0,01-0,11$	Юго-запад, юг, северо-запад	«Алексис»: 5, 9, 15–17; «Большая Черная»: 1–3, 5, 7, 8, 10, 14–20	19
Минимальные (3-я группа)	$<0,1$	$<0,005$	Юго-запад, юго-восток, юг	«Алексис»: 3, 4, 8, 12–14, 19; «Большая Черная»: 4, 9, 10–13	13

### ВЫВОДЫ

Для оценки «позеленения» курумных ландшафтов рассчитаны вегетационные индексы  $NDVI$  и  $NDMI$  (для 49 курумов). Динамика данных индексов с 1992 по 2023 г. (за 32 года) не только подтверждает, но и позволяет экстраполировать выводы, полученные по результатам полевых исследований на более значительную территорию. Пространственная картина изменения вегетационных индексов позволила оценить неоднородность зарастания курумов на значительных по площади территориях. Так, наиболее выраженные положительные изменения индекса  $NDVI$  характерны для курумов северной, северо-восточной, в несколько меньшей степени – северо-западной, западной и юго-западной экспозиций,  $NDMI$  – для северной, в несколько меньшей степени – северо-западной и юго-западной экспозиций. Влияние крутизны склонов в явном виде не выражено.

Изменение значений вегетационных индексов за рассматриваемый период описывается линейной функцией. Среднее изменение значений  $NDVI$  для курумов района «Алексис» составляет +0,198, что соответствует тренду +0,061 за 10 лет, по району «Большая Черная» среднее изменение индекса  $NDVI$  составляет +0,101 с трендом +0,031 за 10 лет. Среднее изменение  $NDMI$  по курумам «Алексиса» составляет +0,016 и +0,051 за 10 лет, по курумам «Большой Черной» динамика  $NDMI$  также имеет слабую тенденцию к росту: +0,065 и +0,020 за 10 лет.

В зависимости от характера динамики вегетационных индексов, все курумы были разделены на три группы: с максимальным приростом обоих индексов ( $\Delta NDMI > 0,15$ ;  $\Delta NDMI > 0,1$ ) – 28 курумов; со средними значениями обоих вегетационных индексов или с выраженными изменения по одному из них – 22 курума и с минимальным приростом обоих индексов ( $\Delta NDMI < 0,1$ ;  $\Delta NDMI < 0,01$ ) – 16 курумов.

Несмотря на выявленную дифференциацию, зарастание каменистых россыпей на каждом из участков имеет пятнистую структуру, что свидетельствует о высокой мозаичности процесса «позеленения» на локальном уровне.

Курумные склоны, характеризующиеся наибольшим приростом значений вегетационных индексов, представляют значительный интерес с точки зрения исследования феномена аградации гольцового льда в условиях прогрессирующего потепления климата.

Результаты полевых исследований показывают, что к числу наиболее выраженных признаков климатогенного изменения курумных ландшафтов отно-

сятся: вытаивание гольцового льда в межглыбовом пространстве курумов, формирование вогнутого профиля курумного склона с наличием отдельных провалов, увеличение площади лишайникового покрова на глыбовой поверхности каменистых россыпей и их зарастание мелколиственным лесом. Представляется, что индикация данных изменений возможна с использованием вегетационных индексов. Полученные с использованием дистанционных и полевых данных результаты, позволяют говорить о переходе курумных ландшафтов исследуемой территории в состояния, более характерные для южной тайги, что подтверждает изменение зонально-ландшафтных условий.

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-77-00048 (<https://rscf.ru/project/21-77-00048/>).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В.Р. Курумы – феномен криосферы // Наука и техника в Якутии. 2018. № 2. С. 72–88.
- Высоцкая А.А., Медведков А.А. Климатогенное «позеленение» курумных ландшафтов в долине нижнего течения реки Подкаменная Тунгуска // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2022. Т. 28. № 1. С. 305–313. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-305-313.
- Гончарова И.А. К вопросу о структуре дерновины и продуктивности сфагновых мхов на олиготрофных болотах // Сибирский экологический журнал. 2005. № 1. С. 131–134.
- Горишков С.П. Климат, мерзлота и ландшафты Средне-енисейского региона. М.: МГУ, 2003. 81 с.
- Железняк И.И., Мальчикова И.Ю., Шполянская Н.А. и др. Курумы Северного Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1992. 182 с.
- Золотокрылин А.Н., Кренке А.Н., Виноградова В.В. Районирование России по природным условиям жизни населения. М.: ГЕОС, 2012. 156 с.
- Кравцова В.И., Лошкарева А.Р. Динамика растительности экотона тундра–тайга на Кольском полуострове в связи с климатическими колебаниями // Экология. 2013. № 4. С. 1–9. DOI: 10.7868/S0367059713040082.
- Маизенберг М.С. Почвообразование на курумах (на примере Сихотэ-Алиня): автореф. дис. ... канд. биол. наук: М., 1991. 25 с.
- Медведков А.А. Геоэкологический отклик среднетаежных ландшафтов Приенисейской Сибири на потепление климата конца XX – начала XXI века // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2014. № 6. С. 541–552.
- Медведков А.А. Как глобальное потепление меняет природу сибирской тайги? // Природа. 2016. № 12 (1216). С. 40–47.
- Медведков А.А. Климатогенная динамика ландшафтов сибирской тайги в бассейне Среднего Енисея // География и природные ресурсы. 2018. № 4. С. 122–129. DOI: 10.21782/GiPR0206-1619-2018-4(122-129).
- Туткова Т.Б., Виноградова В.В. Изменения климата в переходных природных зонах севера России и их проявление в спектральных характеристиках ландшафтов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 310–323. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-310-323.
- Тишков А.А., Белоновская Е.А., Вайсфельд М.А. и др. «Позеленение» ландшафтов Арктики как следствие современных климатогенных и антропогенных трендов растительности // Известия Русского географического общества. 2016. Т. 148. № 3. С. 14–24.
- Целев В.Ю., Паниди Е.А., Торлопова Н.В. и др. Использование характеристик растительного покрова таежной зоны для мониторинга климатических изменений XXI в. // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2015. № 40. С. 221–235.
- Ermolaeva O.V., Shmakova N.Yu., Lukyanova L.M. On the growth of Polytrichum, Pleurozium and Hylocomium in the forest belt of the Khibiny Mountains, *Arctoa*, 2013, vol. 22, p. 7–14.
- Grabovik S.I., Nazarova L.E. Linear increment of Sphagnum mosses on Karelian mires (Russia), *Arctoa*, 2013, vol. 22, p. 23–26.
- Housset J., Dedieu J.-P., Lévesque E. et al. Greening dynamics of vegetation in the high latitudes: case study of the George River basin (Nunavik, Canada) from 1985–2015 Landsat data, *Geophysical Research Abstracts*, 2019, no. 21, p. 1–1.
- Ichii K., Kawabata A., Yamaguchi Y. Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982–1990, *International Journal of Remote Sensing*, 2002, no. 23, p. 3873–3878, DOI: 10.1080/01431160110119416.
- Jia G.J., Epstein H.E., Walker D.A. Vegetation greening in the Canadian Arctic related to decadal warming, *Journal of Environmental Monitoring*, 2009, no. 11, p. 2231–2238, DOI: 10.1039/b911677j.
- Ju J., Masek J.G. The vegetation greenness trend in Canada and US Alaska from 1984–2012 Landsat data, *Remote Sensing of Environment*, 2016, no. 176, p. 1–16, DOI: 10.1016/j.rse.2016.01.001.
- May J.L., Parker T., Ungeret S. Short term changes in moisture content drive strong changes in Normalized Difference

- Vegetation Index and gross primary productivity in four Arctic moss communities, *Remote Sensing of Environment*, 2018, no. 3, p. 114–120, DOI: 10.1016/j.rse.2018.04.041.
- Medvedkov A.A. Response of middle-taiga permafrost landscapes of Central Siberia to global warming in the late 20th and early 21st centuries, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 48, 012009, DOI: 10.1088/1755-1315/48/1/012009.
- Medvedkov A.A. The Kets ethnos and its “feeding landscape”: ecological-geographical and socio-ecological problems under globalization and changing climate, *Geography, Environment, Sustainability*, 2013, vol. 6, no. 3, p. 108–118, DOI: 10.24057/2071-9388-2013-6-3-108-118.
- Roy D., Kovalskiyy V., Zhang H. et al. Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity, *Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 185, DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.024.
- Wilson E.H., Sader S.A. Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2002, no. 3, p. 385–396, DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00318-2.

Поступила в редакцию 03.05.2023

После доработки 16.01.2024

Принята к публикации 24.04.2024

## CLIMATE-DRIVEN CHANGES OF KURUM LANDSCAPES IN THE WEST OF THE CENTRAL SIBERIAN PLATEAU WITHIN THE MIDDLE TAIGA ZONE

A.A. Vysotskaya<sup>1</sup>, A.A. Medvedkov<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> *Lomonosov Moscow State University, Department of Physical Geography of the World and Geocology*

<sup>1</sup> *Postgraduate student; e-mail: an.vys@yandex.ru*

<sup>2</sup> *Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: a-medvedkov@bk.ru*

The change of bioproduction indicators on the kurum slopes of the western part of the Central Siberian Plateau under the modern climate warming is considered. The change in heat availability over the period from 1991 to 2020 was estimated in comparison to 1961–1990, and an increase in the sum of active air temperatures above 5°C and 10°C was noted by an average of 165°C and 8 days for both cases. The kurum slopes in the study areas were identified based on the processing of remote sensing data (satellite images of the Landsat series with 30-meter resolution and the Sentinel-2 with 10-meter resolution). The vegetation index series (NDVI and NDMI) were calculated for them using the archives of these images. This made it possible to assess the dynamics of photosynthetically active phytomass and moistening of the ground cover from 1992 to 2023. The index values were calculated as the maximum for the growing season (July–August) of the analyzed year for all low-cloud Landsat and Sentinel-2 scenes available for observation. In general, the interannual change in the NDVI and NDMI values averaged over the analyzed kurums tends to increase. There is a positive dynamic in the fluctuations of both vegetation indices during the study period. The kurum landscapes were typified by the rate of their overgrowth, kurums with the largest, average and smallest difference of the obtained values were identified, and their spatial distribution was estimated. The role of morphometric characteristics of slopes (including their exposure) in the processes of kurum overgrowth was analyzed. It was revealed that the maximum values of the growth of vegetation indices correspond to the slopes of cold exposures (northern, north-western and eastern), while the influence of steepness is insignificant. The positive dynamics of the values of vegetation indices allows suggesting the “greening” of kurum landscapes, which is also confirmed by the results of repeated studies at the key sites. The overgrowth of kurums includes the increase in the area and height of moss-lichen cover, the appearance of shrubs, the active growth of young small-leaved trees and rare undergrowth of conifers. The “greening” of kurum slopes is accompanied by the melting of the char ice, therefore, the middle taiga kurums of the Central Siberian Plateau become more characteristic of the southern taiga, which indicates a change in zonal landscape conditions in the areas of their occurrence.

**Keywords:** periglacial environments, rock glaciers, global climate warming, remote sensing data, spectral characteristics, vegetation changes, permafrost degradation, Yenisei Siberia

**Acknowledgment:** The study was financially supported of the Russian Science Foundation (project no. 21-77-00048, <https://rscf.ru/project/21-77-00048/>).

### REFERENCES

- Alekseev V.R. Kurumy – fenomen kriosfery [Kurums as a phenomenon of the cryosphere], *Nauka i tehnika v Jakutii*, 2018, no. 2, p. 72–88. (In Russian)
- Cepelev V.Ju., Panidi E.A., Torlopova N.V. et al. Ispol'zovanie harakteristik rastitel'nogo pokrova taezhnoj zony dlja monitoringa klimaticeskikh izmenenij XXI v. [Using the cha-

- racteristics of vegetation cover of the taiga zone for monitoring climate change in the 21st century], *Uchenye zapiski rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2015, no. 40, p. 221–235. (In Russian)
- Ermolaeva O.V., Shmakova N.Yu., Lukyanova L.M. On the growth of Polytrichum, Pleurozium and Hylocomium in the forest belt of the Khibiny Mountains, *Arctoa*, 2013, vol. 22, p. 7–14.
- Goncharova I.A. K voprosu o strukture dernoviny i produktivnosti sfagnovykh mhov na oligotrofnyh bolotah [On the structure of turf and productivity of sphagnum mosses in oligotrophic swamps], *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*, 2005, no. 1, p. 131–134. (In Russian)
- Gorshkov S.P., Vandenberg G., Alekseev B.A. *Climate, permafrost and landscapes of the middle Yenisei region*, Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2003, 81 p.
- Grabovik S.I., Nazarova L.E. Linear increment of Sphagnum mosses on Karelian mires (Russia), *Arctoa*, 2013, vol. 22, p. 23–26.
- Housset J., Dedieu J.-P., Lévesque E. et al. Greening dynamics of vegetation in the high latitudes: case study of the George River basin (Nunavik, Canada) from 1985–2015 Landsat data, *Geophysical Research Abstracts*, 2019, vol. 21, p. 1–1.
- Ichii K., Kawabata A., Yamaguchi Y. Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982–1990, *International Journal of Remote Sensing*, 2002, vol. 23, no. 18, p. 3873–3878, DOI: 10.1080/01431160110119416.
- Jia G.J., Epstein H.E., Walker D.A. Vegetation greening in the Canadian Arctic related to decadal warming, *Journal of Environmental Monitoring*, 2009, vol. 11, p. 2231–2238, DOI: 10.1039/b911677j.
- Ju J., Masek J.G. The vegetation greenness trend in Canada and US Alaska from 1984–2012 Landsat data, *Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 176, p. 1–16, DOI: 10.1016/j.rse.2016.01.001.
- Kravcova V.I., Loshkareva A.R. Dynamics of vegetation in the tundra-taiga ecotone on the Kola peninsula depending on climate fluctuations, *Russian journal of ecology*, 2013, no. 4, p. 1–9, DOI: 10.7868/S0367059713040082.
- Majzenberg M.S. *Pochvoobrazovanie na kurumah (na primere Sihote-Alinja)* [Soil formation on kurums (case study of the Sikhote-Alin Mountains)], Extended Abstract of PhD Thesis in biology, Moscow, 1991, 25 p. (In Russian)
- May J.L., Parker T., Ungeret S. Short term changes in moisture content drive strong changes in Normalized Difference Vegetation Index and gross primary productivity in four Arctic moss communities, *Remote Sensing of Environment*, 2018, vol. 212, p. 114–120, DOI: 10.1016/j.rse.2018.04.041.
- Medvedkov A.A. Geoekologicheskij otklik srednetaezhnykh landshaftov Prienisejskoj Sibiri na poteplenie klimata konca XX – nachala XXI veka [Geoenvironmental Response of the Mid-Taiga Landscapes of Yenisei Siberia to Global Warming during Late 20th – Early 21st Centuries], *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 2014, no. 6, p. 541–552. (In Russian)
- Medvedkov A.A. Kak global'noe poteplenie menyaet prirodu sibirskoj tajgi? [How does the global warming change the nature of the Siberian taiga?], *Priroda*, 2016, no. 12(1216), p. 40–47. (In Russian)
- Medvedkov A.A. Klimatogennaja dinamika landshaftov sibirskoj tajgi v bassejne Srednego Eniseja [Climatogenic dynamics of Siberian taiga landscapes in the middle Yenisei River basin], *Geografija i prirodnye resursy*, 2018, no. 4, p. 122–129, DOI: 10.21782/GiPR0206-1619-2018-4(122-129). (In Russian)
- Medvedkov A.A. Response of middle-taiga permafrost landscapes of Central Siberia to global warming in the late 20th and early 21st centuries, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 48, 012009, DOI: 10.1088/1755-1315/48/1/012009.
- Medvedkov A.A. The Kets ethnos and its “feeding landscape”: ecological-geographical and socio-ecological problems under globalization and changing climate, *Geography, Environment, Sustainability*, 2013, vol. 6, no. 3, p. 108–118, DOI: 10.24057/2071-9388-2013-6-3-108-118.
- Roy D., Kovalsky V., Zhang H. et al. Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity, *Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 185, DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.024.
- Tishkov A.A., Belonovskaja E.A., Vajsfel'd M.A. et al. “Pozeleenenie” landshaftov Arktiki kak sledstvie sovremennykh klimatogennykh i antropogennykh trendov rastitel'nosti [“Greening” of the Arctic landscape as a result of modern climate-caused and anthropogenic trends of vegetation cover], *Izvestija Russkogo geograficheskogo obshhestva*, 2016, vol. 148, no. 3, p. 14–24. (In Russian)
- Titkova T.B., Vinogradova V.V. Izmenenija klimata v peregodnykh prirodnykh zonah severa Rossii i ih pojavlenie v spektral'nykh karakteristikah landshaftov [Climate changes in transitional natural areas of Russian northern regions and their display in landscape spectral characteristics], *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, vol. 16, no. 5, p. 310–323, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-310-323. (In Russian)
- Vysotskaya A.A., Medvedkov A.A. Klimatogennoe “pozeleenenie” kurumovykh landshaftov v doline nizhnego techenija reki Podkamennaja Tunguska [Climate-driven “greening” of the kurum landscape in the valley of the lower reaches of the Podkamennaya Tunguska River], *InterKarto. InterGIS*, 2022, vol. 28, no. 1, p. 305–313, DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-305-313. (In Russian)
- Wilson E.H., Sader S.A. Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2002, vol. 80, no. 3, p. 385–396, DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00318-2.
- Zheleznyak I.I., Malchikova I.Yu., Shpolyanskaya N.A., Janauskas A.I. *Kurumy Severnogo Zabaikaliya* [Kurums of Northern Transbaikalia], Novosibirsk, Nauka Publ., Sib. Otd., 1992, 182 p. (In Russian)
- Zolotokrylin A.N., Krenke A.N., Vinogradova V.V. *Rajonirovanie Rossii po prirodnym uslovijam zhizni naselenija* [Zoning of Russia by the natural living conditions], Moscow, GEOS Publ., 2012, 156 p. (In Russian)

Received 03.05.2023

Revised 16.01.2024

Accepted 24.04.2024

## ДЕПОНИРОВАНИЕ УГЛЕРОДА В КАРСТОВОМ БОЛОТЕ МОРДОВСКОГО ЗАПОВЕДНИКА В ПОЗДНЕМ ГОЛОЦЕНЕ

К.Н. Дьяконов<sup>1</sup>, Н.Г. Мазей<sup>2</sup>, А.С. Прокушкин<sup>3</sup>, А.Е. Шатунов<sup>4</sup>,  
Э.П. Зазовская<sup>5</sup>, Е.Ю. Новенко<sup>6</sup>

<sup>1,2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии и ландшафтоведения

<sup>3</sup> Институт леса СО РАН, Лаборатория биогеохимических циклов в лесных экосистемах

<sup>4,6</sup> Институт географии РАН, Лаборатория эволюционной географии

<sup>5</sup> Институт географии РАН, Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии

<sup>1</sup> Зав. кафедрой, чл.-кор. РАН, д-р геогр. наук.; e-mail: diakonov.geofak@mail.ru

<sup>2</sup> Ст. науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: natashamazei@mail.ru

<sup>3</sup> Зав. лабораторией, канд. биол. наук; e-mail: prokushkin@ksc.krasn.ru

<sup>4</sup> Аспирант; e-mail: toxavilli@yandex.ru

<sup>5</sup> Зав. лабораторией, канд. геогр. наук; e-mail: zaszovsk@gmail.com

<sup>6</sup> Глав. науч. сотр., проф. РАН, д-р геогр. наук; e-mail: lenanov@mail.ru

В статье представлены результаты исследования депонирования углерода в течение последних 3000 лет в карстовом болоте Столбовое расположенного на территории Мордовского государственного природного заповедника имени П.Г. Смидовича, находящегося на южной границе области распространения хвойно-широколиственных лесов Восточно-Европейской равнины. В торфяной залежи болота Столбовое представлены низинные (осоковый, древесно-осоковый, травяной) и переходные виды торфа (сфагновый, травяно-сфагновый, осоково-сфагновый, пушицевый). Болото находится на мезотрофной стадии развития. Содержание органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ ) в исследованном болоте изменяется в диапазоне от 37,2 до 53,4%. В среднем содержание  $C_{\text{орг}}$  составляет 49,7%. Содержание азота в торфе претерпевает существенно более выраженные колебания по глубине по сравнению с  $C_{\text{орг}}$  – от 1,1 до 2,6% (среднее значение – 1,9%). Суммарный запас углерода в болоте Столбовое составил около 6,7 кг/м<sup>2</sup>.

Полученные данные показали высокую способность быстрорастущего карстового болота связывать атмосферный углерод. Скорость аккумуляции углерода в изученном болоте варьирует в диапазоне от 32,0 до 158,4 г С/м<sup>2</sup> в год, при среднем значении 68,9 г С/м<sup>2</sup> в год, что существенно выше средних значений скоростей депонирования углерода болотами различных типов в голоцене. Анализ распределения скорости накопления углерода по глубине торфяной залежи болота Столбовое не выявил зависимости между депонированием углерода и климатическими изменениями в течение последних 3000 лет. Существенный рост скорости аккумуляции углерода на глубине 60 см (480 кал. лет назад), возможно, связан с высокой продуктивностью сообщества сосудистых растений даже при повышенных уровнях минерализации/гумификации их остатков.

**Ключевые слова:** скорость аккумуляции углерода, элементный состав торфа, азот, ботанический состав торфа, гумификация торфа

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.3

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования депонирования углерода в болотных экосистемах долгое время остаются одной из самых актуальных тем научных работ, поскольку эта проблематика напрямую связана с изучением глобальных изменений климата и парникового эффекта. Активные исследования по оценке пулов и потоков углерода в лесах и болотах России начались в 1990-х гг. вслед за принятием Рамочной конвенции ООН по изменению климата [Углерод в экосистемах лесов и болот России, 1994; Вомперский, 1994]. Интерес к данной проблеме не снижается и на протяжении последующих десятилетий. Опре-

деленным стимулом к исследованиям в данном направлении послужила реализация государственной научно-технической политики Российской Федерации в области экологического развития и климатических изменений в направлении перехода к низкоуглеродной экономике [Указ Президента РФ..., 2021].

Запасы и процессы аккумуляции углерода в болотных комплексах на территории России изучены неравномерно. Лучше всего изучена территория Западной Сибири [Worren et al., 2004; Veilman et al., 2009; Инишева и др., 2016, 2023; Головацкая и др., 2022]. В Центральной Сибири подобные исследования провели на болотах северной части Сым-

Дубческого междуречья [Прокушкин и др., 2017]. Согласно опубликованным данным, для низинных болот в долинах рек была характерна большая скорость накопления углерода, чем для верховых на междуречье, найдена связь с климатическими изменениями.

В европейской части России подобных работ значительно меньше. Оценки скоростей накопления углерода в торфе наиболее полно проведены в Карелии и на северо-западе России [Елина, Токарев, 2010; Kobak et al., 1998]. Существуют оценки скорости накопления углерода в голоцене для болот на юге Валдайской возвышенности [Минаева и др., 2008]. В последние несколько лет появилась серия работ, посвященных запасам углерода и особенностям его аккумуляции в болотах разного генезиса Среднерусской возвышенности [Волкова и др., 2022; Volkova et al., 2022].

За рубежом проблема аккумуляции углерода в болотах также является одной из актуальных тем научных исследований. Опубликовано огромное количество работ, посвященных запасам углерода в конкретных болотных экосистемах и скоростям его накопления в торфе на протяжении голоцена [Belyea, Warner, 1996; Borren et al., 2004; Loisel, Garneau, 2010; Yu, 2011; Bellen et al., 2012; Charman et al., 2013; Gallego-Sala et al., 2018; Amesbury et al., 2019]. По результатам многочисленных исследований накопления углерода в болотных комплексах в различных регионах составлена база данных, включающая около 300 болот, и проведено обобщение этих данных [Loisel et al., 2014].

В настоящей работе представлены результаты исследования депонирования углерода в позднем голоцене болотным комплексом на территории Мордовского государственного природного заповедника имени П.Г. Смидовича, расположенного на южной границе зоны хвойно-широколиственных лесов Восточно-Европейской равнины. Способность болотных комплексов ландшафтов хвойно-широколиственных лесов связывать атмосферный углерод до настоящего времени мало изучена, а для исследуемого региона – это первые подобные исследования.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Исследуемая территория.** Мордовский государственный природный заповедник имени П.Г. Смидовича находится в центральном районе европейской части России, на территории Темниковского района в северо-западной части республики Мордовия. Заповедник занимает пологоволнистую равнину с глубоковрезанными долинами рек Мокша, Теш, Алатырь и их притоками. Коренные породы относятся к каменноугольной и юрской системам. Современная структура рельефа сформировалась

в четвертичный период. Плейстоценовые отложения представлены моренными суглинками донского оледенения и ранне- и среднелейстоценовыми флювиогляциальными песками [Ямашкин, 1998]. На участках, где четвертичные отложения имеют малую мощность, развиты карстовые процессы.

Территория Мордовского заповедника находится в умеренно-континентальной области умеренного климата. Среднегодовая температура на метеостанции в г. Темников составляет +5,7°C [Баянов, 2015]. Средняя температура воздуха в январе –9,0°C, в июле +17,2°C. Среднегодовое количество осадков достигает 560 мм.

Заповедник располагается на границе между Приволжской провинцией лесостепной области и Мещерской провинцией лесной области, расположенной в подзоне смешанных лесов. Площадь болот в Мордовском заповеднике по разным оценкам составляет от 2684 до 3288 га, а их количество превышает 300 [Гришуткин, 2011]. Флора болот заповедника, история их развития и возраст хорошо изучены [Гришуткин, 2011; Новенко, Куприянов, 2021; Новенко и др., 2018], однако оценка депонирования углерода болотами в голоцене не проводилась.

Объект исследования в представленной работе – болото Столбовое, расположено в юго-восточной части заповедника в карстовом понижении овальной формы (диаметром около 100 м) на водноледниковой слабовогнутой равнине в окружении соснового и березово-соснового леса. Перепад высот между поверхностью болота и окружающей его водно-ледниковой равниной составляет 4 м.

Окрайку болота формируют редкостойный березняк (береза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.) сомкнутость крон 0,3) высотой 10–12 м с редким подростом из березы и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), кустарниковый ярус представлен ивой (*Salix* sp.). В травяно-кустарничковом ярусе встречаются вахта трехлистная (*Menyanthes trifoliata* L.) нумбургия кистецветная (*Naumburgia thyrsiflora* L. (Rchb.)), осока (*Carex* sp.), вейник седеющий (*Calamagrostis canescens* (Weber.) Roth.), сабельник болотный (*Comarum palustre* L.), на пристовольных повышениях куртинами произрастает голубика (*Vaccinium uliginosum* L.). Моховой ярус имеет 100%-е покрытие, доминантом выступает *Sphagnum fallax* H. Klinggr.

В растительном покрове центральной части болота выделены два фитоценоза, занимающие почти равные площади. Северо-восточную часть болота, включая его центральную часть, где расположена точка бурения, занимает кустарничково-осоково-сфагновый фитоценоз. В довольно рыхлом травяно-кустарничковом покрове доминирующая роль принадлежит *Carex rostrata* и *Calamagrostis canescens*,

по сфагновому ковру (*Sphagnum fallax*) разрастается клюква болотная *Oxycoccus palustris* Pers.

Юго-западная часть болота представлена вейниково-моховым фитоценозом. В растительном покрове преобладает *Calamagrostis canescens*, в небольшом количестве отмечены *Menyanthes trifoliata*, *Naumburgia thyrsoflora*, *Comarum palustre*. Моховой ярус представлен сфагновыми мхами (ПП 80%): *Sphagnum fallax*, *Sph. majus* (Russow) С.Е.О. Jensen.

**Методы исследования.** Бурение торфяной залежи и отбор кернов выполнено в июле 2020 г. буром Сукачева производства фирмы Eijkelkamp с диаметром пробоотборника 5 см и длиной 50 см. Глубина торфяной залежи составила 240 см. В основании скважины вскрыты среднезернистые пески с включением органических остатков. Отбор образцов на все виды анализов проведен с интервалом 2 см, за исключением ботанического анализа торфа, где шаг опробования составил 4 см.

Определение абсолютного возраста трех образцов растительных остатков проведено в ЦКП «Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» Института географии РАН. Для калибровки радиоуглеродных дат (табл.) использована программа Calib 8.20 и калибровочная

кривая IntCal20 [Reimer et al., 2020]. Модель роста отложений выполнена в программе Bacon [Blaauw, Christen, 2011] в программной среде R.

Потери при прокаливании определены методом сухого озоления в муфельной печи при температуре 550°C [ГОСТ 28245-09]. Для последующих расчетов удельной плотности торфа потери при прокаливании определены в высушенном образце фиксированного объема 5 см<sup>3</sup>. Содержание гигроскопической влаги определено в сушильном шкафу при 105°. Объемная плотность торфа определена как отношение массы высушенного образца торфа к его объему в свежем состоянии. Удельная плотность сухой массы торфа (г/см<sup>3</sup>) рассчитана как произведение объемной плотности торфа и потерь при прокаливании.

Степень гумификации торфа, измеренная как оптическая плотность раствора торфяной вытяжки, подготовленного по стандартной методике [Chambers et al., 2010], определена при помощи спектрофотометра СПЕКТРОД-М при длине волны 540 нм. В значения измерений оптической плотности затем внесена поправка на зольность торфа [Chambers et al., 2010]. Для образцов торфа выполнен детальный анализ ботанического состава [Домбровская и др., 1959; Кац и др., 1977].

Таблица

### Результаты радиоуглеродного датирования и калиброванные значения возраста образцов торфа болота Столбовое

Лабораторный номер образца, ИГ РАН	Глубина, см	Радиоуглеродный возраст, <sup>14</sup> C лет назад (1σ)	Интервал калиброванного возраста 2σ, кал. л. н. (вероятность калибровки)
8355	55	275±20	157–163 (0,015) 288–322 (0,556) 376–427 (0,430)
8356	100	995±20	799–812 (0,050) 821–868 (0,292) 902–936 (0,565) 944–955 (0,093)
8357	236	2900±25	2957–3080 (0,845) 3091–3150 (0,155)

Анализ содержания углерода и азота проведен в ЦКП «Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» Института географии РАН на анализаторе Vario Isotope Cube с модулем IRMS IsoPrime100 (Elementar Analysensysteme GmbH, Germany) методом сухого сжигания. Навеску торфа массой 1 г высушивали при температуре 105°C и измельчали в пудру с помощью вибрационной мельницы. Для измерений на анализаторе измельченный образец взвешивался на высокоточных ультрамикровесах XPR2U (Mettler Toledo, Швейцария) и упаковывался в

индивидуальную капсулу из оловянной фольги. Масса навески для исследуемых образцов варьировала от 2,1 до 3,0 мг. Капсула с образцом помещалась в карусель CHNS анализатора. Сжигание образца происходило в кварцевом реакторе в токе кислорода при температуре около 920°C. Далее газообразные продукты разложения поступали в токе газа-носителя (гелия) в реактор восстановления, где происходила реакция восстановления оксидов азота в элементный азот. Для разделения продуктов сжигания в данном типе анализатора используется метод температурно программируе-

мой десорбции (TPD), при котором очередное повышение температуры на адсорбционной колонке происходит только при завершении детектирования предыдущего пика. Такой метод обеспечивает полное разделение пиков, даже при большой разнице концентраций исследуемых элементов. Далее с потоком газа-носителя разделенные газы (азот и углерод) попадали на детектор теплопроводности (Thermal conductivity detector – TCD). Работа TCD детектора основана на процессе передачи тепла от нагретого чувствительного элемента к более холодному корпусу детектора за счет теплопроводности газового потока. С изменением состава газового потока меняется его теплопроводность, это через ряд последовательных процессов меняет электрическое сопротивление чувствительного элемента. В TCD возникает сигнал в виде разности потенциалов (напряжения), величина которого пропорциональна концентрации определяемого вещества в газе-носителе [Зауэр, 2018].

Для калибровки анализатора использовались высокочистые стандартные образцы производства Elemental Microanalysis (Великобритания) – ацетанилид (массовая доля углерода, азота – 71,09, 10,36%) и сульфаниламид (массовая доля углерода, азота – 41,85, 16,27%). Стандартные образцы как слепые измерялись каждым 10-м образцом в серии,

чтобы следить за стабильностью работы прибора. Прибор рассчитывает значения содержания углерода (C) и азота (N) в % от массы.

Скорость накопления углерода, г C/м<sup>2</sup> в год (CAR, carbon accumulation rate) рассчитана по формуле [Chambers et al., 2010]:

$$CAR = \text{УПСМТ} \cdot C \cdot \text{ПТ} \cdot 100,$$

где УПСМТ – удельная плотность сухой массы торфа, рассчитанная, как произведение объемной плотности торфа и потерь при прокаливании, г/см<sup>3</sup>; C – содержание углерода, %; ПТ – прирост торфа, год/см. Удельную плотность сухой массы торфа вычисляли как произведение объемной массы торфа на потери при прокаливании [Chambers et al., 2010]. Прирост торфа рассчитан на основании модели роста отложений.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно радиоуглеродному датированию (см. табл.), накопление торфа в болоте Столбовое началось около 3000 кал. л. н. (календарных лет назад). В период с 3000 до 1000 кал. л. н. скорость вертикального прироста торфа составляла 0,65 мм/год (рис. 1), в 1000–450 кал. л. н. она возросла до 0,87 мм/год и затем в течение последних 450 лет еще увеличилась до 1,5 мм/год.

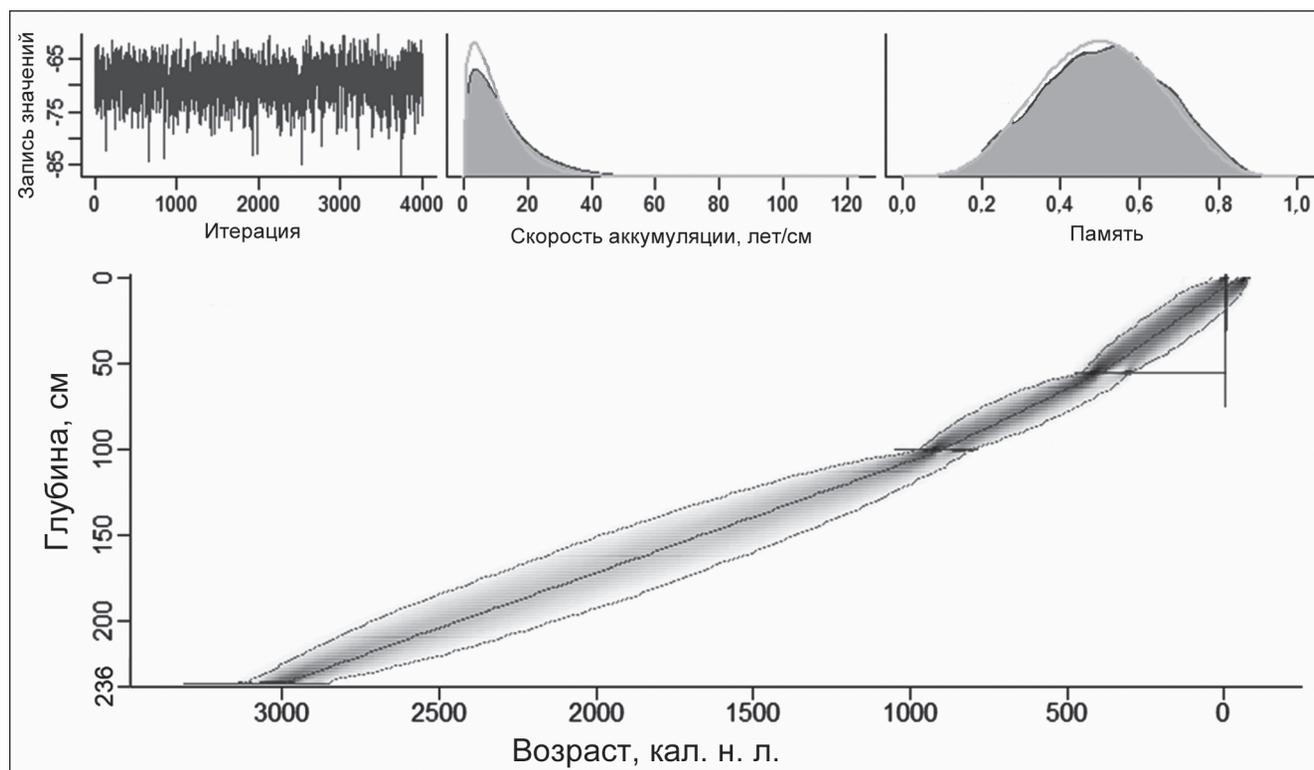


Рис. 1. Модель вертикального прироста торфа в болоте Столбовое, построенная по радиоуглеродным датировкам (см. табл.)

Fig. 1. Model of vertical peat growth in the Stolbovoye peatland, based on radiocarbon dates (see Table)

В торфяной залежи болота Столбовое представлены низинные (осоковый, древесно-осоковый, травяной) и переходные виды торфа (сфагновый, травяно-сфагновый, осоково-сфагновый, пушицевый) (рис. 2). Болото находится на мезотрофной стадии развития. Потери при прокаливании колеблются в диапазоне от 90 до 98% за исключением интервала 29–37 см, где привнос минеральных частиц существенно увеличился, ППП сократились до 75–80%. Степень гумификации торфа, измеренная нами как величина оптической плотности, значительно изменяется по глубине торфяной залежи от 0,1 до 0,6, однако прослеживается отчетливый тренд к уменьшению гумификации торфа вверх по разрезу, начиная с глубины 140 см. Удельная плотность сухой массы торфа колеблется от 0,04 до 0,15 г/см<sup>3</sup>, возрастающая в верхней части торфяной залежи, где больше потепление минеральных частиц.

Содержание органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ ) в исследованном болоте изменяется в диапазоне от 37,2 до 53,4% (рис. 3). В среднем, содержание  $C_{\text{орг}}$  составляет 49,7% (CV = 9%). Содержание азота в торфе претерпевает существенно более выраженные колебания по глубине по сравнению с  $C_{\text{орг}}$  – от 1,1 до 2,6% (среднее значение – 1,9% (CV = 23%)). Повышенные значения концентрации азота наблюдаются в нижних слоях торфа (236–100 см) –  $2,1 \pm 0,4\%$  и характеризуются средней по силе корреляцией с содержанием  $C_{\text{орг}}$  ( $r = 0,68, p < 0,05$ ). В вышележащем горизонте (98–62 см) концентрация азота снижается до 1,5%, но сохраняет положительную связь с  $C_{\text{орг}}$  ( $r = 0,59, p < 0,05$ ). В горизонтах 60–38 и 36–0 см содержание азота возрастает от 1,6 до 1,8%, однако, связь с содержанием  $C_{\text{орг}}$  недостоверна – изменяется от положительной ( $r = 0,22, p > 0,05$ ) до отрицательной ( $r = -0,21, p > 0,05$ ).

Суммарный запас углерода в болоте Столбовое составил около 6,7 кг/м<sup>2</sup>. Однако аккумуляция углерода в торфяной залежи не была равномерной во времени, четко выделяются несколько этапов по изменению интенсивности этого процесса. Так, скорости накопления углерода варьировали от 4,7 г С/м<sup>2</sup> в год на нижней границе торфяной залежи до 158,4 г С/м<sup>2</sup> в год на глубине 54 см, при среднем значении 68,9 г С/м<sup>2</sup> в год.

Для удобства интерпретации мы разделили торфяную залежь на 10 зон, соответствующих этапам развития болота и различающихся по ботаническому составу торфа, содержанию углерода и азота, интенсивности аккумуляции углерода (см. рис. 2 и 3).

Заболачивание карстовой воронки началось со стадии переувлажненного осокового березняка (зона 1, 240–200 см, 3000–2500 кал. л. н.), которое постепенно перешло в березовое осоково-травя-

ное болото. На это указывает большое количество остатков древесины лиственных пород деревьев, в том числе фрагменты ствола березы, остатки древесины ивы и обилие остатков осок (*Carex acuta*, *C. cespitosa*, *C. omskiana*, *C. sp.* – 20–40%), вахты (*Menyanthes trifoliata*, до 30%) и камыша (*Scirpus* – 10–35%). Относительно кратковременный этап развития сфагновых мхов маркируется слоем, сформированным преимущественно из остатков *Sphagnum* sect. *Sphagnum* и стеблей сфагнума (зона 2, 200–185 см, 2500–2200 кал. л. н.). Выше залегает слой торфа (зона 3, 185–155 см, 2200–1755 кал. л. н.), образованный остатками осок (*C. lasiocarpa*, *C. rostrata*, 20–30%), *Eriophorum* sp. (20–40%), *Scheuchzeria palustris* (15–20%), с небольшим участием трав (*Menyanthes trifoliata*, *Phragmites australis*, *Scirpus* sp.).

Содержание  $C_{\text{орг}}$  резко возрастает в основании торфяной залежи с 7 до 52,3% и в интервале глубин 236–155 см в низинных осоково-травяных, древесно-осоковых, осоково-пушицевых и пушицево-сфагновом торфах содержание углерода не испытывает значительных колебаний и составляет 49,9–53,3%. Для этих слоев торфа характерно высокое содержание азота 2,0–2,6% и узкие соотношения С : N (20:1–25:1), которые показывают, что болото находилось в низинной стадии развития в условиях богатого минерального питания. Скорость аккумуляции углерода возрастает в нижних 20 см торфяной залежи с 4,7 до 70 г С/м<sup>2</sup> в год и в интервале глубин 218–115 см скорость накопления углерода варьирует в пределах 32,0 и 79,1 г С/м<sup>2</sup> в год при средних значениях 57,3 г С/м<sup>2</sup> в год. Изменения условий торфонакопления зафиксированы в период формирования слоя сфагнового торфа, сформированного остатками *S. sect. Sphagnum* (зона 2, 200–185 см), где содержание азота падает до 1,0–1,5%, а С : N возрастает до 35:1–40:1. В этом слое выявлена пониженная скорость аккумуляции углерода 32–50 г С/м<sup>2</sup> в год.

В течение следующей стадии развития болота происходит его зарастание сосновым древостоем (зона 4, 155–115 см, 1755–1130 кал. л. н.). В составе растительных остатков доля сосны и древесины хвойных достигает 8%, преобладает *Sphagnum* sect. *Sphagnum* (40–60%), присутствуют остатки осок, шейхцерии, сабельника и пушицы (3–5%). Содержание углерода в этом слое оставляет 50,1–53,4%. Относительно высокие значения содержания азота (1,6–2,6%) обуславливают низкие соотношения С : N – 20:1–25:1, что указывает на сохранение достаточной обеспеченности элементами минерального питания в карстовой воронке. Скорость накопления углерода выявлена в пределах 46,8 и 68,3 г С/м<sup>2</sup> в год.

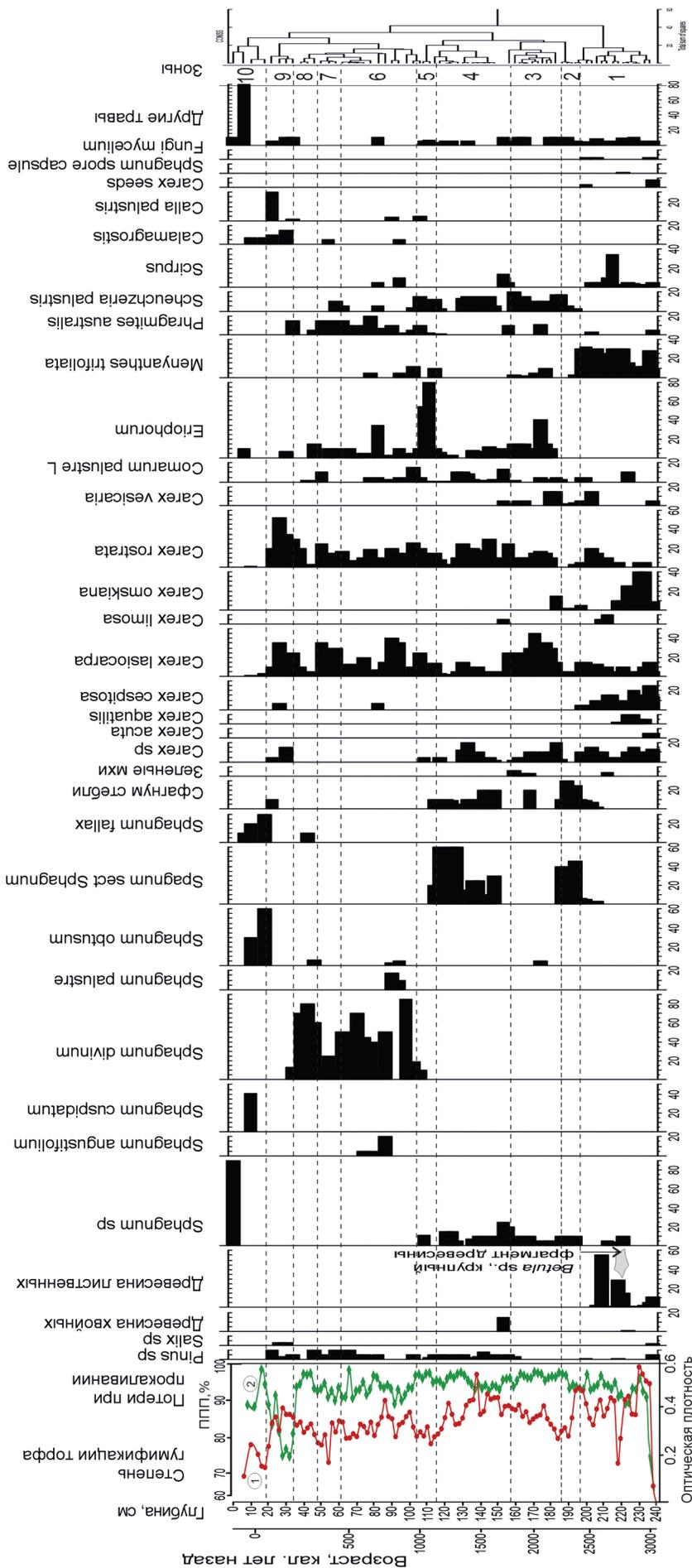


Рис. 2. Ботанический состав торфа, степень гумификации торфа (1) и потери при прокаливании (2) торфяной залежи болота Столбовое

Fig. 2. Botanical composition of peat, degree of peat humification (1) and loss on ignition (2) of peat deposits from the Stolbovoye peatland

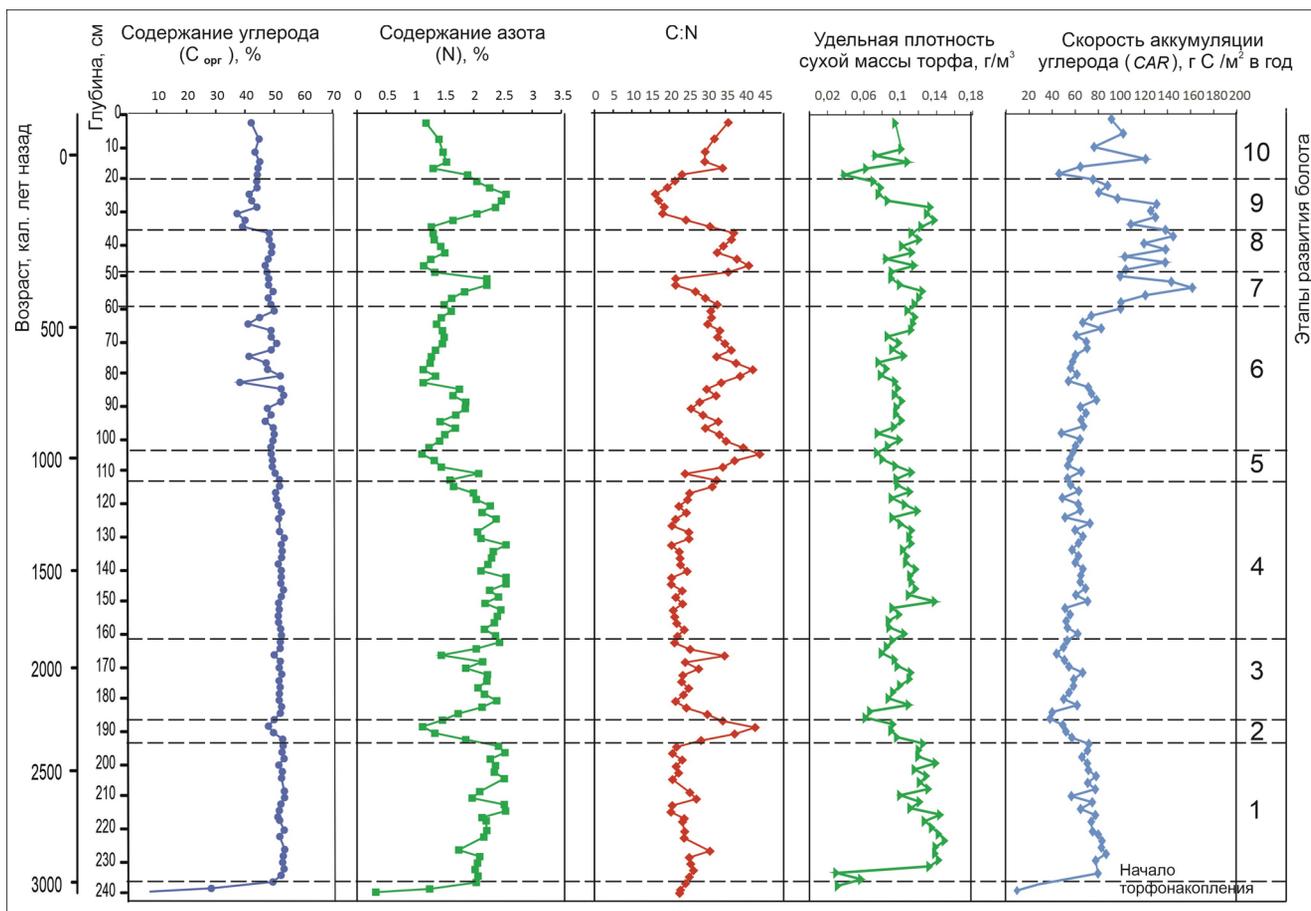


Рис. 3. Результаты анализа элементного состава, удельная плотность сухой массы торфа и скорость аккумуляции углерода в торфяной залежи болота Столбовое

Fig. 3. Macroelement composition, dry bulk density and carbon accumulation rate in the peat core from the Stolbovye peatland

Тонкий прослой (10 см) пушицевого торфа (зона 5, 115–105 см, 1130–1110 кал. л. н.), для которого характерны увеличение степени гумификации и содержания органического вещества, указывает на резкие и кратковременные изменения условий в болоте. Среди растений-торфообразователей преобладают остатки *Eriophorum* sp. (70–80%), при участии *Scheuchzeria palustris* (10–15%) и прочих трав. Для основания этого горизонта характерен пик содержания азота до 2,08% при последующем его резком сокращении до 1,1%. Возможно формирование этого прослоя связано с восстановлением болотной экосистемы после пожара.

Выше залегает торф (зона 6, 105–60 см, 1110–480 кал. л. н.), образованный остатками *Sphagnum divinum* (до 80%), *C. lasiocarpa*, *C. rostrata* (15–20%), с участием *Phragmites australis* (5–7%), *Eriophorum* sp., *Scheuchzeria palustris*, *Comarum palustre* и остатков древесины сосны, который соответствует переходному сфагновому болоту с редким древостоем. Для этого слоя торфа характерны резкие колебания концентрации  $C_{org}$  от 38,2 до

52,3%. Понижение содержания азота до 1,0–1,6% и рост соотношения C : N до 30:1–40:1 указывает на переход болота к мезотрофной стадии развития. Скорость аккумуляции углерода варьирует от 44,8 до 79,8, при среднем значении 60,3 г C/m<sup>2</sup> в год, что в целом близко к предыдущей стадии развития болота.

Сокращение участия сфагновых мхов в растительном сообществе болота, формирующем торф на глубине 60–50 см (зона 7, 480–390 кал. л. н.), при росте доли осок (*C. lasiocarpa*, *C. rostrata*, до 40%), пушицы (7–20%) и тростника (*Phragmites australis*, 15–20%) указывает, возможно, на обводнение болота и его обогащение минеральными веществами. Пик содержания азота до 1,8–2,2% и снижение соотношения C : N до 22:1–27:1 приходится на верхнюю часть этого слоя (56–50 см). Скорость аккумуляции углерода резко возрастает в этом слое с 70 до 158 г C/m<sup>2</sup> в год, достигая максимальных значений во всем разрезе.

Формирование переходного древесно-осоково-сфагнового (*S. divinum*) торфа (зона 8, 50–35 см, 390–300 кал. л. н.), близкого по составу к торфу, за-

легающему на глубине 105–60 см (зона 6), указывает на восстановление мезотрофных условий минерального питания на болоте. Следует отметить, однако, что переход к этим условиям крайне резкий: содержание азота снижается с 2,2 до 1,2–1,4%, а соотношение C : N, соответственно, возрастает до 33:1–41:1. Скорость накопления углерода снижается по сравнению с предыдущей фазой развития болота, но остается выше среднего значения для торфяной залежи и составляет от 96,5 до 142,4 г C/m<sup>2</sup> в год.

Резкое исчезновение сфагновых мхов из состава торфообразователей на глубине 35 см, увеличение доли осок (в сумме до 80%), появление остатков *Calamagrostis* sp. и *Calla palustris* и коры ивы (зона 9, 35–20 см, 300–200 кал. л. н.), значительное увеличение доли минеральной фракции (до 20%) и удельной плотности сухой массы торфа свидетельствует об увеличении эвтрофизации болота, возможно, в результате нарушений почвенно-растительного покрова на окружающей территории и поступления минеральных веществ из-за пожаров. В изученной торфяной колонке скоплений угольков не отмечено, но в других скважинах, пробуренных ближе к краю болота, на этой глубине выделены отчетливые угольные прослои. На нижней границе этого слоя в образцах торфа с максимальной зольностью (глуб. 36–30 см) концентрация C<sub>орг</sub> понижается до минимальных значений в разрезе 37,2–39,9%, выше по слою содержание углерода составляет 41,3–44,4%. Доля азота в основании слоя возрастает до 2,55–1,89% при снижении соотношения C : N 16:1–23:1. Скорость аккумуляции углерода сокращается в зависимости от снижения плотности торфа от 128,6 до 44,9 г C/m<sup>2</sup> в год.

Верхняя часть торфяной залежи (зона 10, 20–0 см, примерно 200 кал. л. н. – наст. время) представлена слабо разложенным сфагновым переходным торфом (*S. fallax*, *S. cuspidatum*, *S. obtusum*, *S.* sp.). Поскольку этот слой сложен рыхлым, слабо уплотненным торфом и живыми стеблями сфагновых мхов, расчеты возраста по модели, основанной на радиоуглеродных датировках, для этой части залежи недостоверны. Торф этого слоя отличается относительно низкими значениями C<sub>орг</sub> и N, которые составляют 42,1–44,4 и 1,2–1,5% соответственно и ростом C : N до 35:1. Скорость аккумуляции углерода приблизительно оценивается 75–100 г C/m<sup>2</sup> в год.

Анализ содержания углерода в торфяной залежи болота Столбовое показал, что в низинных торфах с преобладанием остатков сосудистых растений-торфообразователей содержание C<sub>орг</sub> составляет 50–53% и эти значения выше, чем концентрация C<sub>орг</sub> в переходных древесно-осоково-сфагновых торфах (47–49%). Наименьшие значения C<sub>орг</sub> характерны для переходных сфагновых торфов – 42–44%.

В среднем содержание C<sub>орг</sub> в болоте Столбовое составляет 49,7%. Многими исследователями принято, что в среднем, в органическом веществе торфа содержится 50% углерода [Chambers et al., 2010], и эта величина часто используется при расчетах скорости аккумуляции углерода в болотных комплексах. Также существуют оценки среднего значения C<sub>орг</sub> в торфе 51,8% [Vitt et al., 2000] и 52,6% [Bauer et al., 2006]. Изучение накопления углерода в торфяниках Западной Сибири показало, что содержание углерода практически не зависит от возраста торфа, но тесно связано с его ботаническим составом [Bogren et al., 2004; Beilman et al., 2009]. Содержание углерода в торфяниках Западной Сибири, накопившихся в течение последних 2000 лет, варьирует от 41,5 до 62,8% при среднем значении 52,0±0,3% [Beilman et al., 2009], наибольшие концентрации C<sub>орг</sub> выявлены в древесных торфах, наименьшие – в сфагновых. В Средней Сибири торф низинных болот Сым-Дубческого междуречья с преобладанием сосудистых растений-торфообразователей характеризуется достоверно более высокими значениями содержания C<sub>орг</sub> (50–57%) по сравнению с торфом, сложенным сфагновыми мхами (46–49%, [Прокушкин и др., 2017]). В целом, нами выявлены близкие закономерности распределения концентрации C<sub>орг</sub> в различных видах торфа при немного более низких абсолютных значениях концентрации C<sub>орг</sub>, что может быть связано с локальными особенностями его накопления.

Содержание азота в торфе претерпевает существенно более выраженные колебания по глубине по сравнению с C<sub>орг</sub>, что предполагает значимые изменения условий торфонакопления в исследованном болотном массиве. Так, наблюдаемые величины содержания азота варьировали от 1,1 до 2,6% (CV = 23%), отражая последовательные изменения состава растений-торфообразователей, условий минерального питания и скоростей деструкции органического вещества торфа. Полученные результаты согласуются с обобщенными данными по содержанию азота в торфах России [Ефремова и др., 2000]: торф низинного типа наиболее обогащен азотом по сравнению с переходными и верховыми. При этом следует отметить повышенный азотный фон (>1%) верхнего слоя торфа, сложенного сфагновыми мхами, по сравнению с ранее приводимыми значениями для Западной и Средней Сибири (<0,6%) [Прокушкин и др., 2017]. Данный факт, наряду с высокими значениями N в сфагновых слоях торфа, залегающих ниже по профилю, предполагает более высокую обеспеченность элементами минерального питания болота Столбовое.

С глубиной в слоях со сходным ботаническим составом наблюдается рост концентраций азота и

сужение соотношения C:N, что свидетельствует о разложении органического вещества, а именно минерализации  $C_{\text{орг}}$  до  $\text{CO}_2$  и метана при сохраняющихся количествах азота. Вместе с тем в формировании торфяной залежи выявлено несколько фаз, характеризующихся резким снижением содержания азота (на переходах между фазами 4–5, 7–8, 9–10). Помимо смены растительных группировок подобные изменения могут быть вызваны и нарушениями азотного цикла (потерями азота при относительно неизменном уровне содержания  $C_{\text{орг}}$ ), как правило, возникающих в результате пожарного воздействия. С другой стороны, ряд фаз развития болота характеризуется обогащением торфа азотом за счет внедрения в болотный фитоценоз сосудистых растений, что также свидетельствует об обеспеченности этого массива элементами минерального питания, поступающими, вероятно, с грунтовыми водами.

Полученные данные показали, что скорость аккумуляции углерода в болоте Столбовое варьирует в диапазоне от 32,0 до 158,4 г  $\text{C}/\text{м}^2$  в год, если не учитывать самые нижние образцы, приуроченные к базальному горизонту торфяной залежи, при среднем значении 68,9 г  $\text{C}/\text{м}^2$  в год. Согласно оценкам [Инишева и др., 2013], в среднем по России современная скорость аккумуляции углерода колеблется от 10,3 г  $\text{C}/\text{м}^2$  в год в полигональных болотах до 51,7 г  $\text{C}/\text{м}^2$  в год в низинных травяных болотах. Средние значения скорости накопления углерода в болотах бореальной области Канады составляет от 13 до 30 г  $\text{C}/\text{м}^2$  в год, хотя в отдельных болотных комплексах были выявлены более высокие значения интенсивности накопления углерода: от 52,8 до 114,5 г  $\text{C}/\text{м}^2$  в год при средних значениях 73,6 г  $\text{C}/\text{м}^2$  в год [Loisel, Garneau, 2010]. Обобщение большого объема данных по болотам арктической и бореальной зон Евразии и Северной Америки показали, что в течение последнего тысячелетия скорость аккумуляции углерода находилась в диапазоне от 3 and 80 г  $\text{C}/\text{м}^2$  в год [Gallego-Sala et al., 2018], а средняя скорость накопления углерода болотами за весь голоцен составляла  $22,9 \pm 2,0$  г  $\text{C}/\text{м}^2$  в год [Loisel, Garneau, 2010].

Таким образом, изученное нами болото Столбовое характеризуется высокими, гораздо выше средних значений [Loisel et al., 2014], показателями скорости аккумуляции углерода в торфяной залежи. Однако высокие значения накопления углерода в изученном нами болоте по сравнению с региональными оценками, могут быть связаны с тем, что большинство исследований проведено на севере лесной зоны в таежных и лесотундровых ландшафтах. Исследования на юге лесной зоны в ландшафтах хвойно-широколиственных и широколиственных лесов до настоящего времени единичны, хотя интенсивность прироста биомассы в этих болотах

выше, чем в более северных районах [Титлянова, Вишнякова, 2022]. Высокие значения интенсивности накопления углерода в болотном комплексе, полученные нами в болоте Столбовое, не являются уникальными. Особенно это характерно для карстовых болот с высокой скоростью вертикального прироста торфа. По данным Е.М. Волковой с соавт. [Volkova et al., 2022], в карстовых болотах, расположенных на Среднерусской возвышенности в области распространения хвойно-широколиственных и широколиственных лесов, в климатических условиях, близких к Мордовскому заповеднику, скорость аккумуляции углерода в голоцене варьировала от 12 до 219 г  $\text{C}/\text{м}^2$  в год (в болоте Клюква) и от 16 до 291 г  $\text{C}/\text{м}^2$  в год (в болоте Источек). Исследования накоплений углерода в трех болотах на территории Польши [Karpńska-Kołaczek et al., 2024], расположенных в зоне широколиственных лесов и имеющих схожую морфологию с изученным нами болотом, выявили большую вариабельность значений скоростей аккумуляции углерода в голоцене. Приведены данные по так называемым kettle-holes, болотам, имеющим площадь 1–3 га и глубину до 4 м, которые показали средние значения 79,64, 74,6 и 37,29 г  $\text{C}/\text{м}^2$  в год и максимальные значения 271,3 и 114,58 г  $\text{C}/\text{м}^2$  в год. В тот же период времени скорость аккумуляции углерода в болотных комплексах таежной зоны на юге Финляндии не превышает 25 г  $\text{C}/\text{м}^2$  в год [Chapman et al., 2013].

Анализ распределения скорости накопления углерода по глубине торфяной залежи в интервале глубин от ее основания (240 см) до 60 см (3000–480 кал. л. н.), несмотря на значительные климатические изменения (например, Римское теплое время, похолодание темных веков и Средневековый климатический оптимум), не выявил связей между депонированием углерода и колебаниями климата [Новенко, 2021]. Мы предполагаем, что существенный рост скорости аккумуляции углерода на глубине 60 см связан с высокой продуктивностью сообщества сосудистых растений даже при повышенных уровнях минерализации/гумификации их остатков. Резкий рост скоростей аккумуляции углерода в верхней части торфяной залежи описан в ряде работ [Belyea, Warner, 1996; Loisel, Garneau, 2010]. Возможно, на процессы, протекающие в болотной экосистеме, повлияло увлажнение и похолодание климата Малого ледникового периода, поскольку начало резкого роста скорости аккумуляции углерода около 480 кал. л. н. совпадает активной фазой этого похолодания.

## ВЫВОДЫ

Результаты исследования депонирования углерода в позднем голоцене в болотном комплексе на

территории Мордовского заповедника в течение последних 3000 лет выявили высокую способность быстро растущих карстовых болот хвойно-широколиственных лесов связывать атмосферный углерод.

Торфяная залежь болота Столбовое, представленная низинными и переходными видами торфа, характеризуется высокой обеспеченностью элементами минерального питания. Скорость аккумуляции углерода в болоте Столбовое варьирует в диапазоне от 32,0 до 158,4 г С/м<sup>2</sup> в год при среднем значении

68,9 г С/м<sup>2</sup> в год, что существенно выше средних значений скоростей депонирования углерода различными типами болот в голоцене.

Возможно, интенсивное накопление углерода в торфяной залежи обусловлено высокой продуктивностью сообщества сосудистых растений карстового болота. Видимой взаимосвязи между климатическими изменениями в позднем голоцене и процессом аккумуляции углерода в болотном комплексе не установлено.

**Благодарности.** Исследование выполнено при поддержке проекта РНФ № 24-27-00096.

Авторы благодарят директора Мордовского государственного природного заповедника имени П.Г. Смидовича д-ра биол. наук А.Б. Ручина и сотрудников заповедника за помощь в проведении полевых работ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баянов Н.Г. Изменения климата северо-запада Мордовии за период существования Мордовского заповедника по данным метеонаблюдений в г. Темникове // Труды Мордовского государственного природного заповедника имени П.Г. Смидовича. 2015. Вып. 14. С. 212–219.
- Волкова Е.М., Леонова О.А., Миронов В.В. Палеоэкологические условия и аккумуляция углерода в генезисе пойменного болота Среднерусской возвышенности // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2022. Т. 14. № 6. С. 70–91. DOI: 10.12731/2658-6649-2022-14-6-70-91.
- Вомперский С.Э. Роль болот в круговороте углерода. М.: Наука, 1994. 37 с.
- Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А., Веретенникова Е.Э. и др. Оценка динамики баланса углерода в болотах южнотаежной подзоны Западной Сибири (Томская область) // Почвы и окружающая среда. 2022. Т. 5. № 4. С. 1–18. DOI: 10.31251/pos.v5i4.194.
- ГОСТ 28245-09. Торф. Методы определения ботанического состава и степени разложения. М., 1990. 7 с.
- Гришуткин О.Г. Площадь и территориальное распределение болот в Мордовском государственном природном заповеднике // Труды Мордовского гос. природного заповедника им. П.Г. Смидовича. 2011. Вып. IX. С. 280–281.
- Домбровская А.В., Коренева М.М., Тюремнов С.Н. Атлас растительных остатков, встречаемых в торфе. М.: Гос. энергетическое изд-во. 1959. 228 с.
- Зауэр Е.А. Современные автоматические CHNS/O/X-анализаторы органических соединений // Аналитика и контроль. 2018. № 1. С. 6–19.
- Елина Г.А., Токарев П.Н. Закономерности аккумуляции органики и углерода в болотных экосистемах Карелии // Труды КарНЦ РАН. 2010. № 1. С. 34–51.
- Ефремова Т.Т., Ефремов С.П., Мелентьева Н.В. Азот в болотах России // Почвоведение. 2000. № 9. С. 1070–1083.
- Инишева Л.И., Кобак К.И., Турчинович И.Е. Развитие процесса заболачивания и скорость аккумуляции углерода в болотных экосистемах России // География и природные ресурсы. 2013. № 3. С. 60–68.
- Инишева Л.И., Кобак К.И., Порохина Е.В. Роль болот в углеродном цикле (на примере Северо-Западного и Сибирского округов России) // Труды Инсторфа. 2016. № 14(67). С. 3–11.
- Инишева Л.И., Сергеева М.А., Головаченко А.В. и др. Распределение диоксида углерода и метана в торфяной залежи олиготрофного лесного болота и их эмиссия в Западной Сибири // Лесоведение. 2023. № 1. С. 52–65. DOI: 10.31857/S0024114823010060.
- Кац И.Я., Кац С.В., Скобеева Е.И. Атлас растительных остатков в торфах. М.: Недра, 1977. 376 с.
- Минаева Т.Ю., Трофимов С.Я., Чичагова О.А. и др. Накопление углерода в почвах лесных и болотных экосистем южного Валдая в голоцене // Известия РАН. Серия биологическая. 2008. № 5. С. 607–615.
- Новенко Е.Ю. Динамика ландшафтов и климата в Центральной и Восточной Европе в голоцене – прогнозные оценки изменения природной среды // Геоморфология. 2021. № 52(3). С. 24–47. DOI: 10.31857/S0435428121030093.
- Новенко Е.Ю., Курприянов Д.А. Реконструкция истории лесных пожаров в южной части Мордовского заповедника в голоцене по данным анализа макроскопических частиц // Труды Мордовского гос. заповедника им. П.Г. Смидовича. 2021. Вып. 26. С. 176–192.
- Новенко Е.Ю., Мазей Н.Г., Курприянов Д.А. и др. Динамика растительности и экологических условий в центре Восточно-Европейской равнины в голоцене // Экология. 2018. № 3. С. 184–193. DOI: 10.7868/S0367059718030034.
- Прокушкин А.С., Карпенко Л.В., Токарева И.В. и др. Углерод и азот в болотах северной части Сым-Дубческого междуречья // География и природные ресурсы. 2017. № 2. С. 114–123. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-2(114-123).
- Титлянова А.А., Вишнякова Е.К. Изменение продуктивности болотных и травяных экосистем по широтному градиенту // Почвы и окружающая среда. 2022. № 2. С. 119. DOI: 10.31251/pos.v5i2.176.
- Углерод в экосистемах лесов и болот России / под ред. В.А. Алексеева, Р.А. Бердси. Красноярск: Ин-т леса СО РАН, 1994. 224 с.
- Ямашкин А.А. Физико-географические условия и ландшафты Мордовии. Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 1998. 156 с.
- Amesbury M.J., Gallego-Sala A., Loisel J. Peatlands as prolific carbon sinks, *Nature Geoscience*, 2019, vol. 12, p. 880–881, DOI: 10.1038/s41561-019-0455-y.

- Bauer I.E., Hurdle P.A., Bhatti J. et al. Carbon stock trends along forested peatland margins in central Saskatchewan, *Canadian Journal of Soil Science (Special Issue)*, 2006, vol. 86, p. 32–333, DOI: 10.4141/S05-085.
- Beilman D.W., MacDonald G.M., Smith L.C. et al. Carbon accumulation in peatlands of West Siberia over the last 2000 years, *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, vol. 23(1), p. 1–12, DOI: 10.1029/2007GB003112.
- Bellen S., Garneau M., Ali A. et al. Did fires drive Holocene carbon sequestration in boreal ombrotrophic peatlands of eastern Canada? *Quaternary Research*, 2012, vol. 78, p. 50–59, DOI: 10.1016/j.yqres.2012.03.009.
- Belyea L., Warner B. Temporal scale and the accumulation of peat in a Sphagnum bog, *Canadian Journal of Botany*, 1996, vol. 74(3), p. 366–377.
- Blaauw M., Christen J.A. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process, *Bayesian Analysis*, 2011, vol. 6, p. 457–474, DOI: 10.1214/ba/1339616472.
- Borren W., Bleuten W., Lapshina E.D. Holocene peat and carbon accumulation rates in the southern taiga of Western Siberia, *Quaternary Research*, 2004, no. 61, p. 42–51, DOI: 10.1016/j.yqres.2003.09.002.
- Chambers F.M., Beilman D.W., Yu Z. Methods for determining peat humification and for quantifying peat bulk density, organic matter and carbon content for palaeostudies of climate and peatland carbon dynamics, *Mires and Peat*, 2010, vol. 7, p. 1–10.
- Charman D.J., Beilman D.W., Booth R.K. et al. Climate-related changes in peatland carbon accumulation during the last millennium, *Biogeosciences*, 2013, vol. 10, p. 929–944, DOI: 10.5194/bg-10-929-2013.
- Gallego-Sala A., Charman D.J., Brewer S. et al. Latitudinal limits to the predicted increase of the peatland carbon sink with warming, *Nature Climate*, 2018, vol. 8, p. 907–913, DOI: 10.1038/s41558-018-0271-1.
- Karpińska-Kolaczek M., Kolaczek P., Marcisz K. et al. Kettle-hole peatlands as carbon hot spots: Unveiling controls of carbon accumulation rates during the last two millennia, *CATENA*, 2024, vol. 237, 107764, DOI: 10.1016/j.catena.2023.107764.
- Kobak K.I., Kondrasheva N.Yu., Turchinovich I.E. Changes in carbon pools of peatland and forests in northwestern Russia during the Holocene, *Global and Planetary Change*, 1998, vol. 16–17, p. 75–84.
- Loisel J., Garneau M. Late Holocene paleoecohydrology and carbon accumulation estimates from two boreal peat bogs in eastern Canada: Potential and limits of multi-proxy archives, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, vol. 291, p. 493–533, DOI: 10.1016/j.palaeo.2010.03.020.
- Loisel J., Yu Z., Beilman D.W., Camill P. et al. A database and synthesis of northern peatland soil properties and Holocene carbon and nitrogen accumulation, *The Holocene*, 2014, vol. 24(9), p. 1028–1042, DOI: 10.1177/0959683614538073.
- Reimer P.J., Baillie M.G.L., Bard E. et al. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration Curve (0–55 cal kBP), *Radiocarbon*, 2020, vol. 62(4), p. 1–62, DOI: 10.1017/RDC.2020.41.
- Vitt D.H., Halsey L.A., Bauer I.E. et al. Spatial and temporal trends in carbon storage of peatlands of continental western Canada through the Holocene, *Canadian Journal of Earth Science*, 2000, vol. 37, p. 683–693.
- Volkova E.M., Leonova O.A., Boikova O.I. et al. Carbon accumulation dynamics of the Klukva peatland at the southern boundary of broad-leaved forest zone in European Russia, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 1093, 012006, DOI: 10.1088/1755-1315/1093/1/012006.
- Yu Z. Peatlands and Their Role in the Global Carbon Cycle, *Eos*, 2011, vol. 92(12), p. 97–98.

Электронный ресурс

Указ Президента Российской Федерации от 08.02.2021 № 76 «О мерах по реализации государственной научно-технической политики в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202102080007#:~:text=Указ%20Президента%20Российской%20Федерации%20от%2008.02.2021%20№%2076,Российской%20Федерации%20и%20климатических%20изменений%22%20Номер%20опубликования%3A%200001202102080007> (дата обращения 10.03.2024).

Поступила в редакцию 22.03.2024

После доработки 15.04.2024

Принята к публикации 24.04.2024

# CARBON SEQUESTRATION IN A KARST MIRE OF THE MORDOVIAN RESERVE DURING THE LATE HOLOCENE

K.N. Dyakonov<sup>1</sup>, N.G. Mazei<sup>2</sup>, A.S. Prokushkin<sup>3</sup>, A.E. Shatunov<sup>4</sup>,  
E.P. Zazovskaya<sup>5</sup>, E.Yu. Novenko<sup>6</sup>

<sup>1,2</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Science

<sup>3</sup> V.N. Sukachev Institute of Forest, SB RAS, Laboratory of biogeochemical cycles in forest ecosystems

<sup>4,6</sup> Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Laboratory of evolutionary geography

<sup>5</sup> Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Laboratory of radiocarbon dating and electronic microscopy

<sup>1</sup> Head of the Department, Corresponding Member of the RAS, D.Sc. in Geography; e-mail: diakonov.geofak@mail.ru

<sup>2</sup> Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: natashamazei@mail.ru

<sup>3</sup> Head of the Laboratory, Ph.D. in Biology; e-mail: prokushkin@ksc.krasn.ru

<sup>4</sup> Postgraduate student; e-mail: toxavilli@yandex.ru

<sup>5</sup> Head of the Laboratory, Ph.D. in Geography; e-mail: zaszovsk@gmail.com

<sup>6</sup> Chief Scientific Researcher, Professor of the RAS, D.Sc. in Geography; e-mail: lenanov@mail.ru

The article presents the results of the study of carbon accumulation over the past 3000 years in the Stolbovoye karst mire located within the Smidovich Mordovian State Nature Reserve on the southern border of the coniferous-deciduous forests of the East European Plain. Minerotrophic (sedge, wood-sedge, grass) and mesotrophic (*Sphagnum*, grass-*Sphagnum*, sedge-*Sphagnum*, cotton grass) types of peat are present in the peat deposits of the Stolbovoye mire. The mire is at the mesotrophic stage of development. The content of organic carbon varies from 37,2 to 53,4% (49,7% on average). The nitrogen content in peat shows significantly higher variations along the core compared to organic carbon, i. e. from 1,1 to 2,6% (the average value is 1,9%). The total carbon pool in the Stolbovoye mire is about 6,7 kg/m<sup>2</sup>.

The data obtained showed that a fast-growing peatland is capable to sequester large amounts of atmospheric carbon. The carbon accumulation rate in the studied peatland varies from 32,0 to 158,4 g C/m<sup>2</sup>/yr, with an average of 68,9 g C/m<sup>2</sup>/yr, which is significantly higher than the average carbon accumulation rates in different types of peatlands during the Holocene. A relationship between carbon accumulation rate and climatic changes over the past 3000 years was not revealed. A significant increase in the rate of carbon accumulation at a depth of 60 cm (480 cal. years BP) could be associated with the high productivity of vascular plants even at higher levels of mineralization/humification of their residues.

**Keywords:** carbon accumulation rate, elemental composition of peat, nitrogen, plant macrofossils in peat, peat humification

**Acknowledgments.** The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project 24-27-00096). The authors are grateful to A.B. Ruchin, D.Sc. in Biology, Director of the P.G. Smidovich Mordovian State Nature Reserve, and the staff of the reserve for their assistance in field studies.

## REFERENCES

- Amesbury M.J., Gallego-Sala A., Loisel J. Peatlands as prolific carbon sinks, *Nature Geoscience*, 2019, vol. 12, p. 880–881, DOI: 10.1038/s41561-019-0455-y.
- Bajanov N.G. Izmeneniya klimata severo-zapada Mordovii za period suschestvovaniya Mordovskogo zapovednika po dannym meteorologicheskikh nablyudeniy v g. Temnikove [Climate changes in the northwest of Mordovia during the existence of the Mordovia State Nature Reserve according to meteorological observations in the Temnikov town], *Trudy Mordovskogo gos. prirodnogo zapovednika im. P.G. Smidovicha*, 2015, no. 14, p. 212–219. (In Russian)
- Bauer I.E., Hurdle P.A., Bhatti J., Errington R. Carbon stock trends along forested peatland margins in central Saskatchewan, *Canadian Journal of Soil Science (Special Issue)*, 2006, vol. 86, p. 32–333, DOI: 10.4141/S05-085.
- Beilman D.W., MacDonald G.M., Smith L.C., Reimer P.C. Carbon accumulation in peatlands of West Siberia over the last 2000 years, *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, vol. 23(1), p. 1–12, DOI: 10.1029/2007GB003112.
- Bellen S., Garneau M., Ali A., Bergeron Y. Did fires drive Holocene carbon sequestration in boreal ombrotrophic peatlands of eastern Canada? *Quaternary Research*, 2012, vol. 78, p. 50–59, DOI: 10.1016/j.yqres.2012.03.009.
- Belyea L., Warner B. Temporal scale and the accumulation of peat in a *Sphagnum* bog, *Canadian Journal of Botany*, 1996, vol. 74(3), p. 366–377.
- Blaauw M., Christen J.A. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process, *Bayesian Analysis*, 2011, vol. 6, p. 457–474, DOI: 10.1214/ba/1339616472.
- Borren W., Bleuten W., Lapshina E.D. Holocene peat and carbon accumulation rates in the southern taiga of Western Siberia, *Quaternary Research*, 2004, vol. 61, p. 42–51, DOI: 10.1016/j.yqres.2003.09.002.
- Chambers F.M., Beilman D.W., Yu Z. Methods for determining peat humification and for quantifying peat bulk density, organic matter and carbon content for palaeostudies of climate and peatland carbon dynamics, *Mires and Peat*, 2010, vol. 7, p. 1–10.

- Charman D.J., Beilman D.W., Booth R.K., Blaauw M. Climate-related changes in peatland carbon accumulation during the last millennium, *Biogeosciences*, 2013, vol. 10, p. 929–944, DOI: 10.5194/bg-10-929-2013.
- Dombrovskaja A.V., Koreneva M.M., Tjuremnov S.N. *Atlas rastitel'nyh ostatkov, vstrechaemyh v torfe* [Atlas of plant residues present in peat], Moscow, Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatel'stvo, 1959, 228 p. (In Russian)
- Efremova T.T., Efremov S.P., Melent'eva N.V. Nitrogen in Russian Bogs, *Eurasian Soil Science*, 2000, vol. 9, p. 934–946.
- Elina G.A., Tokarev P.N. Zakonomernosti akumuljatsii organiki i ugleroda v bolotnyh ekosistemah Karelii [Regularities of peat and organic matter accumulation in mire ecosystems of Karelia], *Trudy KarNC RAN*, 2010, no. 1, p. 34–51. (In Russian)
- Gallego-Sala A., Charman D.J., Brewer S. et al. Latitudinal limits to the predicted increase of the peatland carbon sink with warming, *Nature Climate*, 2018, vol. 8, p. 907–913, DOI: 10.1038/s41558-018-0271-1.
- Golovackaja E.A., Djukarev E.A., Veretennikova E.Je. et al. Ocenka dinamiki balansa ugleroda v bolotah juzhno-taeznoj podzony Zapadnoj Sibiri (Tomskaja oblast') [Evaluation of the dynamics of the carbon balance for peatlands of the southern taiga subzone of West Siberia (Tomsk region)], *Pochvy i okruzhajushhaja sreda*, 2022, no. 4, p. 1–18, URL: <https://doi.org/10.31251/pos.v5i4.194>. (In Russian)
- GOST 28245-09, *Torf. Metody opredelenija botanicheskogo sostava i stepeni razlozhenija* [Peat. Test methods for botanical composition of peat and degree of peat humification], Moscow, 1990, 7 p. (In Russian)
- Grishutkin O.G. Ploshhad' i territorial'noe raspredelenie bolot v Mordovskom gosudarstvennom prirodnom zapovednike [Area and spatial distribution of mires in the Mordovia State Nature Reserve], *Trudy Mordovskogo gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika im. P.G. Smidovicha*, 2011, no. IX, p. 280–281. (In Russian)
- Inisheva L.I., Kobak K.I., Turchinovich I.E. Evolution of the paludification process and carbon accumulation rate in bog ecosystems of Russia, *Geography and Natural Resources*, 2013, no. 3, p. 246–253.
- Inisheva L.I., Kobak K.I., Porohina E.V. Rol' bolot v uglerodnom cikle (na primere Severo-Zapadnogo i Sibirskogo okrugov Rossii) [The role of mires in carbon cycle (on example of North-West and Siberian regions of Russia)], *Trudy Instorfa*, 2016, no. 14(67), p. 3–11. (In Russian)
- Inisheva L.I., Sergeeva M.A., Golovchenko A.V., Babikov B.V. Raspredelenie dioksida ugleroda i metana v torfjanoy zalezhi oligotrofnogo lesnogo bolota i ih emissija v Zapadnoj Sibiri [Carbon dioxide and methane distribution in peat deposits of an oligotrophic forest swamp in Western Siberia and their emissions], *Lesovedenie*, 2023, no. 1, p. 52–65, DOI: 10.31857/S0024114823010060. (In Russian)
- Kac I.Ja., Kac S.V., Skobeeva E.I. *Atlas rastitel'nyh ostatkov v torfah* [Atlas of plant residues in peat deposits], Moscow, Nedra Publ., 1977, 376 p. (In Russian)
- Karpińska-Kolaczek M., Kolaczek P., Marcisz K. et al. Kettle-hole peatlands as carbon hot spots: Unveiling controls of carbon accumulation rates during the last two millennia, *CATENA*, 2024, vol. 237, 107764, DOI: 10.1016/j.catena.2023.107764.
- Kobak K.I., Kondrasheva N.Yu., Turchinovich I.E. Changes in carbon pools of peatland and forests in northwestern Russia during the Holocene, *Global and Planetary Change*, 1998, vol. 16–17, p. 75–84.
- Kuprijanov D.A., Novenko E.Ju. Rekonstrukcija istorii lesnyh pozharov v juzhnoj chasti Mordovskogo zapovednika v golocene po dannym analiza makroskopicheskich chastic [Reconstruction of the Holocene Forest fires history in the southern part of the Mordovian State Natural Reserve based on the macrocharcoal analysis of the peat], *Trudy Mordovskogo gos. zapovednika im. P.G. Smidovicha*, 2021, no. 26, p. 176–192. (In Russian)
- Loisel J., Garneau M. Late Holocene paleoecohydrology and carbon accumulation estimates from two boreal peat bogs in eastern Canada: Potential and limits of multi-proxy archives, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, vol. 291, p. 493–533, DOI: 10.1016/j.palaeo.2010.03.020.
- Loisel J., Yu Z., Beilman D.W. et al. database and synthesis of northern peatland soil properties and Holocene carbon and nitrogen accumulation, *The Holocene*, 2014, vol. 24(9), p. 1028–1042, DOI: 10.1177/0959683614538073.
- Minaeva T.Ju., Trofimov S.Ja., Chichagova O.A. et al. Carbon accumulation in soils of forest and bog ecosystems of Southern Valdai in the Holocene, *Biology Bulletin*, 2008, no. 5, p. 524–532.
- Novenko E.Ju. Dinamika landshaftov i klimata v Central'noj i Vostochnoj Evrope v golocene – prognoznye ocenki izmenenija prirodnoj sredy [Landscape and climate dynamics in Central and Eastern Europe during the Holocene – assessment of future environmental changes], *Geomorfologija*, 2021, no. 52(3), p. 24–47, DOI: 10.31857/S0435428121030093. (In Russian)
- Novenko E.Y., Mazei N.G., Kupriyanov D.A. et al. Holocene dynamics of vegetation and ecological conditions in the center of the East European Plain, *Russian Journal of Ecology*, 2018, no. 3, p. 218–225.
- Prokushkin A.S., Karpenko L.V., Tokareva I.V. et al. Uglerod i azot v bolotah severnoj chasti Sym-Dubcheskogo mezhdurech'ja [Carbon and nitrogen in the bogs of the northern part of the Sym-Dubches interfluves], *Geografija i prirodnye resursy*, 2017, no. 2, p. 114–123, DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-2(114-123). (In Russian)
- Timoshenko E.S. Soderzhanie obshhego ugleroda i azota v perehodnyh i nizinyh torfah Brjanskoj oblasti [Content of the total carbon and nitrogen in transitional and lowland peat in Bryansk region], *Agrohimicheskij vestnik*, 2013, no. 2, p. 21–22. (In Russian)
- Titljanova A.A., Vishnjakova E.K. Izmenenie produktivnosti bolotnyh i travjanyh jekosistem po shirotnomu gradient [Productivity changes of wetland and grassland ecosystems along a latitudinal gradient], *Pochvy i okruzhajushhaja sreda*, 2022, no. 2, p. 1–19, DOI: 10.31251/pos.v5i2.176. (In Russian)
- Uglerod v ekosistemah lesov i bolot Rossii [Carbon in forest and bog ecosystems of Russia], V.A. Alekseev, R.A. Berdsi (eds.), Krasnojarsk, In-t lesa SO RAN Publ., 1994, 224 p. (In Russian)
- Vitt D.H., Halsey L.A., Bauer I.E., Campbell C. Spatial and temporal trends in carbon storage of peatlands of continental western Canada through the Holocene, *Canadian Journal of Earth Science*, 2000, vol. 37, p. 683–693.

- Volkova E.M., Leonova O.A., Boikova O.I. et al. Carbon accumulation dynamics of the Klukva peatland at the southern boundary of broad-leaved forest zone in European Russia, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 1093, 012006, DOI: 10.1088/1755-1315/1093/1/012006.
- Volkova E.M., Leonova O.A., Mironov V.V. Paleoekologicheskie uslovija i akumuljacija ugljeroda v genezise pojmenogo bolota Srednerusskoj vozvyshehnosti [Paleoecological conditions and carbon accumulation in genesis of inundated mire of Mid-Russian Upland], *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 2022, no. 14(6), p. 70–91, DOI: 10.12731/2658-6649-2022-14-6-70-91. (In Russian)
- Vomperskij S.Je. *Rol' bolot v krugovorote ugljeroda* [Role of bogs in the carbon cycle], Moscow, Nauka Publ., 1994, 37 p. (In Russian)
- Yamashkin A.A. *Fiziko-geograficheskie uslovija i landshafty Mordovii* [Physical-geographical conditions and landscapes of Mordovia], Saransk, Izd-vo Mordovskogo unta, 1998, 156 p.
- Yu Z. Peatlands and Their Role in the Global Carbon Cycle, *Eos*, 2011, vol. 92(12), p. 97–98.
- Zauer E.A. Sovremennye avtomaticheskie CNS/O/X-analizatory organicheskikh soedinenij [Modern automatic CNS/O/X organic compound analyzers], *Analitika i kontrol*, 2018, no. 1, p. 6–19. (In Russian)
- Web source*  
Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 08.02.2021 no. 76 “O merah po realizacii gosudarstvennoj nauchno-tehnicheskoy politiki v oblasti jekologicheskogo razvitija Rossijskoj Federacii i klimaticeskikh izmenenij”, URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202102080007#:~:text=Ukaz%20Prezidenta%20Rossijskoj%20Federacii%20ot%2008.02.2021%20№%2076,Rossijskoj%20Federacii%20i%20klimaticeskikh%20izmenenij%22%20Nomer%20opublikovaniya%3A%200001202102080007> (access date 10.03.2024). (In Russian)

Received 22.03.2024

Revised 15.04.2024

Accepted 24.04.2024

## МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.46

### ОСОБЕННОСТИ ПРИЛИВНОГО ВОДООБМЕНА В КУРИЛЬСКИХ ПРОЛИВАХ ПО ДАННЫМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В.И. Ильин<sup>1</sup>, В.С. Архипкин<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
географический факультет, кафедра океанологии

<sup>1</sup> Студент; e-mail: vsevolod\_ilin@mail.ru

<sup>2</sup> Доц., канд. геогр. наук; e-mail: victor.arkhipkin@gmail.com

Исследованы особенности приливных колебаний уровня моря и приливных течений в проливах Курильских островов с помощью численного моделирования. Для сравнения параметров тропических и экваториальных приливов были выбраны два временных промежутка: 02.06.1977–03.06.1977 и 11.10.1977–12.10.1977. Проведена верификация результатов моделирования с натурными данными. Получено, что проливы северо-восточной части Курильской гряды имеют смешанный тип приливов с преобладанием суточного хода, а в юго-западной части начинает преобладать полусуточный ход. Наибольшие величины приливов (до 2,5–3 м) в исследуемый период наблюдались 02.06.1977 у п-ва Камчатка и у о. Хоккайдо, а также у крупных островов Курильской гряды. Было выделено четыре основных периода колебаний уровня 12, 12,4, 24 и 25,8 часов, что соответствует гармоникам S<sub>2</sub>, M<sub>2</sub>, K<sub>1</sub>, O<sub>1</sub>. Анализ полученных данных показал, что максимальные скорости осредненных по глубине течений достигают 4,5 м/с. Наибольшие скорости были зафиксированы в проливах Крузенштерна, Фриза и Среднего. Оценки приливного потока показали, что в проливах с меньшими средними глубинами во время тропического прилива более ярко выражены полусуточные колебания. В более глубоких проливах полусуточные колебания при тропических приливах проявляются очень слабо или вообще отсутствуют, примером является пролив Буссоль. Рассчитано, что при использовании двумерной модели максимальные значения приливного потока наблюдаются в проливе Буссоль, достигая ~40 Свердрупов (Св).

**Ключевые слова:** Курильские острова, приливы, приливные течения, проливы

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.4

#### ВВЕДЕНИЕ

Гряда Курильских островов – это самая северная из трех островных дуг внешнего берега восточной Азии. Она представляет собой дугу длиной 1200 км, выпуклую к Тихому океану и протянувшуюся от острова Хоккайдо к полуострову Камчатка, омываемую Тихим океаном и Охотским морем.

Общее количество основных проливов Курильской гряды ~28. Наиболее широкими и глубокими являются проливы Крузенштерна и Буссоль [Соловьев, 1947].

Проливом называют сравнительное узкое водное пространство между смежными районами Мирового океана. Проливы могут быть длинными и короткими, широкими и узкими, глубокими и мелкими [Зубов, 1956].

Проливы разделяются по их главному географическому значению [Зубов, 1956]:

– соединяющие между собой отдельные районы Мирового океана;

– отделяющие острова или группы островов от материков или других островов;

– разделяющие группы островов или отдельные острова.

По направлению проливы делятся также на:

– подольные, тянущиеся вдоль продольных берегов;

– поперечные, пересекающие горные хребты и складки земной коры;

– нейтральные, расположенные среди островов без резко выраженного соответствия с направлением складчатости.

Если применять данную классификацию к проливам Курильских островов, то видно, что по своему главному географическому значению их можно отнести ко всем трем пунктам. Они соединяют отдельные районы Мирового океана (Охотское море и Тихий океан), отделяют материк от островов и разделяют отдельные острова. Если же смотреть по их направлению, то они преимущественно поперечные.

Курильские острова имеют крайне важное экономическое значение: по ним определяется граница, соединяющая воды Тихого океана и Охотского моря. Это делает знания о проливах крайне важными для судоходства. Также район является очень значимой экономической зоной для России. Он богат как биологическими ресурсами, благодаря чему в нем активно идет промысел, так и полезными ископаемыми, для добычи которых результаты данного исследования очень актуальны.

Анализ имеющихся литературных источников по выбранной теме показал, что особенности приливных колебаний уровня и приливных течений в проливах Курильской гряды недостаточно подробно изучены [Залогин, Косарев, 1999; Родионов и др., 2021]. Выявлено, что проливы Курильской гряды изучались либо отдельно, либо в составе небольших групп [Леонов, 1960; Зырянов, 1974; Talley, Nagata, 1995]. В энциклопедических работах [Гидрометеорология..., 1998] не рассматриваются локальные особенности проливов (кроме самых крупных) и нет указаний на источники данных. Кроме этого, показано, что при моделировании приливов использовались расчетные сетки с большим пространственным шагом, менее детализированная цифровая модель рельефа дна, а многие небольшие проливы вообще не учитывались [Зырянов, 1974; Nakamura et al., 2014; Родионов и др., 2021]. В некоторых работах для моделирования брались только отдельные приливные гармоники, в данной работе использовалось восемь [Nakamura et al., 2014].

Учитывая, что проведение натурных исследований в проливах затруднено сильными приливными течениями и большими перепадами глубин, численное моделирование является одним из немногих доступных методов изучения особенностей приливного водообмена в проливах.

Цель работы – исследование особенностей приливных колебаний уровня моря и приливных течений в проливах Курильской гряды по данным численного моделирования. В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

- создание цифровой модели рельефа дна Курильских островов высокого разрешения;
- создание массивов натурных данных по уровню моря в регионе;
- адаптация модели ADCIRC к району исследования – создание расчетной сетки и выбор граничных условий;
- проведение численных расчетов по модели ADCIRC;
- сравнение данных модели с натурными данными;
- выявление особенностей приливных колебаний уровня в разных проливах Курильской гряды и приливных течений;

– расчет приливного потока в течение приливного цикла с шагом в один час.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для верификации результатов моделирования были взяты данные натурных измерений уровня с восьми прибрежных морских станций за 1977 г.: Охотск, Поронайск, Корсаков, Южно-Курильск, Буревестник, Курильск, Матуа, Северо-Курильск. Они расположены в разных частях Курильской гряды и Охотского моря. Выбор года обусловлен наличием наиболее полных рядов данных по всем станциям. Временной шаг измерений уровня воды составляет один час [ЕСИМО, 2022].

В связи с наличием расчетной сетки с открытой границей необходимо было задать на ней граничные условия, в качестве которых выступили приливные колебания уровня, которые рассчитывались по заданным гармоническим параметрам, взятым из глобальной модели приливов FES2014. Ее основная задача – динамическое моделирование океанских приливов для всего Мирового океана с наибольшей возможной точностью [Lyard et al., 2021].

Для моделирования приливных колебаний уровня и приливных течений необходима цифровая модель рельефа дна, включающая Татарский пролив, Охотское море и прилегающие к Курильской гряде районы Тихого океана. Для всего района моделирования, за исключением Курильских проливов, для создания цифровой модели рельефа использовалась база батиметрических данных GEBCO-2022 с шагом 15 угловых секунд [GEBCO..., 2023]. Для районов Курильских островов рельеф дна был получен с помощью оцифровки навигационных карт от УНиОМО РФ масштабом 1:250 000 [Электронный..., 2023]. После объединения базы GEBCO-2022 с данными оцифровки карт получена цифровая модель рельефа высокого разрешения для исследуемой акватории.

Для проведения численных экспериментов использовалась модель ADCIRC. Она представляет собой численную океаническую модель, используемую для расчета циркуляции воды и колебаний уровня моря, и решает полные уравнения движения для движущейся жидкости на вращающейся Земле. Модельные уравнения были сформулированы с использованием приближений гидростатического давления и Буссинеска. В модели используется метод конечных элементов для дискретизации уравнения по пространственным переменным, что позволяет использовать неравномерные триангуляционные сетки. Приближение по времени осуществляется методом конечных разностей. Модель учитывает такие параметры, как сила Кориолиса, атмосферное давление, напряжение ветра, приливный потенциал

и многие другие. Есть два варианта использования модели ADCIRC. Первый – 2DDI, в виде двумерной модели, где уравнение движения интегрировано по глубине (баротропная модель). Второй – 3D, в качестве трехмерной (баротропная и бароклинная модели).

Модель ADCIRC использует триангуляционные сетки с изменяющимися размерами элементов [Luettich, Westerink, 2004]. Сетку можно построить с помощью нескольких методов: по узлам, расположенным на контуре расчетной области; пропорционально глубине моря; пропорционально уклону дна или градиенту уклона дна. Из-за большого количества островов и проливов в Курильской гряде, а также из-за сложной береговой линии был выбран метод по узлам. С помощью этого метода в программе Surface Modelling System была создана расчетная сетка с шагом ~100–200 м в небольших проливах, в центральных частях крупных проливов ~2–4 км и 15–20 км в открытом море. Полученная сетка содержит в себе ~98 000 расчетных узлов, охватывает северную часть Татарского пролива, Охотское море и прилегающие к Курильским островам акватории Тихого океана (рис. 1). Расчетная сетка имеет открытые границы в районе южной части Татарского пролива и восточнее Курильских островов, а также на самом севере при входе в Пенжинскую губу. Условия на границах с сушей были заданы в виде нестроганого задания отсутствия нормального течения и наличия тангенциального скольжения у материкового берега и островов.

Важным параметром при анализе особенностей течений в проливах является приливный поток. Для его расчета с помощью рассчитанных скоростей и направлений течений была написана специальная программа на языке Python. Ее алгоритм заключается в следующем:

1. Выбираются две крайние точки разреза с разных сторон пролива и шаг расчета.
2. Рассчитываются координаты точек заданного разреза.
3. Рассчитываются значения скорости течения и глубины с помощью метода обратно взвешенного расстояния.
4. Вычисляется угол, на который необходимо повернуть систему координат, чтобы один из векторов скорости течения стал перпендикулярным к разрезу.
5. Приливный поток для каждого шага расчета вычислялся путем умножения его единичной площади сечения на скорость течения.

Суммарная величина потока определялась сложением единичных величин потока, определенных для каждого расчетного шага.

Тип приливов рассчитывался по формуле [Бюден, 1988; Дуванин, 1960]:

$$F = \frac{K1 + O1}{M2 + S2},$$

где K1 – лунно-солнечная деклинационная суточная, 23,93 ч; O1 – главная лунная деклинационная, 25,82 ч; M2 – главная лунная полусуточная, 12,42 ч; S2 – главная солнечная полусуточная, 12,00 ч.

Для сравнения параметров тропических и экваториальных приливов были выбраны два временных промежутка: 02.06.1977–03.06.1977 и 11.10.1977–12.10.1977.

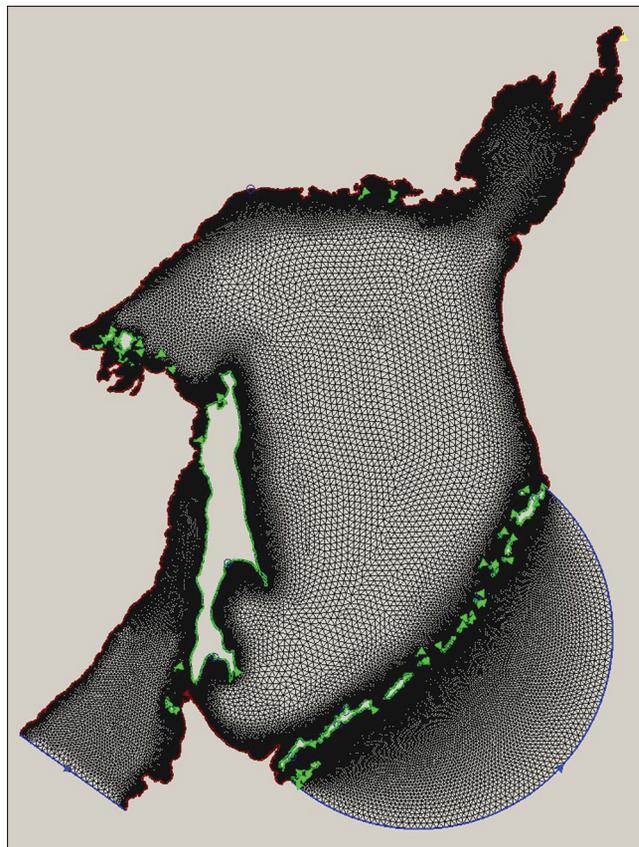


Рис. 1. Расчетная сетка для Охотского моря

Fig. 1. Model grid for the Sea of Okhotsk

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Была проведена верификация модели ADCIRC путем сравнения суммарного уровня моря, фаз и амплитуд четырех основных гармоник (K1, O1, M2, S2), рассчитанных с помощью модели, с натурными измерениями на разных прибрежных гидрометеорологических станциях (табл. 1). Проведенный корреляционный анализ между модельными и натурными параметрами на всех станциях показал, что коэффициент корреляции превышает 0,85, детерминации – 0,73, среднеквадратическое отклонение не превышает 15 см. На рис. 2 приведен пример сравнения для Южно-Сахалинска. Разница амплитуд

гармоник не превышает 8 см. Максимальное различие фаз между натурными и модельными данными составляет ~10%. Это различие может быть объяснено тем, что в модели не учитывается бароклинное преобразование энергии [Tanaka et al., 2007].

Сравнительный анализ показал, что карты пространственной структуры фаз и амплитуд прилива для гармоник M2 и K1, построенных по результатам моделирования, с картами, приведенными в

работах [Романенков, 1996; Шевченко, Романов, 2003; Kowalik, Polyakov, 1998; Zaron, 2017], хорошо согласуются между собой (рис. 3). Необходимо отметить, что у гармоники M2 были выделены четыре точки амфидромии, что соответствует результатам работы [Zaron, 2017]. При этом центральная амфидромия смещена в Амурский лиман, что отличается от работы [Шевченко, Романов, 2003], в которой она была выявлена у восточного берега Сахалина.

Таблица 1

**Сравнение фаз и амплитуд главных полусуточной и суточной приливных волн M2, K1 по данным наблюдения и моделирования**

Станция	Амплитуда, см				Фаза, град. (0–360)			
	Натурные		Модель		Натурные		Модель	
	M2	M2	K1	K1	M2	M2	K1	K1
Северо-Курильск	27,34	30,37	38,14	37,88	204,91	227,08	349,31	2,61
Магуга	21,78	23,37	26,31	27,35	187,67	224,22	3,05	22,03
Курильск	15,93	23,08	18,79	19,19	207,06	227,70	40,51	37,80
Буревестник	28,76	28,84	28,02	25,74	194,67	223,85	347,25	8,56
Южно-Курильск	30,73	32,20	23,23	19,07	189,87	225,81	351,13	357,96

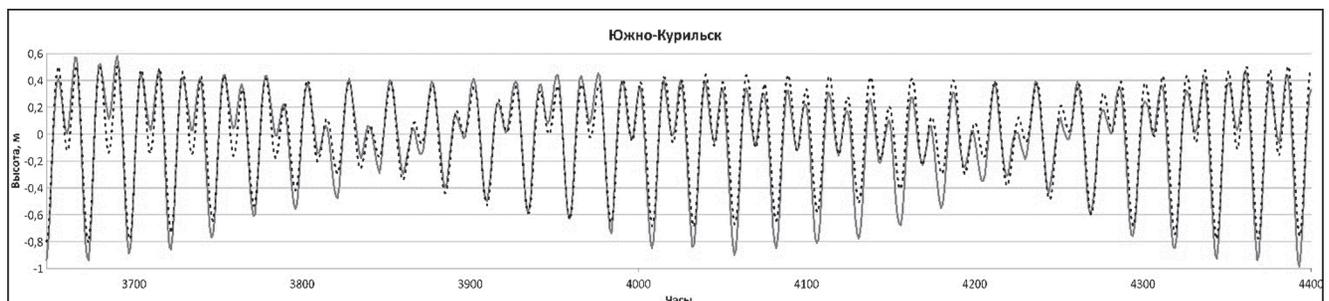


Рис. 2. Колебания уровня моря по натурным измерениям (сплошная линия) и результатам моделирования (пунктирная линия)

Fig. 2. Sea level fluctuations based on field measurements (solid line) and simulation results (dotted line)

Для оценки вклада различных гармоник в суммарные колебания уровня с помощью программы T-Tide проведен гармонический анализ колебаний уровня за весь 1977 г. в девяти проливах: Первого Курильского, Четвертого Курильского, Круженштерна, Буссоль, Уруп, Фриза, Екатерины, Измены и Среднего [Pawłowicz et al., 2002]. Было выделено четыре основных периода колебаний уровня 12, 12,4, 24 и 25,8 ч, что соответствует гармоникам S2, M2, K1, O1. На их основе проведены расчеты по определению типа прилива (табл. 2). Получено, что в проливах северной части Курильской гряды приливы относятся к смешанному типу с преобладанием суточных. В южной части гряды начинают пре-

обладать полусуточные приливы. Это согласуется с выводами, полученными в работах [Леонов, 1960; Атлас океанов, 1974].

По результатам моделирования проанализированы пространственные особенности колебаний уровня моря для всех проливов Курильских островов при тропическом и экваториальном типах приливов. Для этого построены картосхемы уровня моря у Курильской гряды с временным шагом в шесть часов (рис. 4). Максимальная величина тропического прилива в районе Курильской гряды составляет ~2,5–3 м. Наибольшие значения наблюдались у Камчатки, о. Хоккайдо, а также крупных островов Курильской гряды. Во время экваториального прилива его вели-

чина не превышает ~1 м. Отметим, что пространственный градиент уровня моря увеличивается в мелководных проливах при обоих типах прилива.

Для анализа осредненных по глубине приливных течений в проливах Курильской гряды были выбраны ситуации с максимальными скоростями течения. Отмечено, что наибольшие скорости течений наблюдаются на мелководье во всех проливах. Этот эффект подробно описывается в работе [Боуден, 1988] при выходе длинных гравитационных волн с глубокого моря на мелководье. Там же показано, что при учете трения о дно осредненная скорость по глубине все равно увеличивается, но в меньшей степени. Похожие выводы были получены в работе [Лучин, 1988].

В Первом Курильском проливе во время тропического прилива скорости приливных течений не

превышают 2 м/с, причем течения, направленные в сторону Охотского моря, были сильнее, чем в сторону Тихого океана. Пространственное распределение скоростей приливных течений из-за отсутствия резких перепадов глубин в этом проливе равномерное. При экваториальном приливе направления течений остаются аналогичными тропическому, однако скорости течения становятся меньше.

Наибольшие значения скоростей приливных течений в Четвертом Курильском проливе достигают 1,75–2 м/с. Скорости у правого берега в среднем выше, чем у левого, что связано с мелководным участком дна у последнего. В центре пролива из-за увеличения глубины осредненное по глубине течение сильно ослабевает – скорости не превышают 0,5 м/с.

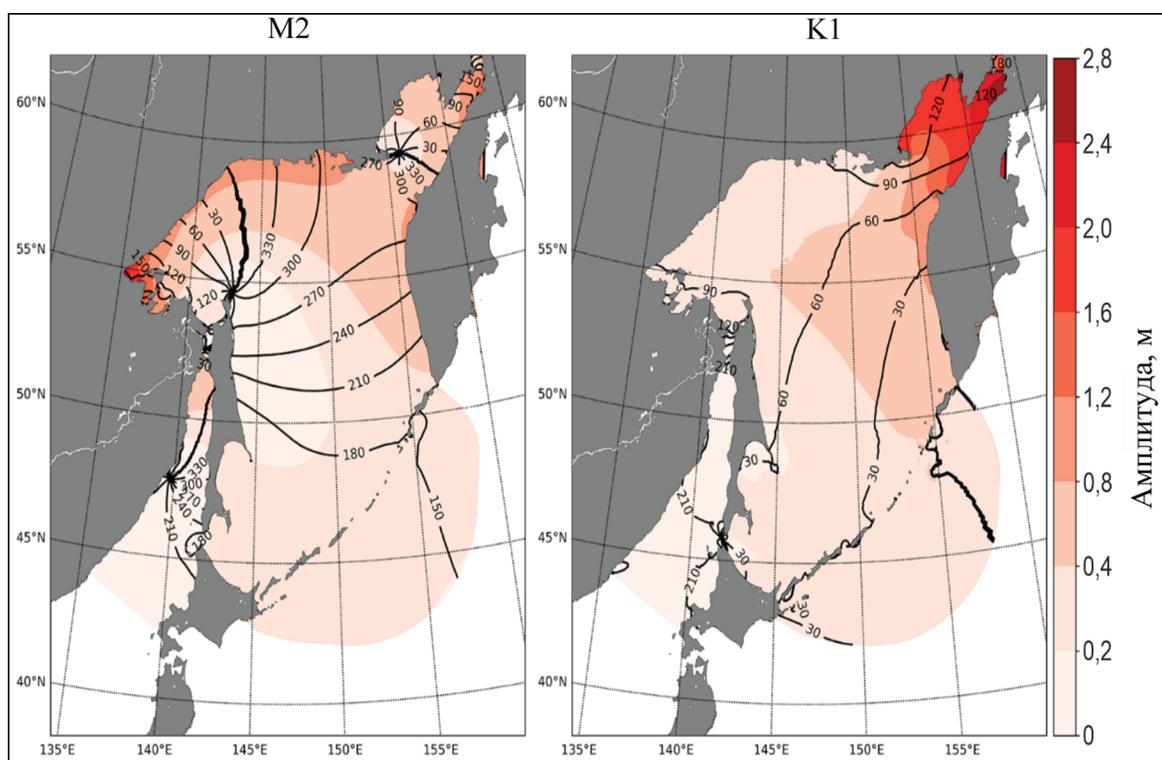


Рис. 3. Пространственная структура прилива. Заливкой приведена амплитуда прилива (м), изолиниями – его фазы (град.)

Fig. 3. Spatial structure of the tide. Filling shows the tide amplitude (m), isolines are for the tide phases (degrees)

Таблица 2

**Значения амплитуд основных приливных гармоник и параметра  $F$**

Пролив	Долгота, град.	Широта, град.	M2	S2	K1	O1	F	Тип прилива
Первый Курильский	156,55	50,89	33,31	13,84	47,24	34,34	1,7	Смешанный, в основном суточный
Крузенштерна	153,61	48,51	25,89	10,65	36,65	29,49	1,8	
Буссоль	151,28	46,72	22,88	9,34	27,26	22,03	1,5	
Фриза	149,11	45,56	23,11	9,38	23,76	19,1	1,3	
Измены	145,29	43,74	26,04	10,02	20,63	18,37	1,1	

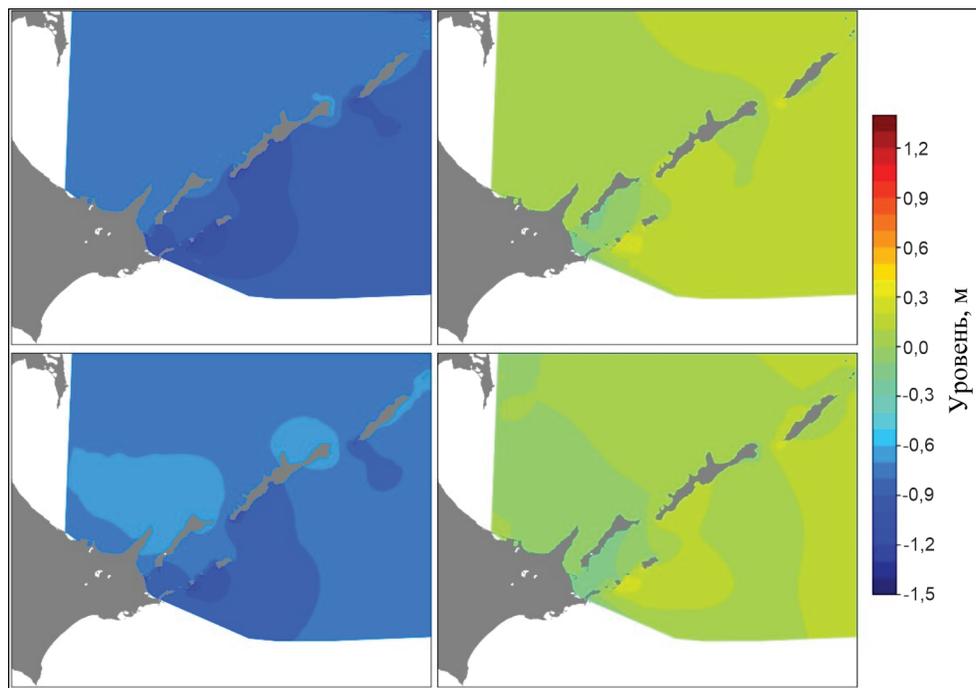


Рис. 4. Пространственное распределение уровня моря (м) в районе южной части Курильских островов 02–03.06.1977. Дискретность 12 часов

Fig. 4. Spatial distribution of sea level (m) in the area of the southern part of the Kuril Islands 02–03.06.1977. The discreteness is 12 hours

Пролив Крузенштерна является одним из самых широких проливов Курильской гряды, его ширина в самой узкой части составляет 74 км. На юге его глубина достигает 1900 м, а у о. Шиашкотан она уменьшается до 100 м. Приливные течения у о. Шиашкотан намного сильнее, чем на противоположном берегу, что связано с большим мелководным участком около его берега (рис. 5). Во время тропического прилива около острова наблюдаются одни из самых больших скоростей течений среди проливов Курильской гряды, которые достигают более 4 м/с. В связи со значительной неоднородностью глубин в проливе отмечается сильная пространственная неоднородность распределения скоростей по сравнению с другими проливами Курильской гряды. Скорости  $\sim 2$  м/с четко выделяют мелководье, которое доходит до середины пролива. В южной части находится наиболее глубокая часть пролива, в которой скорости течений достигают своего минимума. Во время экваториального прилива в проливе Крузенштерна скорости приливных течений остаются одними из самых высоких в проливах Курильских островов и достигают 1,5 м/с.

В проливе Буссоль у берегов острова Чирпой скорость приливных течений ниже по сравнению с течениями около острова Симушир. Важным фактором, влияющим на скорость течений, является наличие большого мелководного участка

около о. Симушир, где максимальные скорости течений во время тропического прилива в обе стороны достигают 1,75 м/с. В большей части пролива скорости не превышают 0,5 м/с, что связано с глубинами моря, достигающими более 2,5 км. Значения скоростей до 1,75 м/с наблюдаются в юго-восточной части пролива, что также связано с уменьшением глубины моря. Во время экваториального прилива скорости в проливе Буссоль становятся очень небольшими и не превышают 0,75 м/с.

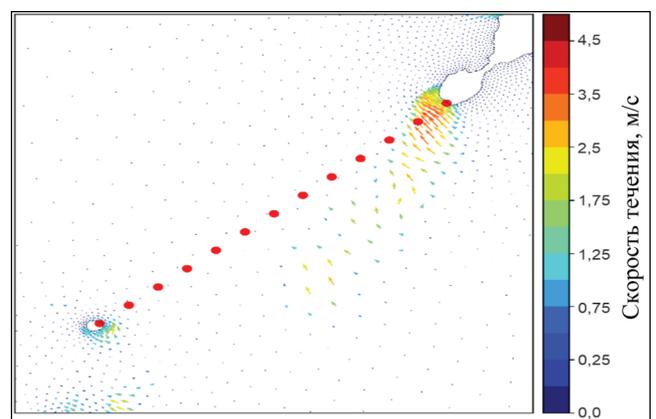


Рис. 5. Векторы скорости приливных течений в проливе Крузенштерна, 03.06.1977, 6 часов

Fig. 5. Velocity vectors of tidal currents in the Kruzenshtern Strait – 03.06.1977, 6 hours

Во время тропических приливов в проливе Уруп наибольшие скорости осредненных по глубине течений достигают 3,5 м/с. Поскольку в проливе отсутствуют значительные перепады глубин, а их максимальные значения не превышают 200 м, разница скоростей течений в нем незначительна. Однако стоит отметить, что из-за неравномерного распределения глубин в проливе Уруп пространственная структура направлений течений более неоднородна по сравнению с другими проливами. При экваториальном приливе скорости не превышают 1,25 м/с, а пространственная структура остается аналогичной тропическому.

В проливе Фриза глубины в проливе значительно варьируют от 600 м до мелководья у о. Уруп, благодаря чему создаются условия для больших скоростей течений, достигающих 4 м/с в обоих направлениях.

Аналогичный анализ был проведен для проливов Среднего, Екатерины, Измены и проливов Малой Курильской гряды. В них наблюдаются схожие закономерности с ранее описанными проливами, что подтверждает общие тенденции в динамике течений и распределении глубин в регионе.

По итогам анализа всех рассмотренных проливов выделены следующие основные закономерности:

1. Влияние глубины на скорости течений: чем меньше глубина, тем выше скорости осредненных по глубине течений.

2. Распределение скоростей осредненных по глубине течений: наибольшие значения скоростей течений наблюдаются у восточных и северо-восточных берегов проливов. Это связано с особенностями распределения глубин в Курильской гряде, где у этих берегов обычно находятся более крупные по площади мелководные участки.

3. Картина направлений течений: в периоды тропических и экваториальных фаз, несмотря на различия в значениях скоростей течений, общая картина направлений течений остается схожей.

При изучении приливных течений в проливах важной задачей является расчет приливного потока при различных типах и фазах приливов. Проведенные численные эксперименты позволили рассчитать изменения приливного потока в проливах с часовым шагом по осредненным по вертикали течениям. Аналогичные расчеты проводились в работе [Nakamura et al., 2000], где приливной поток рассчитывался на грубой сетке с шагом  $5 \times 5$  км. Там же показывается, что при уменьшении шага до  $2,5 \times 2,5$  км средние скорости течения увеличиваются на 30%, что ведет к росту приливного потока. На основании этого можно предположить, что при меньшем шаге сетки величина потока будет близка к реальным значениям.

В Первом Курильском проливе в обоих типах приливов выделяются суточный и полусуточный ход приливного потока. При тропическом типе суточный ход выражен наиболее четко, а его значения достигают 0,3 Св (рис. 6А). При этом значения потока, направленного в сторону Охотского моря, немного превышают значения потока в сторону Тихого океана. Для экваториального прилива суточный и полусуточный ход приливного потока практически не отличаются по величине и составляют около 0,2 Св.

При тропическом приливе полусуточные колебания приливного потока в Четвертом Курильском проливе слабо выражены по сравнению с суточным ходом. Максимальные значения потока при тропическом приливе  $\sim 3$  Св, когда приливные течения направлены в сторону Охотского моря. Во время экваториального прилива наибольшие значения потока составляют около 1 Св. Подобно Первому Курильскому проливу, во время экваториального прилива суточные колебания слабо выражены и начинают преобладать полусуточные.

В самом широком проливе Курильских островов, проливе Крузенштерна, во время тропического прилива наибольшая величина приливного потока составляет  $\sim 10$  Св. В проливе преобладают суточные колебания с почти отсутствующими полусуточными. При экваториальном приливе максимальные значения потока снижаются примерно в два раза и составляют  $\sim 5$  Св, при этом начинают преобладать полусуточные колебания, как и в ранее рассмотренных проливах.

В проливе Буссоль при тропическом приливе наблюдаются самые высокие значения приливного потока в Курильской гряде, достигающие 30 Св при течениях в Охотское море и 40 Св из него (см. рис. 6Б). Большая величина потока объясняется значительной шириной пролива и большими глубинами, которые превышают 2300 м. В отличие от предыдущих проливов, здесь не выражен полусуточный ход. В экваториальный прилив суточные колебания полностью заменяются на полусуточные. Максимальные значения потока становятся в четыре раза меньше 10 Св.

При анализе проливов Урупа, Фриза, Екатерины и Измены были выявлены аналогичные закономерности, сходные с ранее рассмотренными проливами.

Исследование особенностей приливного потока во всех рассмотренных проливах показало, что в проливах с меньшими средними глубинами даже во время тропических приливов полусуточные колебания сильнее выражены по сравнению с суточными. Например, это наблюдается в Первом Курильском проливе. При этом в более глубоких проливах, как в проливе Буссоль, полусуточные колебания не выделяются, появляясь только во время экваториальной фазы.

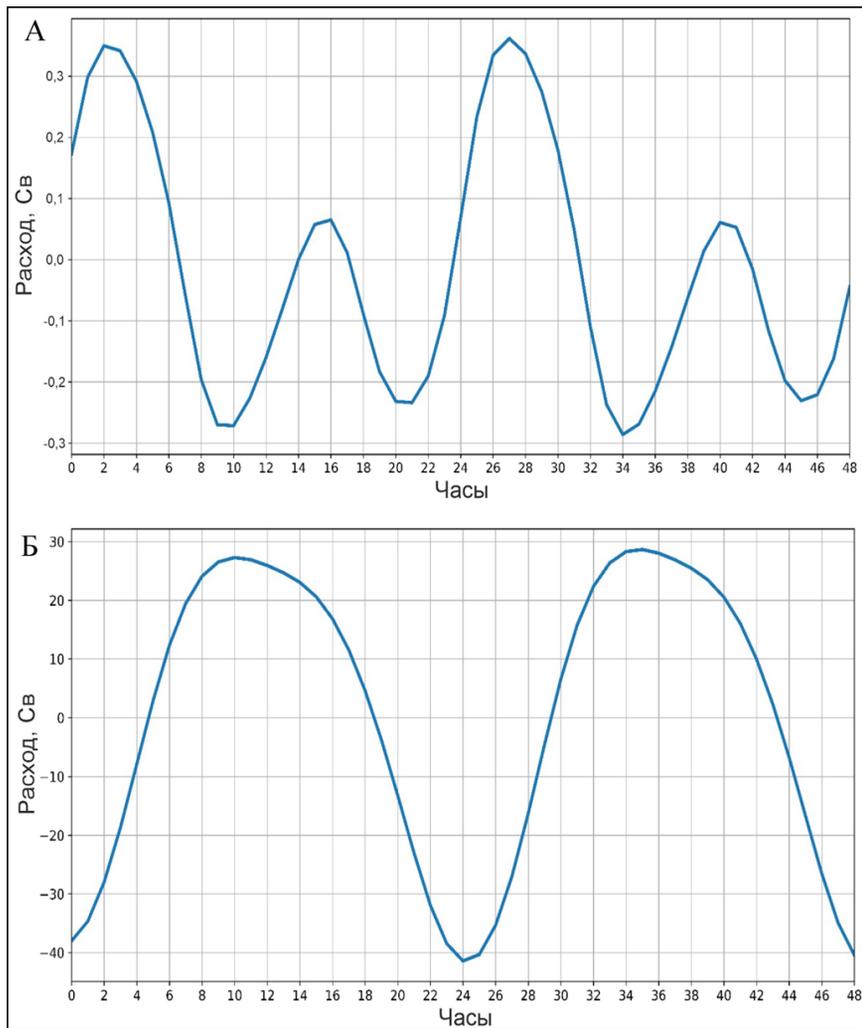


Рис. 6. Суточный ход приливного потока (Св) за 02–03.06.1977:  
А – Первый Курильский пролив; Б – пролив Буссоль

Fig.6. The diurnal cycle of the tidal flow (Sv) for 02–03.06.1977:  
A – the First Kuril Strait; Б – the Bussol Strait

### ВЫВОДЫ

В выполненной работе были рассмотрены особенности приливных колебаний уровня моря и приливных течений в проливах Курильской гряды по данным численного моделирования.

Выявлены следующие особенности приливных колебаний уровня, приливных течений и приливного потока в проливах Курильских островов:

- приливы в проливах северо-восточной части Курильской гряды в среднем имеют смешанный тип с преобладанием суточного хода, а в юго-западной части преобладают полусуточные;

- наибольшие величины приливов достигаются во время тропического прилива, составляя 2,5–3 м. Они наблюдаются у Камчатки и у Хоккайдо, а также крупных островов Курильской гряды;

- наибольшие скорости осредненных по глубине течений в проливах Курильской гряды достигают 4,5 м/с. Они наблюдаются в проливах Круzensштерна, Фриза, Среднего у их восточных и северо-восточных берегов, что связано с особенностями рельефа дна;

- во время тропических и экваториальных фаз, несмотря на различия в величинах скоростей течений, пространственная структура приливных течений остается схожей между собой;

- в проливах с меньшими средними глубинами во время тропического прилива более ярко выражены полусуточные колебания. Однако в более глубоких проливах полусуточные колебания в этой фазе прилива проявляются очень слабо или вообще отсутствуют;

- максимальное значение приливного потока отмечается в проливе Буссоль и достигает ~40 Св.

**Благодарность.** Работа выполнена в рамках госзадания «Комплексные исследования современного состояния вод Мирового океана», номер ЦИТИС 121031900090-6.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас океанов. Тихий океан / Главное управление навигации и океанографии Министерства обороны СССР, М., 1974. 302 с.
- Боуден К. Физическая океанография прибрежных вод / пер. с англ. А.Ю. Краснопевцева; под ред. И.Ф. Шадрина. М.: Мир, 1988. 324 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 9: Охотское море. Вып. 1. СПб.: Гидрометеоздат, 1998. 342 с.
- Дуванин А.И. Приливы в море. Л.: Гидрометеоздат, 1960. 390 с.
- Залогин Б.С., Косарев А.Н. Моря. М.: Мысль, 1999. 399 с.
- Зубов Н.Н. Основы учения о проливах Мирового океана. М.: Гос. изд-во географической литературы, 1956. 240 с.
- Зырянов В.Н. К вопросу о водообмене через северные Курильские проливы // Океанология. 1974. Т. 14. № 1. С. 16–21.
- Леонов А.К. Региональная океанография. Ч. I. Л.: Гидрометеоздат, 1960. 766 с.
- Лучин В.А. Особенности колебаний уровня и приливных течений в проливах Курильской гряды // Труды ДВНИГМИ. 1988. Вып. 39. С. 52–59.
- Романенков Д.А. Прогностическое моделирование приливов в Охотском море: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. СПб.: РГГМИ, 1996. 16 с.
- Родионов А.А., Андросов А.А., Фофонова В.В., Кузнецов И.С., Вольцингер Н.Е. Моделирование приливной динамики северных проливов Курильской гряды // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. № 3. С. 20–39.
- Соловьев А.И. Курильские острова // под ред. А.А. Григорьева. М.: Изд-во Главсевморпути. 1947. 307 с.
- Шевченко Г.В., Романов А.А. Пространственная структура прилива в Охотском море на основе данных спутниковой альтиметрии // Колебания уровня в морях. РГГМУ. СПб.: Гидрометеоздат, 2003. С. 92–110.
- Kowalik Z., Polyakov I. Tides in the Sea of Okhotsk, *J. Phys. Oceanogr.*, 1998, vol. 28(7), p. 1389–1409, DOI: 10.1175/1520-0485(1998)028<1389:TITSOO>2.0.CO;2.
- Luettich R., Westerink J. Formulation and Numerical Implementation of the 2D/3D ADCIRC Finite Element Model, Version 44.XX, 2004, 74 p.
- Lyard F., Allain D., Cancet M. et al. FES2014 global ocean tide atlas: design and performance, *Ocean Science, European Geosciences Union*, 2021, vol. 17, p. 615–649, DOI: 10.5194/os-17-615-2021.
- Nakamura T., Akitomo K., Hatayama T. Tidal Exchange through the Kuril Straits, *J. Phys. Oceanogr.*, 2000, vol. 30, p. 1622–1644, DOI: 10.1175/1520-0485(2000)030<1622:TETTKS>2.0.CO;2.
- Nakamura T., Takeuchi Y., Uchimoto K. et al. Effects of temporal variation in tide-induced vertical mixing in the Kuril Straits on the thermohaline circulation originating in the Okhotsk Sea, *Progress in Oceanography*, 2014, vol. 126, p. 135–145, DOI: 10.1016/j.pocean.2014.05.007.
- Pawlowicz R., Beardsley B., Lentz S. Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB using T\_TIDE, *Computers and Geosciences*, 2002, vol. 28, p. 929–937, DOI: 10.1016/S0098-3004(02)00013-4.
- Talley L.D., Nagata Y. The Okhotsk Sea and Oyashio Region, *PICES Scientific Reports*, 1995, vol. 2, p. 227.
- Tanaka Y., Hibiya T., Niwa Y. Estimates of tidal energy dissipation and diapycnal diffusivity in the Kuril Straits using TOPEX/POSEIDON altimeter data, *J. Phys. Oceanogr.*, 2007, vol. 112, C10021, DOI: 10.1029/2007JC004172.
- Zaron E. Topographic and frictional controls on tides in the Sea of Okhotsk, *Ocean Modelling*, 2017, vol. 117, p. 1–11, DOI: 10.1016/j.ocemod.2017.06.011.
- Электронные ресурсы*  
ЕСИМО: Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане. URL: <http://esimo.ru/portal/> (дата обращения 15.11.2022).  
Gebco\_22 Grid. General Bathymetric Chart of the Oceans. URL: [https://www.gebco.net/data\\_and\\_products/gridded\\_bathymetry\\_data/gebco\\_2022/](https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/gebco_2022/) (дата обращения 10.02.2023).  
Электронный каталог карт УНиО МО // Navy Soft. URL: <https://navysoft.ru/> (дата обращения 10.09.2023).

Поступила в редакцию 27.11.2023

После доработки 12.02.2024

Принята к публикации 24.04.2024

## SPECIFIC FEATURES OF TIDAL EXCHANGE IN THE KURIL STRAITS ACCORDING TO MODELING DATA

V.I. Ilin<sup>1</sup>, V.S. Arkhipkin<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology

<sup>1</sup> Student; e-mail: vsevolod\_ilin@mail.ru

<sup>2</sup> Associate professor; Ph.D. in Geography; e-mail: victor.arkhipkin@gmail.com

Specific features of tidal fluctuations of sea level and tidal currents in the straits of the Kuril Islands are studied using numerical modeling. Two-time intervals, i. e. 02.06.1977–03.06.1977 and 11.10.1977–12.10.1977, were taken to compare the parameters of tropical and equatorial tides. The simulation results were verified with the field data. It was found that the straits of the northeastern part of the Kuril Ridge have a mixed type of tides with a predominance of the diurnal course, and in the southwestern part a semi-diurnal course prevails. The highest tides (up to 2,5–3 m) in the study period were observed on 02.06.1977 near the Kamchatka Peninsula and the Hokkaido Island, as well as large islands of the Kuril Ridge. Four main oscillation periods of 12, 12,4, 24 and 25,8 hours were identified, which corresponds to the S2, M2, K1 and O1 harmonics. Analysis of the data obtained showed that the maximum velocities of the depth-averaged currents reach 4,5 m/s. The highest speeds were recorded in the Kruzenshtern, Frieze and Sredny Straits. Estimates of the tidal flow have shown that semi-daily fluctuations are more pronounced in the straits with lower average depths during a tropical tide. In deeper straits, semi-daily fluctuations at tropical tides are very weak or absent at all, an example is the Bous-sol Strait. It is calculated that when using a two-dimensional model, the maximum values of the tidal flow are observed in the Bous-sol Strait, reaching ~40 Sverdrups (Sv).

**Keywords:** Kuril Islands, tides, tidal currents, straits

**Acknowledgements.** The work was carried out within the framework of the state assignment “Comprehensive studies of the current state of the waters of the World Ocean”, number CITIS 121031900090-6.

### REFERENCES

- Atlas okeanov. Tikhij okean* [Atlas of the Oceans. Pacific Ocean], Main Directorate of Navigation and Oceanography of the USSR Ministry of Defense, 1974, 302 p. (In Russian)
- Bowden K. *Physical oceanography of coastal waters*. E. Horwood, Halsted Press, Ellis Horwood Limited, 1983, 302 p.
- Duvanin A.I. *Prilivy v more* [Tides in the sea], Leningrad, Hydrometeoizdat Publ., 1960, 390 p. (In Russian)
- Gidrometeorologiya i gidrokimiya morej* [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas], vol. 9, The Sea of Okhotsk, iss. 1, St. Petersburg, Hydrometeoizdat Publ., 1998, 342 p. (In Russian)
- Kowalik Z., Polyakov I. Tides in the Sea of Okhotsk, *J. Phys. Oceanogr.*, 1998, vol. 28(7), p. 1389–1409, DOI: 10.1175/1520-0485(1998)028<1389:TITSOO>2.0.CO;2.
- Leonov A.K. *Regionalnaya okeanografiya*, Chast I [Regional oceanography, Part I], Leningrad, Hydrometeorological Publ. House, 1960, 766 p. (In Russian)
- Luchin V.A. Osobennosti kolebaniya urovnya i prilivnykh techenij v prolivakh Kurilskoj gryady [Specific features of level fluctuations and tidal currents in the straits of the Kuril Ridge], *Proceedings of the DVNIGMI*, 1988, iss. 39, p. 52–59. (In Russian)
- Luettich R., Westerink J. *Formulation and Numerical Implementation of the 2D/3D ADCIRC Finite Element Model*, Version 44.XX, 2004, 74 p.
- Lyard F., Allain D., Cancet M. et al. FES2014 global ocean tide atlas: design and performance, *Ocean Science, European Geosciences Union*, 2021, vol. 17, p. 615–649, DOI: 10.5194/os-17-615-2021.
- Nakamura T., Akitomo K., Hatayama T. Tidal Exchange through the Kuril Straits, *J. Phys. Oceanogr.*, 2000, vol. 30, p. 1622–1644, DOI: 10.1175/1520-0485(2000)030<1622:TETTKS>2.0.CO;2.
- Nakamura T., Takeuchi Y., Uchimoto K. et al. Effects of temporal variation in tide-induced vertical mixing in the Kuril Straits on the thermohaline circulation originating in the Okhotsk Sea, *Progress in Oceanography*, 2014, vol. 126, p. 135–145, DOI: 10.1016/j.pocean.2014.05.007.
- Pawlowicz R., Beardsley B., Lentz S. Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB using T\_TIDE, *Computers and Geosciences*, 2002, vol. 28, p. 929–937, DOI: 10.1016/S0098-3004(02)00013-4.
- Rodionov A.A., Androsov A.A., Fofonova V.V., Kuznetsov I.S., Volzinger N.E. Modelirovanie prilivnoj dinamiki severnykh prolivov Kurilskoj gryady [Modeling the tidal dynamics of the northern straits of the Kuril Ridge], *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*, 2021, no. 3, p. 20–39. (In Russian)
- Romanenkov D.A. *Prognosticheskoe modelirovanie prilivov v Okhotskom more* [Predictive modeling of tides in the Sea of Okhotsk], Abstract of dissertation. St. Petersburg, RSHU, 1996, 16 p. (In Russian)
- Shevchenko G.V., Romanov A.A. [Spatial structure of the tide in the Sea of Okhotsk basing on the satellite altimetry data], *Kolebaniya urovnya v moryakh* [Sea level fluctuations], RGGMU, Saint-Petersburg, Hydrometeoizdat Publ., 2003, p. 92–110. (In Russian)
- Soloviev A.I. *Kurilskie ostrova* [The Kuril Islands], A.A. Grigoriev (ed.), Moscow, Glavsevmorput Publ. House, 1947, 307 p. (In Russian)

- Talley L.D., Nagata Y. The Okhotsk Sea and Oyashio Region, *PICES Scientific Reports*, 1995, vol. 2, p. 227.
- Tanaka Y., Hibiya T., Niwa Y. Estimates of tidal energy dissipation and diapycnal diffusivity in the Kuril Straits using TOPEX/POSEIDON altimeter data, *J. Phys. Oceanogr.*, 2007, vol. 112, C10021, DOI: 10.1029/2007JC004172.
- Zalogin B.S., Kosarev A.N. *Morya* [Seas], Moscow, Mysl Publ., 1999, 399 p. (In Russian)
- Zaron E. Topographic and frictional controls on tides in the Sea of Okhotsk, *Ocean Modelling*, 2017, vol. 117, p. 1–11, DOI: 10.1016/j.ocemod.2017.06.011.
- Zubov N.N. *Osnovy ucheniya o prolivakh Mirovogo okeana* [Fundamentals of the doctrine of the straits of the World Ocean], Moscow, State Publ. House of Geographical Literature, 1956, 240 p. (In Russian)
- Zyryanov V.N. K voprosu o vodoobmene cherez severnyye Kurilskie prolivy [On the issue of water exchange through the Northern Kuril Straits], *Oceanology*, 1974, vol. 14, no. 1, p. 16–21. (In Russian)

*Web-sources*

- ESIMO: Unified state information system on the situation in the World Ocean, URL: <http://esimo.ru/portal/> (accessed 15.11.2022).
- Gebco\_22 Grid. General Bathymetric Chart of the Oceans, URL: [https://www.gebco.net/data\\_and\\_products/gridded\\_bathymetry\\_data/gebco\\_2022/](https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/gebco_2022/) (accessed 10.02.2023).
- Electronic catalog of maps of UNiO MO, Navy Soft, URL: <https://navysoft.ru/> (accessed 10.09.2023).

Received 27.11.2023

Revised 12.02.2024

Accepted 24.04.2024

## КОНЦЕПЦИЯ СТРУКТУРНОЙ КАРТЫ ГЕОСИСТЕМ

А.В. Хорошев

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии и ландшафтоведения, проф., д-р геогр. наук; e-mail: avkh1970@yandex.ru*

Большинство традиционных ландшафтных карт до сих пор ориентированы на отражение закономерных сочетаний геокомпонентов в зависимости от генезиса геосистемы и положения на градиентах экологических условий, но содержат мало информации о характере связей между пространственными элементами геосистем. В статье предлагается новая концепция карт геосистем, которая содержит обоснование путей развития методики, которая отражала бы внутреннюю структуру геосистем как причину и как результат латеральных связей между пространственными элементами. Предлагается концепция структурной карты геосистем. Концепция направлена на усиление системного понимания гетерогенных пространств. Предлагается программа карт, которые могли бы относиться к семейству ландшафтных, но содержали бы объяснение латеральных отношений между пространственными элементами геохоры, результирующей текстуры и способности пространственной структуры к саморазвитию. Геохоры характеризуются в категориях сложности внутреннего устройства, положения на региональных экологических градиентах, набора внутренних экологических градиентов, диапазона значений экологического градиента, набора и напряженности латеральных потоков, текстуры, тенденция изменения сложности строения, наличия резких и постепенных границ и устойчивости их положения. Структурная карта представляет слой ГИС, который надстраивается над слоем традиционной ландшафтной карты, показывающей геосистемы более низкого ранга. Главная цель пользования структурными картами – получение представления о степени мозаичности пространства, возможностях и лимитирующих факторах хозяйственной деятельности, устойчивости свойств компонентов и пространственной структуры. Карты будут показывать условия отбора типов и технологий землепользования, чувствительных к размерам угодий и латеральным влияниям соседних угодий. С точки зрения землепользователя эта информация облегчает оценку надежности угодий в выполнении социально-экономических функций и себестоимости. На примере Архангельской области приводится характеристика структуры геохор. Структурные карты геосистем являются не альтернативой, а дополнением к традиционным ландшафтным картам. В дальнейшем потребуются разработка более строгих регионально-специфичных критериев для идентификации значимых структурных характеристик.

**Ключевые слова:** геосистема, геохора, структура, градиент, латеральная связь, текстура, сложность, границы геосистем

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.5

### ВВЕДЕНИЕ

Хотя понятие «геосистема» было введено в ландшафтоведении еще в 1960-х гг. [Сочава, 1963], лишь к началу XXI в. постепенно пришло осознание необходимости обновления перечня задач, встающих перед ландшафтным картографированием, для приведения его практики в соответствие с общей теорией систем. Следуя общим системным представлениям [Ласточкин, 2011], при характеристике гетерогенной геосистемы (т. е. геохоры) необходимо отражать: а) набор пространственных элементов; б) связи между ними и условия их возникновения, т. е. потоки вещества; в) эмерджентное свойство, не присущее элементам по отдельности; г) положение в геосистеме более высокого ранга. Большинство традиционных ландшафтных карт до сих пор ориентировано на отражение закономерных сочетаний геокомпонентов в зависимости от генезиса геосистемы и положения на

градиентах экологических условий. Описание ландшафтной структуры обычно сводится к пространственным пропорциям таксонов, что, строго говоря, характеризует не структуру, а строение. Структура – это совокупность устойчивых связей между элементами [Садовский, 1974], т. е. первые два пункта из перечня критериев системного описания [Ласточкин, 2011]. Тенденция двух последних десятилетий – разработка способов объективизации выделения элементарных единиц с опорой либо на геотопологический детерминизм [Ласточкин, 2011], либо на физическое обоснование полисистемных представлений [Черкашин, 2007; Сысуев, 2020].

В настоящее время ощущается нереализованность в ландшафтном картографировании серии теоретических достижений, которые позволяли бы при размещении видов хозяйственной деятельности и природоохранных мероприятий более полно

учитывать механизмы пространственной дифференциации, аккумулятивные и дальнедействующие эффекты внешних воздействий. К числу связанных с этим нерешенных вопросов относятся:

а) неявное отражение в традиционных легендах ландшафтных карт эмерджентных свойств природно-территориальных комплексов (ранга урочища, местности, ландшафта), возникающих как результат взаимодействия пространственных элементов;

б) противоречие между устоявшимся генетико-морфологическим подходом к идентификации и классификации ландшафтных единиц и осознанием реальной полиструктурной организации ландшафта, эффектов суперпозиции (аддитивных эффектов) разнотипных ландшафтных структур и их эмерджентных (неаддитивных) эффектов;

в) противоречие между декларируемой гетерогенностью природных территориальных комплексов ранга выше фации и стремлением найти для каждого из них единственную доминирующую характеристику каждого компонента;

г) противоречие между традиционным подходом к отражению ландшафтных границ как статичных линейных объектов и реальной высокой встречаемостью постепенных (континуальных) и/или подвижных (во временном масштабе территориального планирования) границ, которые могут отражать реакцию на глобальные изменения, саморазвитие или возможность нескольких равновероятных устойчивых состояний.

Способы отражения на ландшафтных картах эмерджентных эффектов и даже их выявления пока не разработаны. То же можно сказать об эффектах суперпозиции ландшафтных структур, хотя примеры полиструктурного картографирования существуют [Солнцев и др., 2006; Гродзинский, 2014]. Вопросы адекватного отражения внутренней гетерогенности ландшафтных единиц, разнородности границ и их динамичности поставлены давно [Видина, 1973; Викторов, Чикишев, 1990], но до сих пор не привлекли достаточного внимания; этот пробел и пытается отчасти восполнить данная статья.

В то же время разработан целый ряд концепций, которые позволяют приблизить ландшафтное картографирование к системному содержанию. Эти концепции частично развивают идеи более ранних этапов ландшафтоведения. Уместно привести цитату из работы А.А. Крауклиса: «...Любая фация существует только в системе пронизывающих ее материальных связей с пространственно-смежными и более удаленными фациями, т. е. в составе определенной геохоры. Ввиду интенсивности эти горизонтальные взаимодействия в элементарных ландшафтных выделах определяют ход и направление смен не в меньшей мере, чем это делают взаи-

модействие компонентов внутри отдельных топов и влияния широкомасштабных фоновых процессов» [Крауклис, 1979, с. 107].

Легенды традиционных ландшафтных карт, составляемых с 1950-х гг., обычно содержат информацию о геолого-геоморфологическом строении, характере увлажнения, почвах, фитоценозах [Видина, 1973]. Легенды ландшафтных карт в наиболее простом и, по мнению автора, устаревающем варианте строились на основании компиляции сведений об их компонентах и их свойствах («форма рельефа ... на ... породах с ... растительностью на ... почвах»). Такая словесная модель оптимальна для характеристики элементарной единицы – фации. Для единиц более высокого ранга часто обходятся либо генерализацией (характеристикой доминирующей единицы), либо сочетанием характеристик компонентов с переходом на более высокий таксономический уровень (подзолистые почвы вместо слабоподзолистых, темнохвойные леса вместо еловых и т. п.). Однако для более высоких рангов геосистем-геохор требуется еще и информация о внутренней неоднородности и ее причинах, в том числе связующих потоках. Стандартный путь для отражения наличия нескольких типов пространственных элементов – использование оборотов типа «с сочетанием А и Б», «с чередованием А и Б», «с А на гребнях и Б в ложинах», «с редкими пятнами А на фоне Б» или просто «с А и Б» (здесь А и Б – символические обозначения разнотипных природных комплексов). Такой способ дает некоторое представление о неоднородности, но не объясняет ее. Более полувека назад рекомендовалось отражать сложность внутренней структуры и характер взаиморасположения элементов [Милкина, 1970; Видина, 1973; Мамай, 1973; Викторов, Чикишев, 1990], но широкого применения эта идея, к сожалению, не получила.

На современном этапе развития ландшафтоведения с учетом требования системного понимания к перспективным направлениям развития карт геосистем относятся следующие [Солодянкина и др., 2021 с дополнениями]:

1. Характеристика сложности внутреннего устройства (мозаичности, гетерогенности) ландшафтов как геосистем, состоящих из набора взаимодействующих элементов.

2. Указание на положение геосистемы на экологических градиентах регионального масштаба и указание соответствующих информативных свойств.

3. Объяснение ключевых внутренних экологических градиентов (увлажнения, трофности, засоленности, освещенности, свойств мерзлоты и т. п.), которые создают мозаичность геосистемы и закономерные соседства пространственных элементов.

4. Отражение диапазона значений экологических факторов, определяющего интенсивность латеральных потоков.

5. Характеристика напряженности латеральных потоков вещества и энергии, связывающих пространственные элементы геохоры.

6. Характеристика текстуры (рисунка) – одновременно результата направленных процессов и рамочного условия для развития процессов – как критерия для прогноза наиболее вероятных трендов в соотношениях пространственных элементов и распространения эффектов нарушений по территории ландшафта.

7. Отражение тенденции изменения сложности строения как критерия скорости естественных трендов саморазвития и, следовательно, устойчивости компонентной и пространственной структуры к внешним нагрузкам.

8. Дифференцированный показ резких и постепенных границ как критерия возможности нескольких устойчивых состояний, неодинаковой инертности компонентов к внешним воздействиям (в том числе антропогенным) или наличия долгосрочных трендов.

9. Отражение устойчивости пространственного положения границ, возможности их смещения, скорости и направления такого смещения как показателя стабильности пространственной структуры ландшафта и критерия надежности планировочных решений в долгосрочной перспективе.

Этот перечень явно выходит за рамки сложившейся традиции ландшафтного картографирования, которое исходит из задачи показа закономерных сочетаний свойств компонентов, т. е. радиальной структуры.

Цель данной статьи – разработка концепции специальных карт, которые показывали бы внутреннюю структуру геосистем как причину и как результат латеральных связей между пространственными элементами. Результатом является обоснованный перечень характеристик геохор, раскрывающих их системное содержание. Возможность реализации концепции и практического смысла предлагаемых карт обсуждается на примере таежного ландшафта.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Мы исходим из идеи о востребованности нового типа карт, которые могли бы относиться к семейству ландшафтных, но содержали бы объяснение причин внутренней гетерогенности, латеральных отношений между пространственными элементами геохоры, результирующей текстуры и динамичности пространственной структуры. Поскольку связи (а не просто набор элементов) – это и есть структура системы, то такие карты могут быть названы «структурными картами геосистем».

Для обоснования реализуемости концепции использован пример хорошо изученного среднетаежного ландшафта структурно-моренно-эрозионной равнины с сочетанием лесных, болотных, луговых и пахотных урочищ в Устьянском районе на юге Архангельской области в бассейне р. Заячья [Хорошев, 2005]. Геохоры выделялись на основе ландшафтной карты урочищного уровня масштаба 1 : 50 000 [Хорошев, 2005], составленной на основе традиционных методов, разработанных в московской школе ландшафтоведения [Видина, 1973]. Информация о свойствах геокомпонентов в конкретных урочищах, экологических градиентах, степени стабильности границ получена в ходе полевых исследований автора и его сотрудников в 1990–2020-х гг., обеспеченных более чем 1000 комплексными описаниями фаций. Для объяснения концепции выделены три модельные геохоры, отличающиеся по набору и рисунку чередующихся урочищ. Мы исходили из предположения, что набор и рисунок урочищ различается в зависимости от характерного диапазона эдафотопов (т. е. комбинаций гигротопы и трофотопы) и интенсивности латеральных связей между ними. Сущность модельных геохор примерно соответствует трем типам местности, выделяемым воронежской школой ландшафтоведения: террасовой, склоновой и междуречной недренированной.

Для описания структуры геохор используется понятийный аппарат и серия классификаций, которые в разные периоды разработаны в ландшафтоведении и смежных науках: эдафотопов [Погребняк, 1968], геотопов [Ласточкин, 2011], эколого-ценотических групп [Смирнов и др., 2006], ландшафтных рисунков [Викторов, 2006], факторально-динамических рядов [Крауклис, 1979], системообразующих потоков [Сысуев, 2020], ландшафтных границ [Гродзинский, 2014].

Морфометрические характеристики рельефа, необходимые для объяснения и иллюстрирования внутренней неоднородности геохор, рассчитаны в ГИС SAGA 7.4 по цифровой модели с разрешением 10 м на основе топографической карты масштабом 1 : 10 000. Рассчитаны топографический индекс влажности (*TWI*), который отражает градиент влагообеспеченности, и эрозионный индекс (*LS-factor*), который показывает условия интенсивности латеральных потоков, связывающих урочища.

Поскольку поставлена цель многоплановой характеристики геохор, не все из которых могут быть одновременно изображены на карте, чтобы не перегружать ее, для одного из двух вариантов карты в качестве подложки использован космический снимок компании CNES Airbus с портала Google Earth от 25 июня 2020 г. Снимок дает визуальный образ мозаичности и рисунка растительного покрова, ин-

дицирующего экологические градиенты, и адаптацию к ним хозяйственной деятельности.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Предлагаемое содержание структурных карт геосистем-геохор дополняет содержание карт с покомпонентными характеристиками элементов. В геоинформационной терминологии место структурной карты мы видим как слой, который надстраивается над слоем традиционной ландшафтной карты, показывающей геосистемы более низкого ранга. Иначе говоря, характеризуется структура, например, местности, а свойства составляющих ее урочищ описываются в подстилающем слое традиционным образом.

На структурных картах целесообразно отражать следующие характеристики геохор.

**Сложность.** Геосистема характеризуется в координатах «гомогенность / гетерогенность» с указанием на наличие или отсутствие доминирующих по площади элементов. Гетерогенность (в ландшафтно-экологическом понимании – как синоним мозаичности, не вкладывая генетического смысла) означает внутреннюю сложность, зависящую от количества индивидуальных пространственных элементов, количества и площадного соотношения их видов. Очевидно, что абсолютная гомогенность свойственна только фации, поэтому в данном контексте этот термин употребляется лишь как точка отсчета, не свойственная более крупным единицам. Целесообразно использовать принятое в ландшафтоведении деление природных территориальных комплексов (ПТК) на монодоминантные (с относительно простым внутренним устройством), бидоминантные (с примерно равным участием двух доминантных видов ПТК), полидоминантные (несколько равноправных доминантных видов ПТК) [Видина, 1973]. Одновременно с характеристикой сложности следует назвать главные элементы. Например: 1) бидоминантная местность лесотундровой террасы с урочищами бугров пучения и термокарстовых котловин; 2) монодоминантное урочище степного плато с фациями сурчин на фоне плоской поверхности с разнотравно-типчково-ковыльным сообществом. Сложность пространственной структуры уже довольно давно характеризуется количественными показателями – индексами разнообразия Шеннона, Симпсона, Маргалефа и др. [Пузаченко и др., 2002]. Поэтому можно в основу характеристики сложности положить градации индекса разнообразия, которые, разумеется, разрабатываются применительно к каждому конкретному региону. Как известно, при росте неравномерности распределения площадей, значение индекса разнообразия

убывает. Другой возможный способ характеристики сложности – тип статистического распределения площадей таксонов.

**Текстура (пространственный рисунок).** Первые классификации рисунков (как способов взаиморасположения фаций) применялись еще в начале 1970-х гг. [Милкина, 1970; Мамай, 1973]: различались, например, мозаичный, пятнистый, полосчатый, кулисный, поясной, древовидный типы расположения урочищ внутри местности. Наиболее подробная иерархическая классификация ландшафтных рисунков разработана А.С. Викторовым [2006]. Он выделил системы однородных, квази-однородных и неоднородных рисунков, в каждой из которых различаются классы диффузных, полосчатых и полигональных. Особенности рисунка определяются составом, формой, ориентировкой, взаиморасположением контуров [Викторов, 2006]. Главный смысл характеристики текстуры геохоры – индикация процесса, формирующего внутренние различия, и конкурентных (либо взаимодополняющих) отношений между элементами. Например, диффузный пятнистый рисунок бидоминантной озерно-аллювиальной равнины в криолитозоне может отражать парадинамические отношения бугров пучения и термокарстовых котловин (мерзлое ядро бугров подпитывается водой из котловин) и их «конкуренцию за пространство», так как термокарст постепенно разрушает урочище бугра, а бугор может «вырасти» в днище котловины.

**Положение на региональных экологических градиентах.** Указывается характеристика геохоры по отношению к главному экологическому фактору для почвенно-растительного покрова ландшафта (лимитирующему или дифференцирующему). Так, в таежной зоне таковым часто оказывается градиент дренированности. Тогда могут выделяться местности: 1) недренированные; 2) слабодренированные; 3) дренированные. В мерзлотных ландшафтах возможно различие местностей с глубоким (речная долина, песчаная терраса) и неглубоким залеганием мерзлоты (суглинистая терраса).

**Внутренние экологические градиенты.** Обычно существует пространственное варьирование значений одного ведущего фактора, определяющего обособление пространственных элементов. Например, в местности с неглубоким залеганием мерзлоты таковым окажется мощность сезонно-талого слоя. Тогда можно говорить о «криогенной дифференциации», причем дифференциация относится ко всем геокомпонентам. Если сопряженно с градиентом глубины мерзлоты меняется оглеение почв, мощность торфа, соотношение мезофитов и гигрофитов, то характеристика может быть двойной: «с криогенно-гидрогенной дифференциацией». Если

в качестве фактора дифференциации упоминается рельеф («топо-»), то в зависимости от второй составляющей можно получить представление о доминирующем механизме латеральных связей между пространственными элементами, в данном случае – о потоках воды, переносящих вещество от выпуклых форм к вогнутым. Так, если влажность почв меняется по мере изменения кривизны или уклона рельефа, то дифференциация – топогидрогенная. Фактически речь идет о преобладающих факторально-динамических рядах, классификация которых подробно разработана А.А. Крауклисом [1979]: субгидроморфный, сублитоморфный, субкриоморфный, субстагнозный, субпсамморфный и др. Список Крауклиса может быть расширен применительно к конкретным регионам. Во многих случаях фактором дифференциации может быть различие сукцессионных (серийных) состояний или степени антропогенной нарушенности [Викторов, Чикишев, 1990]. Указание на основной фактор внутренней дифференциации (например, «гигрогенный ряд» у А.А. Видиной [1973]) облегчает описание геохор с постепенными переходами между элементами – например, при постепенном нарастании мощности торфяного горизонта и сопряженных изменениях глубины залегания мерзлоты, видового состава и продуктивности фитоценоза. Отметим, что обычный способ ландшафтного картографирования подразумевает четкие границы, а это означает необходимость волевого решения о критерии состояния или наибольшего градиента некоторого геокомпонента-индикатора. Конкретный набор элементов факторально-динамического ряда может быть указан при характеристике более низкого ранга, например при перечислении фаций, составляющих урочище, причем порядок перечисления в легенде должен соответствовать положению на градиенте. Именно различие основных факторально-динамических рядов отличает одну геохору от другой. Тогда бугристая боровая терраса может характеризоваться топогидрогенной дифференциацией (варьированием влажности в зависимости от положения по отношению к вершине эолового бугра), смежная озерно-аллювиальная равнина с буграми пучения – топо-термокриогенной (варьированием мощности сезонно-талого слоя и влажности сопряженно с формами рельефа), а участок той же равнины с плоскобугристыми торфяниками – криогенной.

**Диапазон значений свойств, формирующих экологический градиент.** Указываются крайние члены факторально-динамического ряда. Подразумевается, что в абсолютном большинстве случаев присутствуют и промежуточные члены. А.А. Видина [1973] использовала для этой цели подробные таблицы с перечислением возможных вариантов

фаций внутри урочищ. Без громоздких таблиц характеристика в легенде может выглядеть так: при гидрогенном ряде элементов – «в диапазоне от сухих до мокрых гигротопов», «от свежих до сырых гигротопов»; при литогенном – «от сильнокаменистых до слабокаменистых», «от слабокаменистых до некаменистых»; при галогенном – «от незасоленных почв до солонцов», «от солонцов до солончаков»; при криогенном – «в диапазоне мощности сезонно-талого слоя от 20 до 120 см». Поскольку не для всех признаков разработана типология, тем более регионально-специфичная, то допустимо указание количественного диапазона.

**Интенсивность латеральных потоков.** Латеральные связи осуществляются потоками вещества (водные, воздушно-аэрозольные, биотические, литогенные и др.) и энергии (тепловые). В большинстве случаев, чем напряженнее экологический градиент, тем интенсивнее латеральный поток [Сысуев, 2020]. Под интенсивностью потока понимается количество вещества, проходящего через единицу площади в единицу времени; в данной статье термин употребляется только для обозначения качественных уровней интенсивности. Под напряженностью понимается разность потенциалов величины на единицу расстояния, т. е. градиент, порождающий поток. Так, интенсивность подземного стока воды и растворенных веществ может определяться коэффициентом увлажнения, коэффициентом стока, проницаемостью водоносного пласта, углом падения водоупорных пластов. Например, в боровой местности смена гигротопов в пределах эолового бугра от сухого (вершина) до мокрого (межбугровое понижение) на коротком расстоянии при большом градиенте высот свидетельствует о быстрой фильтрации в песках до водоупорных отложений. При господстве водных (сток воды и наносов) и литогенных (осыпи, лавины, оползны, солифлюкция) потоков их интенсивность зависит от расчлененности рельефа: чем больше перепады высот, тем сильнее латеральная связь. Кроме того, следует различать геохоры с водозастойным, периодически проточным и постоянно проточным режимом: в этом ряду интенсивность латеральных связей возрастает. В других случаях (распространение семян, метелевый перенос, эоловые процессы) интенсивность связей зависит от скорости ветра, которую, в свою очередь, можно ранжировать с учетом соседства форм рельефа. Так, разными величинами интенсивности латеральных аэрогенных связей характеризуются: зона затишья в котловине, выпуклая вершина холма, участок долины в зоне действия стоковых ледниковых ветров, «аэродинамическая труба» в каньоне. Сложнее ранжировать геосистемы по интенсивности биотических связей между их элементами, осуществляемых перемещениями живот-

ных и, соответственно, зоомасс, фитомасс, мортмасс, твердых частиц. Вероятно, в основу может быть положена контрастность свойств необходимых стаций и расстояния между ними, т. е. опять же напряженность градиента. Итак, предлагается включать в название геохоры характеристику интенсивности доминирующих латеральных связей: «с сильными водными и литогенными потоками» (между гребнями и оврагами), «со слабыми водными потоками» (между междуречными болотными и приболотными урочищами), «с сильными аэральными потоками» (между дюнами и котловинами выдувания) и т. п. Энергетические взаимодействия урочищ могут быть отражены через понятие тепловых потоков, обусловленных градиентом температур. Например, при переносе тепла от термокарстовых озер к буграм пучения, вызывающим обрушение их склонов, можно констатировать наличие «сильных тепловых потоков», а при отсутствии обрушения – «слабых потоков».

#### **Тенденция изменения сложности строения.**

При наличии информации или временного ряда наблюдений может быть указана характеристика развития пространственной структуры геохоры в категориях «стабильная», «усложняющаяся», «упрощающаяся». Основным критерий – наличие признаков сокращения или увеличения количества таксонов. Например, эрозионная местность может оказаться усложняющейся в связи с регулярным появлением новых оврагов или промоин, равнинная лесолуговая местность – упрощающейся вследствие постепенного зарастания луговых урочищ. Как предпосылку изменения сложности строения можно рассматривать изменение контрастности градиентов. Так, в геохоре степного плато можно констатировать тенденцию упрощения фациальной структуры на основании признаков разрушения сурчин и сближения состава их фитоценозов с фоновым.

**Резкость границ.** В зависимости от господствующего факторально-динамического ряда границы между пространственными элементами могут быть резкими, островными, полосными (синергетичными), размытыми (континуальными) [Викторов, Чикишев, 1990; Гродзинский, 2014]. Например, граница термокарстовой котловины и бугра пучения на озерно-аллювиальной равнине может быть всегда резкой, а между лесными фациями разной степени увлажнения на бугристой террасе – постепенными. Следует принимать во внимание, что резкость границы может оцениваться по-разному в зависимости от масштаба исследования. Кроме того, резкость границ может указывать на тенденцию усложнения или упрощения строения. Так, при отмирании покинутых сурчин фациальные границы из резких превращаются в постепенные.

**Устойчивость положения границ.** Если пространственная структура геохоры претерпевает постоянные изменения (как правило, при нестабильном рельефе), то для целей эволюционно-динамического или прикладного исследования полезна такая информация, как «с нестабильными / стабильными внутренними границами». Можно выделять агрессивные геосистемы по признаку экспансии. Если очевидна тенденция развития структуры, то ее описание даст информацию о латеральных отношениях элементов: «с ростом оврагов за счет террасы», «с ростом термокарстовых котловин за счет бугров» и т. п.

Представленная концепция структурной карты дает возможность раскрыть закономерности формирования гетерогенности в геосистемах. Картографическое отображение степени гетерогенности предоставляет возможность корректной адаптации землепользования и природоохранных мероприятий к ландшафтной структуре территории.

Приведем примеры реализации предложенной концепции структурных карт геосистем на примере части среднетаежного ландшафта в бассейне р. Заячьей. На рис. 1А показаны границы и текстовые характеристики строения и внутренних латеральных связей трех модельных геохор. Рис. 1Б представляет упрощенную картографическую характеристику внутренней структуры геохор, определяемой двумя главными экологическими градиентами на данной территории – трофности и влажности.

Интерпретация структурной карты для оценки условий хозяйственной деятельности может выглядеть следующим образом. Рассмотрим геохору 2 (см. рис. 1). Ее бидоминантность при нестабильности границ означает ограниченные размеры полевых участков за пределами балок и возможность постепенного сокращения их площади. Древовидный рисунок потребует искривления границ угдий, что повышает себестоимость обработки земли или создает труднообрабатываемые клинообразные выступы приводораздельных поверхностей. Соседство полей с балками благоприятствует латеральному оттоку холодного воздуха в понижения, что снижает риск заморозков. Большое количество балок в пределах зоны избыточного увлажнения улучшает дренированность межбалочных участков склонов. Наиболее пригодные для земледелия свежие гигротопы, очевидно, приурочены к дренированным выпуклым участкам с высокой обеспеченностью элементами минерального питания (см. рис. 1Б; рис. 2А, светлый тон). Напряженность водных потоков на покатых (до 8–10°) выпуклых склонах указывает на риски плоскостной и линейной эрозии в случае распашки (см. рис. 2Б, темно-серый тон), а также на возможность быстрого переноса загрязняющих веществ и наносов по балкам к водоемам.

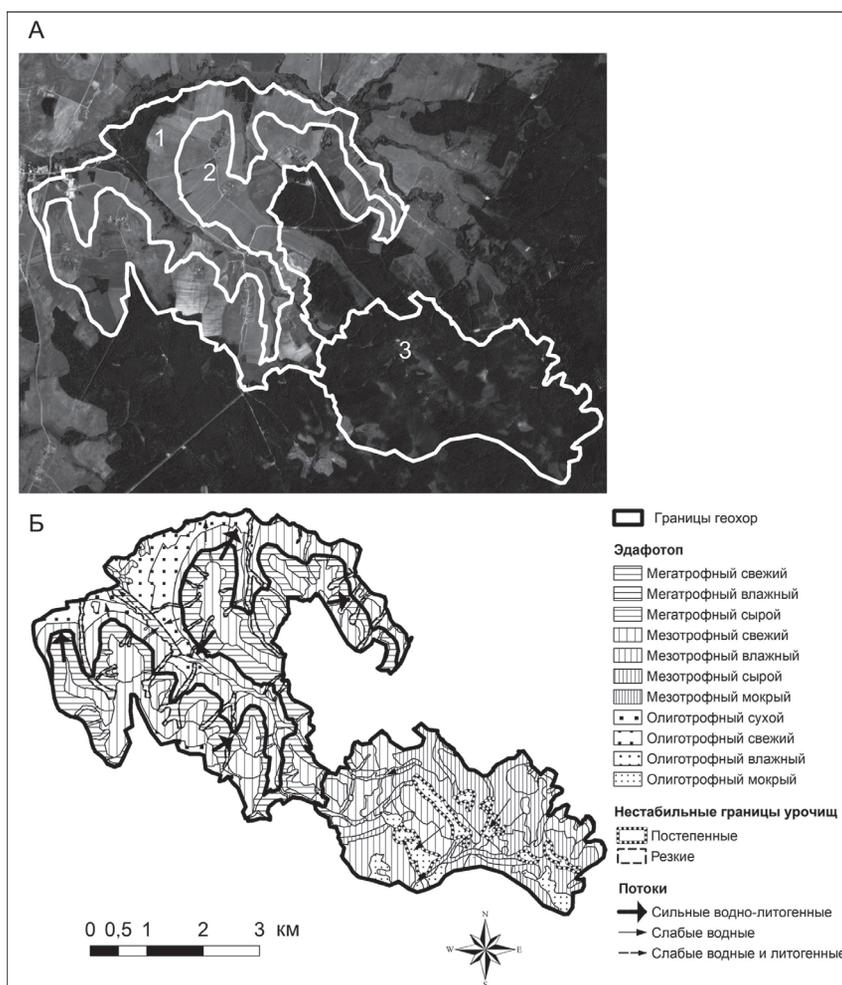


Рис. 1. Варианты структурной карты геосистем в пределах среднетаежного ландшафта структурно-моренно-эрозионной равнины с сочетанием лесных, болотных, луговых и пахотных урочищ на юге Архангельской области:

А – с текстовым описанием структуры. Модельные геохоры: 1 – монодоминантная геохора распаханых террас с субдоминантными остаточными борями и лугово-лесными слабоврезанными ложинами редкополосчатого-массивной текстуры с тополитогенной и топогидрогенной дифференциацией в диапазоне от сухих олиготрофных до сырых мегатрофных эдафотопов, со слабыми литогенными и водными потоками с резкими нестабильными границами, с ростом ложинных урочищ за счет террасовых; 2 – бидоминантная геохора покатых коренных склонов с распахаными выпуклыми поверхностями и лугово-лесными балками древовидной текстуры, с тополито-гидрогенной дифференциацией в диапазоне от свежих до сырых мегатрофных эдафотопов, с сильными водными и литогенными потоками, с резкими нестабильными внутренними границами; 3 – бидоминантная геохора ступенчатого междуречья с таежными и болотными урочищами, параллельно-прямолинейно-кластерной текстуры, с прогрессирующей гидрогенной и сукцессионной дифференциацией в диапазоне от свежих до мокрых гиротопов, со слабыми водными потоками, с постепенными нестабильными внутренними границами, с ростом болотных урочищ за счет лесных. (Основа – космический снимок CNES Airbus, дата съемки 25.06.2020, источник – Google Earth); Б – с отображением основных особенностей внутренней структуры модельных геохор через ключевые свойства урочищ, отражающих факторы дифференциации, стабильность границ урочищ, направления и интенсивность латеральных потоков (показаны выборочно). (Основа – ландшафтная карта территории [Хорошев, 2005])

Fig. 1. Options of a structural map of geosystems for the middle taiga landscape of a structural-moraine-erosion plain with a combination of forest, mire, meadow and arable tracts in the south of the Arkhangelsk region: A – with a text description of the structure. Model geochores: 1 – monodominant geochore of plowed terraces with subdominant remnant pine forests and meadow-forest weakly incised hollows of sparsely banded-massive texture, with topo-lithogenic and topo-hydrogenic differentiation ranging from dry oligotrophic to wet megatrophic edaphotopes, with weak lithogenic and water flows, with sharp unstable boundaries, with the growth of hollow tracts at the expense of terrace ones; 2 – bidominant geochore of gentle valley slopes with plowed convex surfaces and forest-meadow flat-bottomed valleys with dendritic texture, with topo-litho-hydrogenic differentiation ranging from fresh to wet megatrophic edaphotopes, with strong water and lithogenic flows, with sharp unstable internal boundaries; 3 – bidominant geochore of a stepped interfluvium with taiga and mire tracts, parallel-rectilinear-cluster texture, with progressing hydrogenic and successional differentiation in the range from fresh to wet hyrotopes, with weak water flows, with gradual unstable internal boundaries, with the growth of swamp tracts at the expense of forest ones. (The basis is a CNES Airbus satellite image, shooting date 06.25.2020, source – Google Earth); Б – displaying the main features of the internal structure of model geochores through the key properties of tracts, reflecting differentiation factors, stability of tract boundaries, directions and intensity of lateral flows (shown selectively). (The basis is a landscape map of the territory [Khoroshev, 2005])

В связи с этим способы землепользования, способствующие закреплению почв (сенокосение, выпас, многолетние насаждения), могут оказаться предпочтительными, либо потребуются дополнительные затраты на мероприятия, предотвращающие эрозию на пашнях и рассеяние загрязнителей. Литогенная дифференциация на мезотрофные и мегатрофные местообитания (см. рис. 1Б), связанная с перегибами рельефа, эффектами эрозии и разной близостью коренных пород, может создавать условия для неоднородности почвенного плодородия в пределах полевых участков (негативный эффект для земледелия) и большого разнообразия местообитаний в пределах балок (позитивный эффект для биоразнообразия). В случае выбора природоохранного землепользования широкий диапазон гигротопов (см. рис. 1Б) при богатстве почв укажет на повышенное биоразнообразие. В случае распашки или строительства на покатых склонах высок риск поступления нежелательных растворенных и твердых веществ в экологически ценные местообитания днищ балок. Сочетание лесных и луговых сообществ в балках с высокой вероятностью свидетельствует о возможности быстрых изменений фациальной структуры за счет зарастания лугов древесной растительностью при условии отсутствия пастбищных или сенокосных нагрузок. Наличие лесных и луговых местообитаний в балках может создавать потоки животных на полевые участки с эффектами для сельского хозяйства: как позитивным (например, регулирование численности грызунов лисицами), так и с негативным (например, выедание урожая кабанами). Луговые и лесные фитоценозы в балках способствуют осаждению и биопоглощению части поллютантов и наночастиц.

Таким образом, упрощая эту информацию для оценки условий землепользования в пределах геоохоры 2, можно констатировать следующее. Сложный рельеф не вполне благоприятен для земледелия и строительства, хотя и создает благоприятные условия дренированности. Водные и механические потоки могут создавать риски деградации почв и загрязнения водоемов. Воздушные потоки снижают риски заморозков для земледелия. Биотические потоки могут оказать как позитивное, так и негативное воздействие на земледелие. Естественный почвенно-растительный покров в балках выполняет функции экологического каркаса.

Два варианта структурной карты (см. рис. 1) представляют два варианта компромисса между полнотой характеристики и наглядностью. В первом случае (см. рис. 1А) дается полная текстовая характеристика, которая может быть рекомендована для мелкомасштабных карт масштаба 1 : 100 000 или мельче, где нет возможности отразить индивидуальные урочища, подурочища и фации. Кос-

моснимок-подложка позволяет увидеть контрасты растительного покрова и его рисунок. Во втором случае (см. рис. 2А) упрощенно показывается реальное внутреннее содержание геоохор с точки зрения экологических градиентов, потоков и характера границ между урочищами. Однако во избежание перегруженности такой крупномасштабной карты приходится жертвовать непосредственным отображением ряда характеристик. Часть их считывается визуально: например, рисунок урочищ. Другая группа может быть вынесена в текстовую легенду. Возможны и другие варианты карты: например, с псевдоформулами, состоящими из буквенно-цифровых обозначений, отнесенных к каждой геоохоре (как часто делается на ландшафтно-геохимических, гидрогеологических, лесных и других картах).

В предлагаемом содержании структурной карты геосистем сделана попытка интегрировать идеи нижеперечисленных концепций и методов, разработанных в последние десятилетия в ландшафтоведении и ландшафтной экологии.

1. Ландшафтно-индикационное картографирование [Викторов, Чикишев, 1990], опирающееся на представление о ландшафтно-генетических рядах, и информативность показателей доминирования, числа элементов, степени контрастности, размеров площадей элементов, их повторяемости и взаиморасположения для характеристики структуры, определения факторов дифференциации и тенденций развития ландшафта.

2. Геосистемное картографирование [Коновалова, 2010], в котором требуется не только описание генетических связей между пространственными элементами, но и латеральных связей между ними, а также эмерджентных эффектов. Современные варианты анализа ландшафтной структуры представлены в виде количественных показателей разнообразия [Борисова, 2016; Фетисов, 2018], оценки корреляций между количественными показателями структуры [Дорофеев, 2017], количественных мер сходства ландшафтной структуры [Zolotov, Chernykh, 2020].

3. Ландшафтно-интерпретационное картографирование [Ландшафтно-интерпретационное..., 2005; Miklos et al., 2019], предлагающее методы использования ландшафтных карт для создания карт специального тематического содержания, прогнозирования. Данная разработка рассматривается как прототип для развития формализованных алгоритмов адаптации ландшафтной информации к целям территориального планирования.

4. Математическая морфология ландшафта, предлагающая канонические модели общих правил формирования ландшафтных рисунков, их саморазвития, прогноз процессов на основе этих моделей [Викторов, 2006].

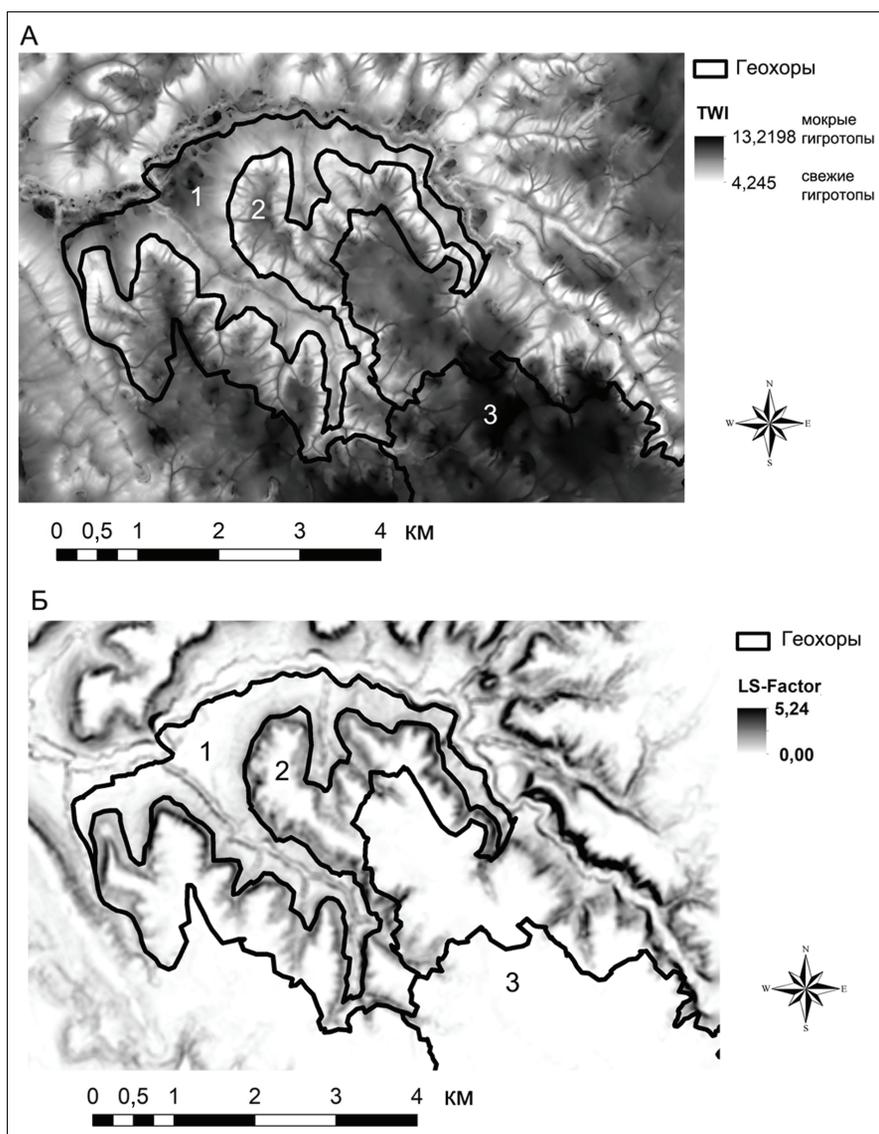


Рис. 2. Топографический индекс влажности TWI (А) и эрозионный индекс LS-Factor (Б) в модельных геоохорах: 1, 2, 3 – номера геоохор (описание см. рис. 1)

Fig. 2. Topographic wetness index TWI (A) and erosion index LS-Factor (Б) in model geochores; 1, 2, 3 – geochore numbers (for description see Fig. 1)

5. Полиструктурность ландшафта, отраженная в виде серии карт, отображающих разные типы структур на одной и той же территории [Солнцев и др., 2006; Гродзинский, 2014].

6. Ландшафт как корреляционная, а не жестко детерминированная, динамическая система с преобладанием вероятностных связей, с принципиально важной ролью положительных обратных связей в формировании дискретных границ [Пузаченко, 2017; Litaor et al., 2002; Makhdoum, 2008].

7. Ландшафтно-экологическое картографирование, формализованное на основе методов геоморфометрии и классификации многоканальных космических изображений [Сысуев, 2020; Dorner et al., 2002; Hoeschtetter et al., 2008; Хромых, Хромых, 2011; Синюткина, 2017].

8. Ландшафтно-динамический анализ [Исаченко, 2014], основанный на интеграции понятий «местоположение» и «состояние».

Предложенная концепция структурных карт геосистем, относящихся к семейству ландшафтных карт, направлена на усиление системного понимания гетерогенных пространств, в том числе при территориальном планировании. Такие карты будут показывать условия отбора типов и технологий землепользования, чувствительных к размерам угодий и латеральным влияниям соседних угодий. Конечно, содержание структурных карт ориентировано на специалиста-природоведа и для использования в практическом планировании потребует специального «перевода», пример которого приведен выше. С точки зрения экономики природопользования эту

информацию можно интерпретировать через понятия «надежность» (способность территории достаточно долго выполнять социально-экономическую функцию в определенных границах) и «себестоимость». Для этого важно знать: как велики могут быть предельные размеры земельных участков, стабильны ли эти размеры, есть ли негативное или позитивное влияние со стороны соседних участков, возможен ли какой-либо ущерб от предполагаемой деятельности для соседних землепользователей или экологически ценных территорий.

В данной статье предложена лишь общая программа содержания структурных карт геосистем-геохор. Структурные карты являются не альтернативой, а дополнением к традиционным ландшафтным картам, ориентированным на отражение взаимообусловленности геокомпонентов. В дальнейшем потребуется разработка более строгой терминологии и регионально-специфичных критериев для идентификации значимых структурных характеристик. В более отдаленном будущем такие карты должны будут отражать ареалы возникновения тех или иных эмерджентных

эффектов, возникающих в результате взаимодействий пространственных элементов геохор.

## ВЫВОДЫ

Структурные карты геосистем-геохор опираются на информацию о наборе факторально-динамических рядов, характере и интенсивности латеральных потоков и обусловленной ими текстуре.

Главный эффект пользования структурными картами – получение представления о степени мозаичности пространства, устойчивости свойств компонентов и пространственной структуры, возможностях и лимитирующих факторах хозяйственной деятельности.

Практическая значимость структурных карт заключается в предоставлении информации для выбора оптимальных угодий с учетом лимитирующих факторов, определения приемлемых пространственных характеристик угодий и оценки возможных латеральных связей со смежными угодьями, в том числе вызывающих негативные экологические эффекты.

**Благодарности.** Исследование выполнено в рамках Госзадания географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова № 121051300176-1 «Факторы и процессы пространственно-временной организации природных и антропогенных ландшафтов».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борисова И.Г.* Ландшафтное разнообразие Амурской области // География и природные ресурсы. 2016. № 2. С. 125–131.
- Видина А.А.* Типологическая классификация морфологических частей ландшафтов на равнинах // Ландшафтный сборник / под ред. Н.А. Солнцева. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1973. С. 50–101.
- Викторов А.С.* Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006. 252 с.
- Викторов С.В., Чикишев А.Г.* Ландшафтная индикация и ее практическое применение. М.: Изд-во МГУ, 1990. 200 с.
- Гродзинський М.Д.* Ландшафтна екологія. Киев: Знання, 2014. 550 с.
- Дорофеев А.А.* Количественные характеристики ландшафтов Тверской области // Ландшафтоведение: теория, методы, ландшафтно-экологическое обеспечение природопользования и устойчивого развития: материалы XII Международной ландшафтной конференции. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2017. Т. 1. С. 180–184.
- Исаченко Г.А.* Концепция многолетней динамики ландшафтов и вызовы времени // Вопросы географии. Т. 138: Горизонты ландшафтоведения. М.: Кодекс, 2014. С. 215–232.
- Коновалова Т.И.* Геосистемное картографирование. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2010. 186 с.
- Крауклис А.А.* Проблемы экспериментального ландшафтоведения. Новосибирск: Наука, 1979. 232 с.
- Ландшафтно-интерпретационное картографирование / отв. ред. А.К. Черкашин. Новосибирск: Наука, 2005. 424 с.
- Ласточкин А.Н.* Общая теория геосистем. СПб.: Лемма, 2011. 980 с.
- Мамай И.И.* О влиянии закономерностей морфологического строения ландшафтов на методику полевых ландшафтных исследований // Ландшафтный сборник / под ред. Н.А. Солнцева. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1973. С. 110–116.
- Милкина Л.И.* Типы фациальной структуры урочищ в карпатских ландшафтах // Ландшафтный сборник / под ред. Н.А. Солнцева. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. С. 189–196.
- Погребняк П.С.* Общее лесоводство. М.: Колос, 1968. 440 с.
- Пузаченко Ю.Г.* Биогеоценоз как сложная динамическая система // Биогеоценология в XXI веке: идеи и технологии. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2017. С. 11–114.
- Пузаченко Ю.Г., Дьяконов К.Н., Алещенко Г.М.* Разнообразие ландшафта и методы его измерения // География и мониторинг биоразнообразия. Экоцентр МГУ, 2002. С. 76–177.
- Садовский В.Н.* Основания общей теории систем. М.: Наука, 1974. 279 с.
- Синюткина А.А.* Геоморфологические условия как фактор формирования пространственной дифференциации заболоченных территорий (на примере бассейна реки

- Васюган) // *Ландшафтоведение: теория, методы, ландшафтно-экологическое обеспечение природопользования и устойчивого развития. Материалы XII Международной ландшафтной конференции*. Тюмень: Изд-во Тюменского гос. ун-та, 2017. Т. 1. С. 114–118.
- Смирнов В.Э., Ханина Л.Г., Бобровский М.В. Обоснование системы эколого-ценотических групп видов растений лесной зоны Европейской России на основе экологических шкал, геоботанических описаний и статистического анализа // *Бюлл. МОИП, отд. биол.* 2006. Т. 111. Вып. 2. С. 36–47.
- Солнцев В.Н., Рыжков О.В., Трегубов О.В. и др. Использование GPS- и ГИС-технологий для изучения природных комплексов особо охраняемых природных территорий (на примере ландшафтной структуры Воронежского Биосферного заповедника). Тула: Гриф и Ко, 2006. 216 с.
- Солодянкина С.В., Кошкарев А.В., Ганзей К.С. и др. Некоторые итоги и перспективы ландшафтного картографирования России // *География и природные ресурсы*. 2021. Т. 42. № 3. С. 23–36. DOI: 10.15372/GIPR20210303.
- Сочава В.Б. Определение некоторых понятий и терминов физической географии // *Докл. Ин-та геогр. Сибири и Дальнего Востока*. 1963. № 3. С. 50–59.
- Сысуев В.В. Введение в физико-математическую теорию геосистем. М.: ЛЕНАНД, 2020. 600 с.
- Фетисов Д.М. Ландшафтное разнообразие Еврейской автономной области // *Региональные проблемы*. 2018. Т. 21. № 1. С. 46–56.
- Хромых О.В., Хромых В.В. Ландшафтный анализ Нижнего Притомья на основе ГИС: естественная динамика долинных геосистем и их изменения в результате антропогенного воздействия. Томск: Изд-во НТЛ, 2011. 160 с.
- Черкашин А.К. Полисистемное картографирование // *Географические исследования в Сибири*. Т. 4: Полисистемное тематическое картографирование. Новосибирск: Гео, 2007. С. 96–132.
- Dorner B., Lertzman K., Fall J. Landscape pattern in topographically complex landscapes: issues and techniques for analysis, *Landscape Ecology*, vol. 17, 2002, p. 729–743.
- Hoechstetter S., Walz U., Dang L.H., Thinh N.X. Effects of topography and surface roughness in analyses of landscape structure – A proposal to modify the existing set of landscape metrics, *Landscape Online*, 2008, vol. 3, p. 1–14, DOI: 10.3097/LO.200803.
- Litaor M.I., Seastedt T.R., Walker D.A. Spatial analysis of selected soil attributes across an alpine topographic/snow gradient, *Landscape Ecology*, vol. 17, 2002, p. 71–85.
- Makhdoum M.F. Landscape ecology or environmental studies (Land Ecology) (European versus Anglo-Saxon schools of thought), *J. Int. Environmental Application & Science*, vol. 3, 2008, no. 3, p. 147–160.
- Miklos L., Kočická E., Izakovicova Z. et al. *Landscape as a geosystem*, Springer, 2019, 161 p., DOI: 10.1007/978-3-319-94024-3.
- Zolotov D.V., Chernykh D.V. Comparison of landscape and floristic diversity in plain catchments at the level of elementary regions, A.V. Khoroshev, K.N. Dyakonov (eds.), *Landscape patterns in a range of spatio-temporal scales*, Springer Nature Switzerland AG, Cham, 2020, p. 191–206.
- Электронный ресурс*  
Хорошев А.В. Ландшафтная структура бассейна р. Заячья (Важско-Северодвинское междуречье, Архангельская область). М., 2005. Деп. ВИНТИ 27.09.2005 № 1253-B2005. 158 с. URL: <https://istina.msu.ru/publications/book/7864329/> (дата обращения 19.06.2023).

Поступила в редакцию 19.10.2023  
После доработки 14.02.2024  
Принята к публикации 24.04.2024

## THE CONCEPT OF A STRUCTURAL MAP OF GEOSYSTEMS

A.V. Khoroshev

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Science, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: avkh1970@yandex.ru*

Most traditional landscape maps are still focused on reflecting regular combinations of geocomponents depending on the genesis of the geosystem and the position on the gradients of environmental conditions. But they contain little information about the nature of relationships between the spatial elements of geosystems. The article proposes a new concept of geosystem maps, which substantiate the development of methods for reflecting the internal structure of geosystems as both a cause and a result of lateral connections between spatial elements. Thus a concept of a structural map of geosystems is suggested. The concept is aimed at strengthening the systemic understanding of heterogeneous spaces. We propose a program of maps belonging to the landscape family, but providing an explanation of the lateral relationships between the spatial elements of a geochore, the resulting texture and the ability of a spatial structure to self-develop. The geochores are characterized in terms of the complexity of internal structure, the position on regional ecological gradients, the set of internal ecological gradients, the range of the ecological gradient values, the types and intensity of lateral flows, the texture, the tendency of changes in the complexity of the structure, the presence of sharp and gradual boundaries, and the stability of their position. A structural map is a GIS layer that is built over a traditional landscape

map layer showing lower-ranking geosystems. The main purpose of using structural maps is to get an idea of the degree of space mosaic, the possibilities and limiting factors of economic activity, as well as the stability of the properties of components and the spatial structure. The maps will show the conditions for choosing the land use types and technologies that are sensitive to the size of land parcel and lateral influences of neighboring lands. From the viewpoint of a land user, this information facilitates the assessment of the reliability of land in the performance of socio-economic functions and cost. We use a case study in the Arkhangelsk region to characterize the geochore structure. Structural map of a geosystem is not an alternative, but an addition to traditional landscape maps. In the future, more explicit regional-specific criteria will be needed to identify significant structural characteristics.

**Keywords:** geosystem, geochore, structure, gradient, lateral connection, texture, complexity, geosystem boundaries

**Acknowledgments.** The study was carried out under the State task of the MSU Faculty of Geography 121051300176-1 Factors and processes of the spatio-temporal organization of natural and anthropogenic landscapes.

## REFERENCES

- Borisova I.G. Landshaftnoe raznoobrazie Amurskoj oblasti [Landscape diversity of the Amur region], *Geografija i prirodnye resursy*, 2016, no. 2, p. 125–131. (In Russian)
- Cherkashin A.K. [Polysystem mapping], *Geograficheskie issledovanija v Sibiri*, vol. 4, Polisistemnoe tematicheskoe kartografirovanie [Geographical research in Siberia, vol. 4, Polysystem thematic mapping], Novosibirsk, Geo Publ., 2007, p. 96–132. (In Russian)
- Dorner B., Lertzman K., Fall J. Landscape pattern in topographically complex landscapes: issues and techniques for analysis, *Landscape Ecology*, vol. 17, 2002, p. 729–743.
- Dorofeev A.A. [Quantitative characteristics of the landscapes of the Tver region], *Landshaftovedenie: teorija, metody, landshaftno-jekologicheskoe obespechenie prirodopol'zovanija i ustojchivogo razvitija: materialy XII Mezhdunarodnoj landshaftnoj konferencii* [Landscape science: theory, methods, landscape-ecological support of nature management and sustainable development: materials of the XII International Landscape Conference], Tjumen', Tjumen University Publ., 2017, vol. 1, p. 180–184. (In Russian)
- Fetisov D.M. Landshaftnoe raznoobrazie Evrejskoj avtonomnoj oblasti [Landscape diversity of the Jewish Autonomous Region], *Regional'nye problemy*, 2018, vol. 21, no. 1, p. 46–56. (In Russian)
- Grodzins'kij M.D. *Landshaftna ekologija* [Landscape ecology], Kyiv, Znannja Publ., 2014, 550 p. (In Ukrainian)
- Hoehstetter S., Walz U., Dang L.H., Thinh N.X. Effects of topography and surface roughness in analyses of landscape structure – A proposal to modify the existing set of landscape metrics, *Landscape Online*, vol. 3, 2008, p. 1–14, DOI: 10.3097/LO.200803.
- Isachenko G.A. [The concept of long-term dynamics of landscapes and the challenges of time], *Voprosy geografii, t. 138, Gorizonty landshaftovedenija* [Issues in geography, vol. 138, Horizons of landscape science], Moscow, Kodeks Publ., 2014, p. 215–232. (In Russian)
- Khromyh O.V., Hromyh V.V. *Landshaftnyj analiz Nizhnego Pritom'ja na osnove GIS: estestvennaja dinamika dolinyh geosistem i ih izmenenija v rezul'tate antropogennogo vozdejstvija* [Landscape analysis of the Lower Tom region based on GIS: natural dynamics of valley geosystems and their changes as a result of anthropogenic impact], Tomsk, Tomsk University Publ., 2011, 160 p. (In Russian)
- Konovalova T.I. *Geosistemnoe kartografirovanie* [Geosystem mapping], Novosibirsk, Geo Publ., 2010, 186 p. (In Russian)
- Krauklis A.A. *Problemy jeksperimental'nogo landshaftovedenija* [Problems of experimental landscape science], Novosibirsk, Nauka Publ., 1979, 232 p. (In Russian)
- Landshaftno-interpretacionnoe kartografirovanie* [Landscape interpretation mapping], A.K. Cherkashin (ed.), Novosibirsk, Nauka Publ., 2005, 424 p. (In Russian)
- Lastochkin A.N. *Obshhaja teorija geosistem* [General theory of geosystems], Sankt-Peterburg, Lemma Publ., 2011, 980 p. (In Russian)
- Litaor M.I., Seastedt T.R., Walker D.A. Spatial analysis of selected soil attributes across an alpine topographic/snow gradient, *Landscape Ecology*, vol. 17, 2002, p. 71–85.
- Makhdoum M.F. Landscape ecology or environmental studies (Land Ecology) (European versus Anglo-Saxon schools of thought), *J. Int. Environmental Application & Science*, vol. 3, 2008, no. 3, p. 147–160.
- Mamaj I.I. [On the influence of the regularities of the morphological structure of landscapes on the methodology of field landscape research], *Landshaftnyj sbornik* [Landscape collection], N.A. Solntsev (ed.), Moscow, Moscow University Publ., 1973, p. 110–116. (In Russian)
- Miklos L., Kočická E., Izakovicova Z. et al. *Landscape as a geosystem*, Springer, 2019, 161 p., DOI:10.1007/978-3-319-94024-3.
- Milkina L.I. [Facies structure types of tracts in the Carpathian landscapes], *Landshaftnyj sbornik* [Landscape collection], N.A. Solncev (ed.), Moscow, Moscow University Publ., 1973, p. 189–196. (In Russian)
- Pogrebnyak P.S. *Obshhee lesovodstvo* [General forestry], Moscow, Kolos Publ., 1968, 440 p. (In Russian)
- Puzachenko Ju.G. [Biogeocenosis as a complex dynamic system], *Biogeocenologija v XXI veke: idei i tehnologii* [Biogeocenology in the 21st century: ideas and technologies], Moscow, KMK Publ., 2017, p. 11–114. (In Russian)
- Puzachenko Ju.G., D'jakonov K.N., Aleshchenko G.M. [Landscape diversity and how to measure it], *Geografija i monitoring bioraznoobrazija* [Geography and biodiversity monitoring], Moscow, Jekocentr MGU Publ., 2002, p. 76–177. (In Russian)
- Sadovskij V.N. *Osnovanija obshhej teorii sistem* [Foundations of general systems theory], Moscow, Nauka Publ., 1974, 279 p. (In Russian)

- Sinjutkina A.A. [Geomorphologic conditions as a factor of spatial differentiation of wetlands (case study of the Vasyugan River basin)], *Landshaftovedenie: teorija, metody, landshaftno-jekologicheskoe obespechenie prirodopol'zovanija i ustojchivogo razvitija*, Materialy XII Mezhdunarodnoj landshaftnoj konferencii [Landscape science: theory, methods, landscape-ecological support of nature management and sustainable development, materials of the XII International Landscape Conference], Tjumen', Tjumen University Publ., 2017, vol. 1, p. 114–118. (In Russian)
- Smirnov V.Je., Hanina L.G., Bobrovskij M.V. Obosnovanie sistemy jekologo-cenoticheskikh grupp vidov rastenij lesnoj zony Evropejskoj Rossii na osnove jekologicheskikh shkal, geobotanicheskikh opisanij i statisticheskogo analiza [Justification of the system of ecological-coenotic groups of plant species in the forest zone of European Russia on the basis of ecological scales, geobotanic descriptions and statistical analysis], *Bjull. MOIP, otd. biol.*, vol. 111, no. 2, 2006, p. 36–47. (In Russian)
- Sochava V.B. Opredelenie nekotoryh ponjatij i terminov fizicheskoj geografii [Definition of some concepts and terms of physical geography], *Dokl. In-ta geogr. Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Report Institute of Geography Siberia and the Far East], 1963, no. 3, p. 50–59. (In Russian)
- Solntsev V.N., Ryzhkov O.V., Tregubov O.V. et al. *Ispol'zovanie GPS i GIS tehnologij dlja izuchenija prirodnyh kompleksov osobo ohranjaemyh prirodnyh teritorij (na primere landshaftnoj struktury Voronezhskogo Biosfernogo zapovednika)* [Using GPS and GIS technologies to study natural complexes of specially protected natural areas (case study of the landscape structure of the Voronezh Biosphere Reserve)], Tula, Grif i Ko Publ., 2006, 216 p. (In Russian)
- Solodyankina S.V., Koshkarev A.V., Ganzei K.S. et al. Some results and prospects of landscape mapping of Russia, *Geography and Natural Resources*, 2021, vol. 42, no. 3, p. 211–224, DOI: 10.1134/S1875372821030112.
- Sysuev V.V. *Vvedenie v fiziko-matematicheskiju teoriju geosystem* [Introduction to the physical and mathematical theory of geosystems], Moscow, LENAND Publ., 2020, 600 p. (In Russian)
- Vidina A.A. [Typological classification of morphological parts of landscapes on the plains], *Landshaftnyj sbornik* [Landscape collection], N.A. Solntsev (ed.), Moscow, Moscow University Publ., 1973, p. 50–101. (In Russian)
- Viktorov A.S. *Osnovnye problemy matematicheskoi morfologii landshafta* [Main problems of mathematical landscape morphology], Moscow, Nauka Publ., 2006, 252 p. (In Russian)
- Viktorov S.V., Chikishev A.G. *Landshaftnaya indikatsiya i ee prakticheskoe primenenie* [Landscape indication and its application in practice], Moscow, MSU Publ., 1990, 200 p. (In Russian)
- Zolotov D.V., Chernykh D.V. Comparison of landscape and floristic diversity in plain catchments at the level of elementary regions. *Landscape patterns in a range of spatio-temporal scales*, A.V. Khoroshev, K.N. Dyakonov (eds.), Cham, Springer Nature Switzerland AG, 2020, p. 191–206.
- Web source*  
Khoroshev A.V. *Landshaftnaja struktura bassejna r.Zajach'ja (Vazhsko-Severodvinskoe mezhdurech'e, Arhangel'skaja oblast')* [Landscape structure of the Zayachya River basin (Vazhsko-Severodvinsk interfluve, Arkhangelsk region)], Moscow, VINITI 27.09.2005 no. 1253-V2005, 2005, 158 p., URL: <https://istina.msu.ru/publications/book/7864329/>. (In Russian)

Received 19.10.2023

Revised 14.02.2024

Accepted 24.04.2024

УДК 551.35

## ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ БУХТ СЕВАСТОПОЛЬСКОГО РЕГИОНА

Е.А. Котельянец<sup>1</sup>, Е.Е. Совга<sup>2</sup>, С.К. Коновалов<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup> Морской гидрофизический институт РАН

<sup>1</sup> Отдел прибрежных исследований, мл. науч. сотр.; e-mail: ekotelyanets@mhi-ras.ru

<sup>2</sup> Отдел прибрежных исследований, ст. науч. сотр., д-р геогр. наук; e-mail: esovga@mhi-ras.ru

<sup>3</sup> Директор МГИ, чл.-корр. РАН, д-р геогр. наук; e-mail: sergey\_konovlov@yahoo.com

В работе представлены результаты исследований особенностей пространственного распределения тяжелых металлов (Zn, Cu, Ni, Cr, Sr, Co, Fe, Mn) в донных отложениях бухт Севастопольского региона. Проанализированы данные, полученные в ходе экспедиционных исследований с 2003 по 2018 г. Рассматриваются особенности пространственного распределения и накопления тяжелых металлов в донных отложениях бухт Севастопольской, Казачьей, Балаклавской. Получены корреляционные зависимости между их содержанием и физико-химическими характеристиками донных отложений исследуемых акваторий (содержание  $C_{\text{орг}}$ ,  $\text{CaCO}_3$ , фракционный состав).

Определены металлы, для которых наблюдается равенство коэффициентов корреляции как с содержанием  $C_{\text{орг}}$  так и с содержанием илистой фракции. Для донных отложений Севастопольской бухты это Fe ( $r = 0,7$ ) и Ni ( $r = 0,6$ ), для Казачьей бухты – Fe ( $r = 0,6$ ) и Cu ( $r = 0,7$ ), а для Балаклавской – только Ni ( $r = 0,8$ ). Установлена высокая корреляционная связь Sr с содержанием  $\text{CaCO}_3$  ( $r = 0,8$ ) для донных отложений всех исследуемых акваторий.

Показано, что пространственное распределение тяжелых металлов определяется физико-химическими характеристиками донных отложений, что подтверждается величиной корреляционных связей по содержанию в них мелкодисперсной фракции и органического углерода, а затрудненный водообмен с открытым морем способствует их накоплению до максимальных значений.

**Ключевые слова:** физико-химические характеристики, Черное море, прибрежные акватории

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.6

### ВВЕДЕНИЕ

Прибрежные акватории Крыма играют важную роль в экономическом развитии Азово-Черноморского региона за счет интенсивного использования их биологического, минерального, рекреационного и транспортного потенциалов, что в последние годы стало причиной значительного увеличения антропогенной нагрузки. Донные отложения прибрежных акваторий за счет их способности аккумулировать загрязнения различной природы, поступающие в водоем на протяжении продолжительного периода, являются одним из наиболее информативных объектов изучения при оценке уровня антропогенной нагрузки в водных экосистемах.

Севастопольская бухта расположена на юго-западной оконечности Крымского полуострова ( $44^{\circ}36'$  с. ш.,  $33^{\circ}33'$  в. д.) и представляет собой полузамкнутую акваторию эстуарного типа с затрудненным водообменом с открытым морем. Ось бухты

ориентирована примерно в широтном направлении с востока на запад. Бухта относится к числу морских акваторий, которые подвержены постоянному техногенному и антропогенному воздействию. По берегам бухты расположена историческая часть города Севастополя и многочисленные промышленные предприятия (судоремонтные и судостроительные, нефтебаза, ТЭЦ, портовые перегрузочные комплексы и др.).

Согласно исследованиям, проведенным авторами в работах [Овсяный и др., 2003; Орехова, Коновалов 2009; Burgess et al., 2009], были сделаны выводы, что степень загрязнения донных осадков тяжелыми металлами значительно отличается в различных зонах бухты и зависит от близости к источникам загрязнения. Однако в цитируемых работах практически отсутствовали оценки связи распределения тяжелых металлов с геохимическими и физическими характеристиками донных отложений.

А в работе [Burgess et al., 2009] рассматривались только такие металлы, как медь, ртуть и свинец, в донных отложениях Севастопольской и Балаклавской бухт. В работах по мониторингу Черного моря и его северо-западного шельфа [Bat et al., 2015; Eckert et al., 2009; Tankéte et al., 2001] показано, что интенсивность накопления тяжелых металлов в донных отложениях зависит от их гранулометрического состава.

Казачья бухта находится на северо-западе Гераклеийского полуострова. Бухта является примером черноморской акватории, которая, с одной стороны, на протяжении десятилетий рассматривалась как эталон для региональной характеристики [Бондарева, Мильчакова, 2002], с другой – уровень антропогенного пресса на нее за последние годы увеличился (рекреация, застройка берега и др.), что повлекло за собой и увеличение количества загрязняющих веществ, попадающих в водоем. Для прибрежных акваторий с ограниченным водообменом и высоким уровнем антропогенной нагрузки донные отложения бухты могут быть индикатором ее экологического состояния [Тихонова, Котельянец, 2017].

Балаклавская бухта расположена в южной части Крымского полуострова между м. Фиолент и м. Айя и представляет собой узкую (до 240 м) эстуарного типа акваторию с крутыми высокими и извилистыми берегами. Бухта имеет S-образную конфигурацию: в центральной части коленовидная узость разделяет бухту на две примерно равные по площади акватории – северный и южный бассейны, которые отличаются особенностями морфометрии и гидродинамики [Ломакин, Попов, 2011].

К основным физико-химическим характеристикам донных отложений, влияющим на процесс накопления загрязняющих веществ, включая тяжелые металлы, относятся соединения органического ( $C_{орг}$ ) и неорганического карбонатного ( $CaCO_3$ ) углерода, гранулометрический состав отложений. Именно эти характеристики играют важную роль в формировании типа осадков и способности к накоплению в них с осадочным материалом различных веществ, в том числе макро- и микроэлементов [Виноградов, 1962]. В значительной степени эти характеристики определяют и пространственное распределение в донных отложениях прибрежных акваторий исследуемых элементов.

Другим важным фактором, определяющим максимальное содержание элементов в донных отложениях, является интенсивность водообмена на данной акватории. Чем выше интенсивность водообмена, тем быстрее будет происходить рассеивание элементов в водной среде и вымывание из донных отложений.

Цель работы – по величине рассчитанных коэффициентов корреляции между физико-химическими характеристиками донных отложений и содержанием некоторых тяжелых металлов установить причины отличий в их пространственном распределении в исследуемых акваториях.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объекты исследования в работе – донные отложения мелководных акваторий Крыма на примере бухт Севастопольского региона. Анализировались данные, полученные по результатам экспедиционных исследований в девяти экспедициях с 2003 по 2018 г. в акваториях Севастопольской, Казачьей, Балаклавской бухт. Районы работ по отбору проб донных отложений представлены на рис. 1.

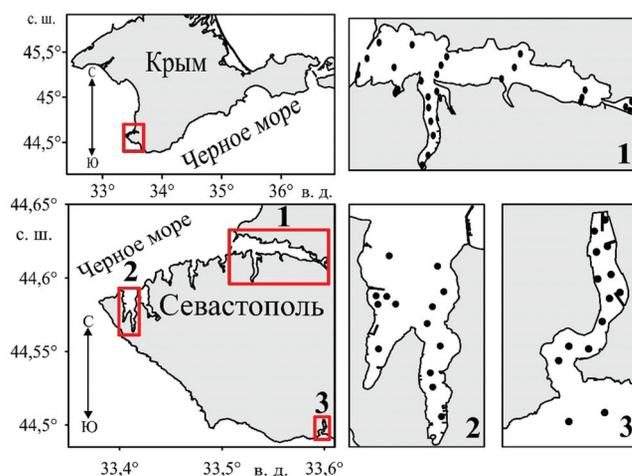


Рис. 1. Районы работ по отбору проб донных отложений прибрежных акваторий Крыма

Fig. 1. Areas of sampling bottom sediments of coastal waters of the Crimea

Пробы донных отложений отбирались дночерпателем Петерсона. Исследованию подвергали верхний слой осадков (0–5 см). Органическое вещество определяли фотоколориметрическим методом на фотоколориметре КФК-2 [Овсяный и др., 2015]. Методика определения содержания карбоната кальция в донных отложениях основана на измерении объема  $CO_2$ , выделившегося при разложении пробы кислотой. Гранулометрический состав определяли комбинированным методом просеивания и седиментации [Петелин, 1967]. В зависимости от вещественного состава и дисперсности осадка применяется два варианта гранулометрического анализа донных осадков:

а) комбинированный ситовой анализ (метод декантации и рассеивания) – для крупнозернистых алевритовых и смешанных осадков;

б) комбинированный гранулометрический анализ (метод декантации и пипетки) – для тонкодисперсных глинистых осадков.

Изучение содержания тяжелых металлов (валовые формы) (Zn, Cu, Ni, Cr, Sr, Co, Mn, Fe) в донных отложениях исследуемых акваторий осуществлялось с применением метода рентгено-флуоресцентного анализа (РФА) [Методика..., 2002].

Объем проведенных элементов определений (э. о.) по акваториям и годам составил:

Севастопольская бухта (2006, 2009, 2016 гг.) – 876 э. о. Казачья бухта (2003, 2015 гг.) – 367 э. о. Балаклавская бухта (2005, 2015, 2018 гг.) – 795 э. о. При этом было сделано 26 станций в Севастопольской бухте, 21 станция в Казачьей и 23 станции в Балаклаве. Координаты станций от года к году не менялись.

Данные по гранулометрическому анализу представлены Гуровым К.И. (отдел биогеохимии моря ФГБУН ФИЦ МГИ). Пробы для определения фракционного состава донных отложений были получены в экспедиционных исследованиях в 2006, 2009, 2016 и 2018 гг. в акваториях исследуемых бухт.

При анализе содержания тяжелых металлов в природных объектах общепринятым является построение матриц парных корреляций с целью выявления отсутствия или наличия корреляций между содержаниями тяжелых металлов и основных осадкообразующих компонентов. В настоящей работе построение матриц парных корреляций осуществлялось при использовании программы STATISTIKA.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Севастопольская бухта.** Пространственное распределение илистой фракции донных отложений по площади Севастопольской бухты исследовалось в 2006, 2009 и 2016 гг. Его результаты представлены в работе [Gurov et al., 2021]. Гранулометрический состав донных осадков бухты, отобранных в 2016 г., показал изменения по сравнению с данными 2009 г. Изменения коснулись как особенностей пространственного распределения содержания отдельных фракций, так и их количественных характеристик. Отмечено, что за последнее время доля илистой фракции в поверхностном слое (0–5 см) донных отложений бухты возросла в среднем в 1,5 раза (с 60,5% в 2009 г. до 83,4% в 2016 г.). Преобладание мелкодисперсных алеврито-пелитовых осадков в составе донных отложений Севастопольской бухты подтверждается также данными трехкомпонентной диаграммы гранулометрического состава (рис. 2).

Таким образом, донные отложения Севастопольской бухты представлены в основном мелкодисперсной илистой фракцией, песчаными алев-

рито-пелитами и заиленными ракушками (см. рис. 2). Тонкодисперсные осадки, характеризующиеся высокой сорбционной способностью [Романов и др., 2007], контролируют распределение таких металлов, как никель (рис. 3), кобальт, железо и марганец. На распределение цинка (см. рис. 3) и меди в Севастопольской бухте существенное влияние оказывает содержание органического углерода в донных осадках. Это связано с тем, что большинство изучаемых металлов способны образовывать металлоорганические соединения, например соли гуминовых кислот. Кроме того, мелкодисперсные донные отложения, обычно обогащенные органическим углеродом, обводненные и, следовательно, обладают высокой сорбционной емкостью [Романов и др., 2007].

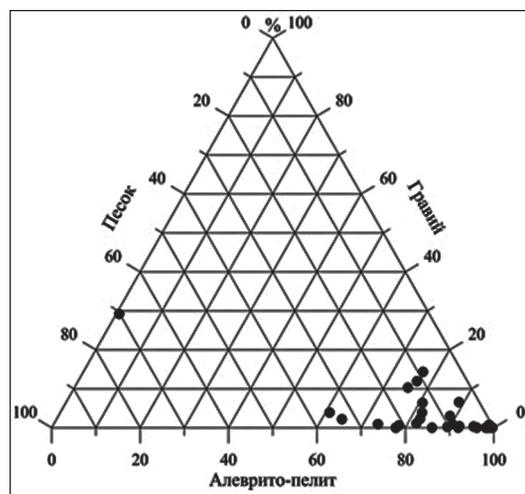


Рис. 2. Трехкомпонентная диаграмма гранулометрического состава поверхностного слоя (0–5 см) донных отложений Севастопольской бухты, 2009 г.

Fig. 2. Three-component diagram of the grain composition of the surface layer (0–5 cm) of bottom sediments in the Sevastopol Bay, 2009

В Севастопольской бухте доля осадков, богатых карбонатами, ничтожно мала. Площади высоких концентраций карбонатов совпадают с площадями, характеризующимися понижением содержания в донных отложениях илистой фракции и органического углерода. Содержание стронция в донных отложениях Севастопольской бухты связано с распределением карбоната кальция, что подтверждается высокими значениями коэффициента корреляции содержания карбонатов с этим металлом ( $r = 0,8$ ). Авторы работы [Романов и др., 2007] указывали, что стронций, будучи двухвалентным металлом с ионным радиусом, близким к ионному радиусу кальция, может замещать его в кристаллической решетке карбонатов.

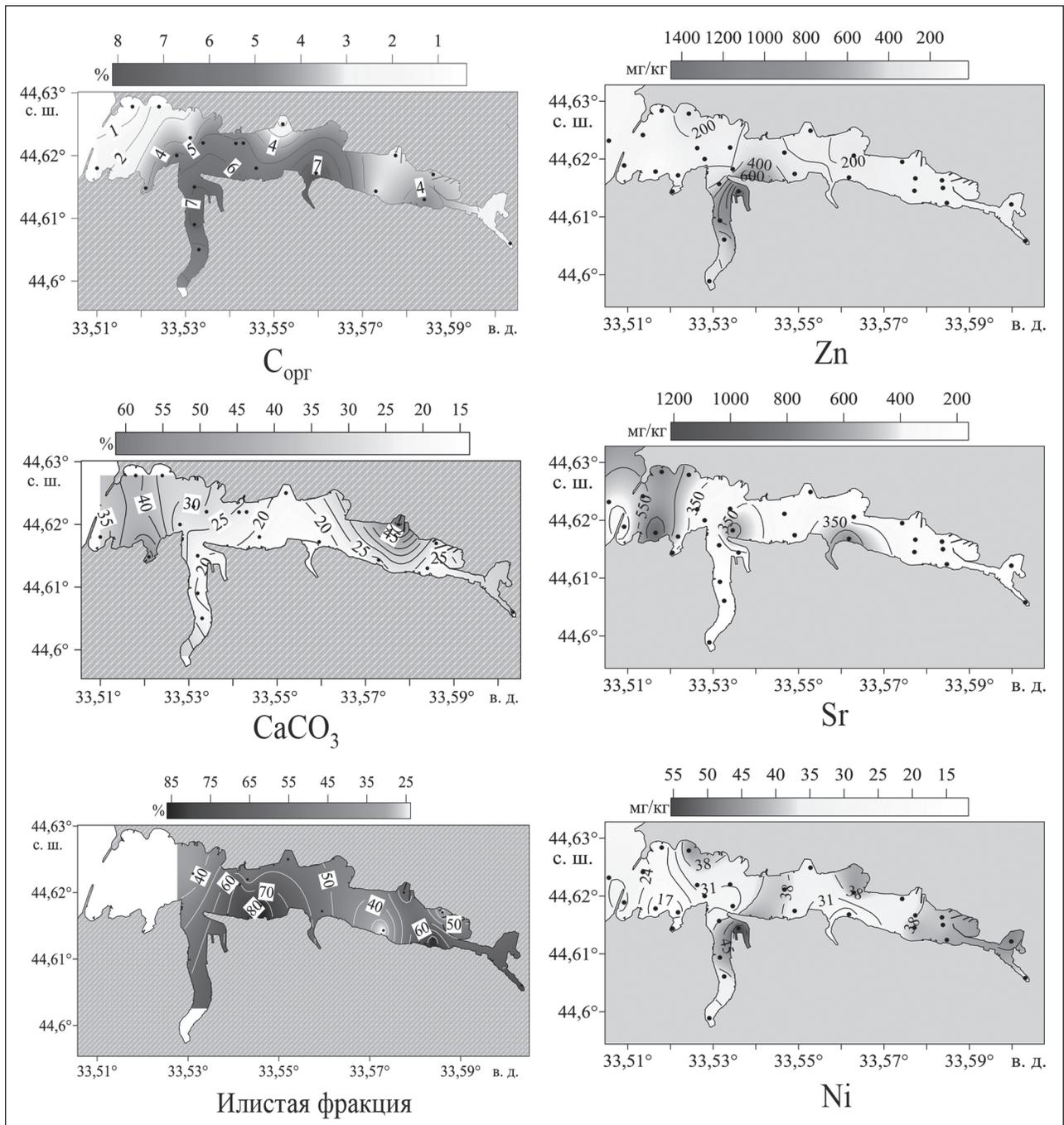


Рис. 3. Пространственное распределение Zn Sr, Ni,  $C_{org}$ ,  $CaCO_3$ , гранулометрического состава (илистая фракция, %) в донных отложениях Севастопольской бухты

Fig. 3. Spatial distribution of Zn Sr, Ni,  $C_{org}$ ,  $CaCO_3$  and grain composition (silty fraction, %) in bottom sediments of the Sevastopol Bay

**Бухта Казачья.** Донные отложения бухты Казачьей представлены в основном заиленными песками, галькой, заиленными ракушечниками и алевро-пелитовыми песками. Такие крупнозернистые осадки характеризуются хорошей промываемостью и малой сорбционной емкостью загрязняющих веществ [Романов и др., 2007], они занимают значительную часть площади и представлены в основном крупной, местами заиленной ракушей. Тон-

кодисперсные осадки, характеризующиеся высокой сорбционной способностью, контролируют распределение таких металлов, как цинк, никель и хром в бухте Казачьей [Тихонова, Котельянец, 2017] (рис. 4).

Отличительной особенностью пространственного распределения гранулометрического состава донных отложений бухты Казачьей за последние десятилетия является накопление илистых фракций

в ее кутовой части (см. рис. 4) [Тихонова, Котельянец, 2017]. Содержание мелкозернистого материала в исследуемой акватории достигает максимальных значений (60–63%). В центральной части бухты донные осадки представлены песчаными илами с включениями раковин и раковинного детрита (см. рис. 4), а отложения северного бассейна – песками.

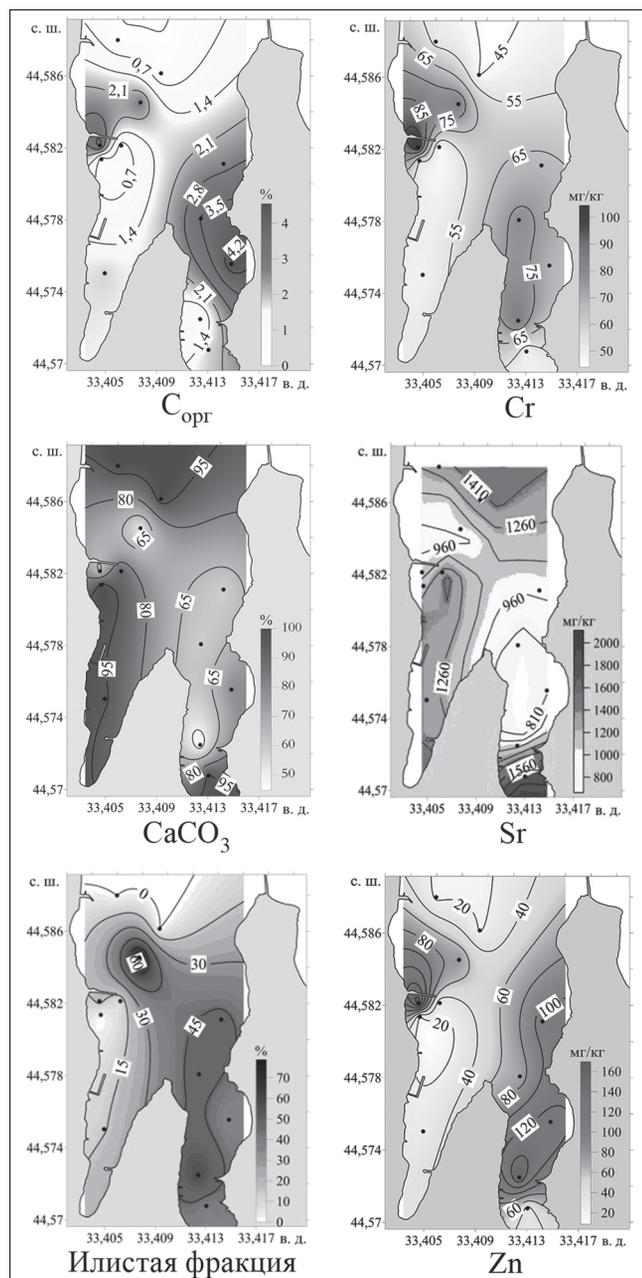


Рис. 4. Пространственное распределение Cr, Sr, Zn,  $C_{\text{орг}}$ ,  $\text{CaCO}_3$ , гранулометрического состава (илистая фракция, %) в донных отложениях бухты Казачьей, 2003 г.

Fig. 4. Spatial distribution of Cr, Sr, Zn,  $C_{\text{орг}}$ ,  $\text{CaCO}_3$  and grain composition (silty fraction, %) in bottom sediments of the Kazachya Bay, 2003

Исследования показали, что содержание  $C_{\text{орг}}$  (см. рис. 4) возрастает в донных осадках по разрезу вы-

хода из бухты в центральную ее часть. В крупнозернистых осадках с окислительными условиями среды содержание  $C_{\text{орг}}$  понижается. Максимальное содержание  $C_{\text{орг}}$  было определено на станциях с повышенным содержанием алеврито-пелитовой фракции. Высокие значения  $C_{\text{орг}}$  относительно типичных для подобных по физико-химическим параметрам осадков (до 1...2%) свидетельствуют о его антропогенном происхождении. Так, в исследуемой акватории концентрации данного параметра в настоящее время изменяются от 0,39% в биогенных карбонатных осадках в северной части бассейна, прилегающей к открытой части моря, до 6,08% в мелкозернистых алеврито-пелитовых илах в южной кутовой части бухты.

Из рис. 4 следует, что увеличение содержания  $C_{\text{орг}}$  наблюдается в кутовой части бухты, где водообмен с открытым морем ниже, чем в центральной части бухты, граничащей с открытым морем, что очевидно и стало причиной высокого содержания  $\text{CaCO}_3$  в центральной части бухты.

Из работы [Котельянец, 2021] известно, что повышенные значения карбонатности хорошо соотносятся с долей крупнозернистых фракций, представленных раковинами и раковинным детритом. Содержание же таких фракций в отобранных пробах крайне мало. Возможно именно сокращение доли гравийного материала привело к уменьшению концентрации  $\text{CaCO}_3$  в донных осадках бухты. Наиболее четко данная зависимость прослеживается в илистой кутовой части акватории, где, по сравнению с данными 2003 г., содержание  $\text{CaCO}_3$  уменьшилось в 1,5–2 раза.

Особенности пространственного распределения тяжелых металлов в донных отложениях Казачьей бухты позволили выделить группы элементов в зависимости от их геохимических свойств. К первой группе были отнесены медь, цинк, хром, кобальт. Металлы первой группы сконцентрированы в осадках в соответствии с геоморфологическими особенностями донных отложений. Металлы второй группы (Fe, Mn) имели идентичный характер пространственного распределения в поверхностном слое осадков бухты и высокие значения коэффициентов корреляции с тонкодисперсной фракцией и органическим веществом. Железо и марганец концентрируются в илистой фракции, их максимальное содержание связано с наличием органического вещества, так как они попадают в морскую воду большей частью с взвесью материкового стока [Митропольский и др., 1982]. Стронций преобладает в высококарбонатных осадках [Романов и др., 2007].

Распределение повышенных концентраций цинка, меди, никеля, кобальта, хрома, железа и марганца в бухте Казачьей (см. рис. 4) регулируется по-

вышенным содержанием органического углерода в донных осадках.

**Балаклавская бухта.** Балаклавская бухта представляет собой акваторию с затрудненным водообменом. Исходя из морфометрии дна и конфигурации берегов, Балаклавская бухта разделяется на мелководную часть в вершине, центральную часть, южное глубоководное расширение и коленообразную узость, соединяющую две последние части [Котельянец, 2021]. Бухта находится под влиянием различных техногенных нагрузок, таких как сток р. Балаклавка, сток рудоуправления и городские неочищенные стоки.

Исследования гранулометрического состава донных осадков, отобранных в 2005 и 2015 гг., показали, что вещественный состав претерпел некоторые изменения. В большей степени это касается песчаного и гравийного материала, количествен-

ных характеристик и особенностей пространственного распределения. Гранулометрический состав поверхностного слоя (0–5 см) донных отложений Балаклавской бухты представлен на трехкомпонентной диаграмме (рис. 5).

Точки диаграммы, сосредоточенные в правом нижнем углу, отражают количественное преобладание мелкодисперсных фракций. В пробах донных отложений в малом количестве присутствуют крупнозернистые фракции. Показано, что за период с 2005 по 2015 г. количество илистой фракции в донных отложениях Балаклавской бухты увеличилось при одновременном снижении количества гравийной и песчаной фракций. Пространственное распределение Zn, Cu (рис. 6) аналогично пространственному распределению содержания органического углерода в исследуемых донных отложениях.

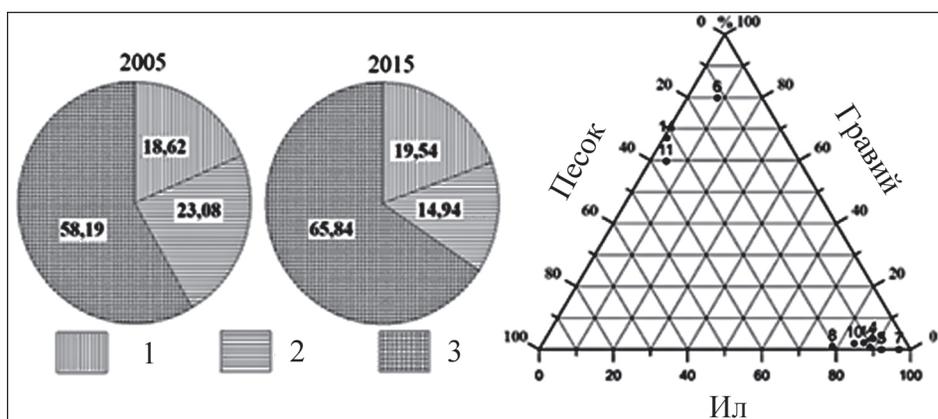


Рис. 5. Трехкомпонентная диаграмма гранулометрического состава поверхностного слоя (0–5 см) донных отложений Балаклавской бухты: 1 – гравий; 2 – песок; 3 – ил (по [Котельянец, 2021])

Fig. 5. Three-component diagram of the grain composition of the surface layer (0–5 cm) of bottom sediments in the Balaklava Bay: 1 – gravel; 2 – sand; 3 – silt (Cited in [Kotelyanets, 2021])

Локальные максимумы содержания цинка и меди по пространству соответствуют локальным точкам максимального содержания органического вещества, что подтверждается и рассчитанными коэффициентами корреляции (табл. 2).

Содержание илистого материала в отложениях Балаклавской бухты в среднем по всем пробам увеличилось с 58,2 до 65,9% в 2015 г. и до 75,8% в 2018 г., а мелкодисперсный материал по-прежнему сосредоточен в западной и северо-западной частях северной акватории бухты. Значительно возросла доля пелито-алевритового материала. В пробах, отобранных в 2005 г., содержание фракции (<0,05 мм) в среднем по пробам составило около 13%, в пробах 2015 г. достигло 50%, а в 2018 г. увеличилось до 62%. Таким образом, за 13 лет отмечен рост мелкодисперсной фракции донных отложений западной и северо-западной частей бухты (см. рис. 5).

Более высокая динамика содержания илистого материала наблюдалась в кутовых частях бухты: в северо-восточной оно изменилось с 55% в 2005 г. до 86% в 2015 г. и 91% в 2018 г., в северо-западной – с 72 до 90% в 2015 г. и до 98% в 2018 г. В центральной части акватории доля мелкодисперсного материала увеличилась на 30%, в том числе на 40% увеличилась доля пелито-алевритовой фракции.

Установлено, что для ряда элементов, таких как Fe, Cr, Cu, Zn, максимальные концентрации отмечаются в кутовой северо-восточной части бухты. Mn накапливается у западного берега северного бассейна. Повышенное содержание Co и Ni наблюдается в центральной части северного бассейна, а Sr – в донных отложениях южного бассейна и на выходе из бухты. Показано, что повышенные концентрации исследуемых элементов были определены на станциях, где преобладает мелкозернистый илистый ма-

териал. А их минимальные концентрации отмечены для станций в южном бассейне Балаклавской бухты, что объясняется преобладанием в этом районе гравийно-песчаных отложений, доля илстой фракции в которых составляет 20–30%.

Уровни накопления исследуемых элементов в зависимости от физико-химических характеристик донных отложений представлены на рис. 7. Показано, что пространственное распределение

Sr практически полностью совпадает с максимальными концентрациями  $\text{CaCO}_3$ . Аналогичное поведение характерно для пространственных распределений Ni с  $\text{C}_{\text{орг}}$  и  $\text{MnO}_2$  с илстой фракцией донных отложений Балаклавской бухты. Положительные корреляционные зависимости с органическим углеродом были выявлены для никеля, цинка, меди, а с мелкодисперсной илстой фракцией для марганца.

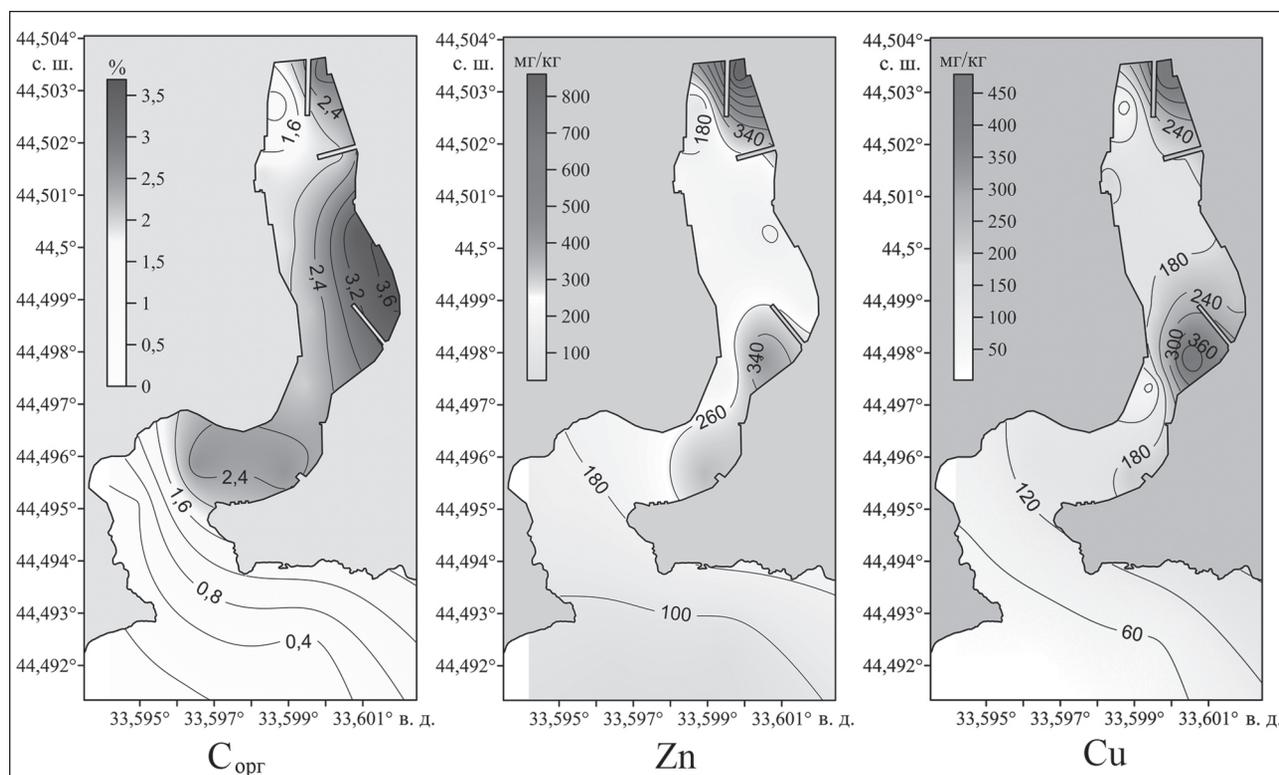


Рис. 6. Пространственное распределение Zn, Cu,  $\text{C}_{\text{орг}}$  в донных отложениях Балаклавской бухты, 2018 г.

Fig. 6. Spatial distribution of Zn, Cu,  $\text{C}_{\text{орг}}$  in bottom sediments of the Balaklava Bay, 2018

Превышение геохимического фона для некоторых исследуемых элементов в донных отложениях акваторий Севастопольского региона с затрудненным водообменом с открытым морем представлены в табл. 1. Из полученных данных следует, что по приведенным элементам во всех бухтах Севастопольского региона наблюдается превышение геохимического фона.

Для выявления связей содержания металлов в донных осадках Севастопольского региона с их физико-химическими особенностями были рассчитаны коэффициенты корреляции с содержанием илстой фракции, органического углерода и карбоната кальция. Рассчитанные коэффициенты корреляции некоторых исследуемых металлов с содержанием в донных отложениях  $\text{C}_{\text{орг}}$  и илстой фракции представлены в табл. 2.

Следует отметить, что согласно данным [Слуковский, 2014] тонкодисперсные минеральные частицы и органическое вещество образуют целостную систему как основные фазы-носители тяжелых металлов, что ведет к единству уровней максимальных концентраций исследуемых элементов с гранулометрическим составом и органическим веществом донных отложений. Для донных осадков Севастопольской бухты такое единство величины корреляционных связей с  $\text{C}_{\text{орг}}$  и илстой фракцией наблюдается только для Fe и Ni (см. табл. 2). При анализе распределения исследуемых элементов в донных осадках Казачьей бухты были выделены Ni и Cu, которые имели значимые коэффициенты корреляции с органическим углеродом и илстой фракцией (см. табл. 2).

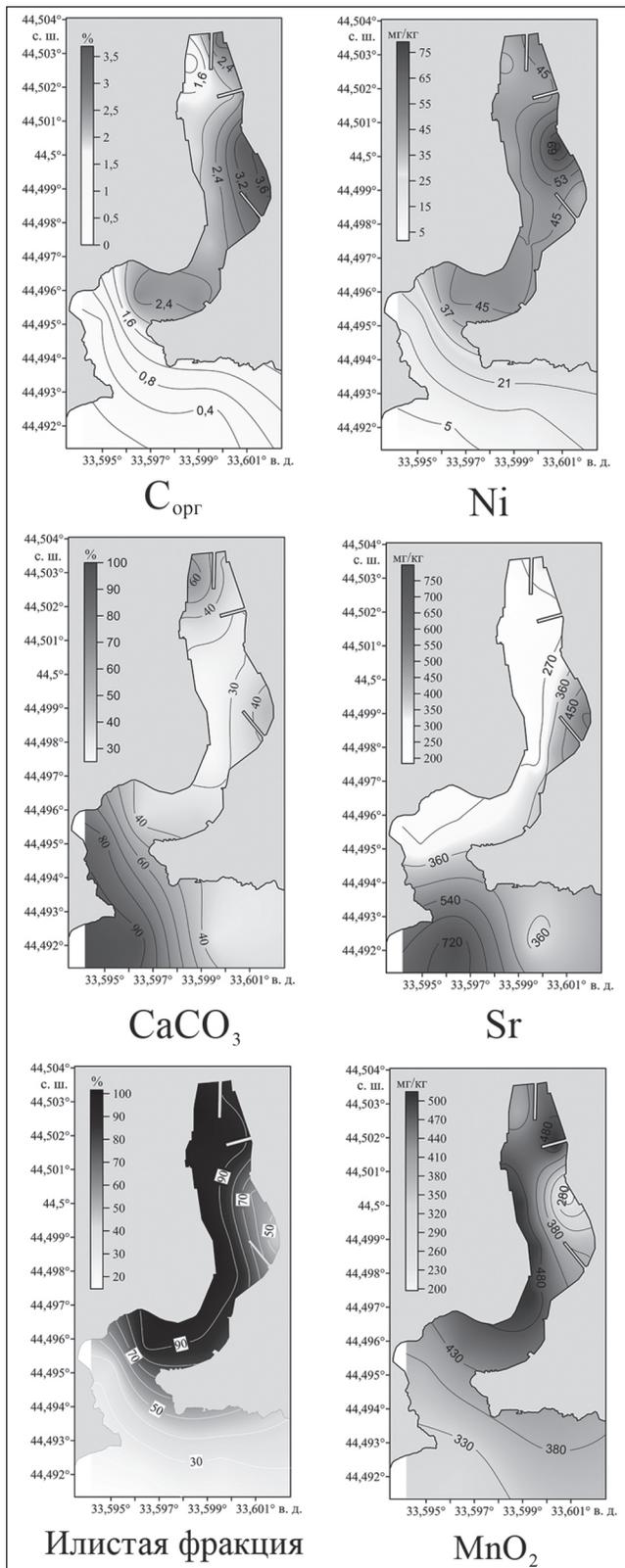


Рис. 7. Пространственное распределение Ni, Sr, Mn, C<sub>орг</sub>, CaCO<sub>3</sub>, гранулометрического состава (илистая фракция, %) в донных отложениях Балаклавской бухты  
 Fig. 7. Spatial distribution of Ni, Sr, Mn, C<sub>орг</sub>, CaCO<sub>3</sub> and grain composition (silty fraction, %) in bottom sediments of the Balaklava Bay

Для осадков Балаклавской бухты максимальная корреляционная связь (0,8) наблюдается для Ni с мелкодисперсной илистой фракцией осадков. Высокая корреляционная связь для Cu (0,7), Zn (0,8) наблюдается с органическим углеродом. Максимальные положительные величины корреляций с пелито-алевритовой фракцией отмечены для Mn (0,7). Показано, что между гравийным материалом и содержанием исследуемых элементов в донных отложениях Балаклавской бухты корреляция полностью отсутствует. Для донных отложений Балаклавской бухты единство величины корреляционных связей с C<sub>орг</sub> и илистой фракцией наблюдается только для Ni (см. табл. 2).

С целью выяснения причин пространственных аномалий в распределении тяжелых металлов и оценки их зависимости от физико-химических характеристик донных отложений определены положительные корреляционные связи исследуемых металлов с содержанием органического углерода и мелкодисперсной илистой фракции донных отложений во всех исследуемых объектах (см. табл. 2). Анализ полученных данных свидетельствует в ряде случаев о некотором единстве уровней корреляционных связей максимальных концентраций исследуемых элементов с гранулометрическим составом и органическим веществом. Так, для донных отложений Севастопольской бухты это Fe и Ni, для донных осадков Казачьей бухты – Fe и Cu и Балаклавской бухты – это Ni (см. табл. 2). Для марганца при оценке корреляционных связей его содержания с органическим веществом во всех исследуемых акваториях наблюдаются самые низкие значения корреляций. Однако при оценке корреляционных связей его содержания с илистой фракцией донных отложений величина их растет, особенно в акватории Балаклавской бухты, где она равна максимальным значениям вместе с такими металлами как Ni ( $r = 0,8$ ), Mn ( $r = 0,7$ ), Fe ( $r = 0,7$ ). По-видимому, причина заключается в том, что в донных отложениях исследуемых нами объектов марганец находится в виде четырехвалентного MnO<sub>2</sub>, который вместе с Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> наравне с глинистыми минералами являются природными сорбентами и сосредоточены в тонких фракциях донных отложений.

### ВЫВОДЫ

Выполнен анализ особенностей пространственного распределения и накопления тяжелых металлов в донных отложениях прибрежных акваторий Крыма на примере бухт Севастопольского региона (Севастопольская, Казачья, Балаклавская).

Получены корреляционные зависимости между накоплением тяжелых металлов и физико-химическими характеристиками донных отложений исследуемых объектов.

двух акваторий, а также оценено влияние формы нахождения в них конкретного металла, например Fe и Mn, способных к образованию мелкодисперсной взвешенной фракции.

В Севастопольской бухте, как акватории с затрудненным водообменом, выделены участки донных осадков с превышением геохимического фона для Zn, Ni, Cr, Cu, Co, Fe, Sr. Приведены оценки изменения гранулометрического состава и показаны изменения площадей, занимаемых мелкодисперсными алеврито-пелитовыми осадками за период исследований (2003–2018). В Казачьей бухте также было определено максимальное содержание Zn, Ni, Cr, Cu, Mn, Sr. Приведены районы с превышением геохимического фона для Zn, Ni, Cr, Cu, Sr в донных отложениях акватории Балаклавской бухты, находящихся под влиянием различных техногенных нагрузок (стока р. Балаклавка, стока рудоуправления и городских неочищенных стоков).

Для донных отложений Севастопольского региона (бухты Севастопольская, Казачья и Балаклавская) установлена статистически значимая корреляция с содержанием илистой фракции для Ni ( $r = 0,8$ ), Mn ( $r = 0,7$ ) (бухты Казачья и Балаклавская), а с концентрацией органического углерода высокий уровень корреляции наблюдается для Zn ( $r = 0,8$ ), Cu ( $r = 0,8$ ), (Севастопольская и Балаклавская бухты) и Fe ( $r = 0,7$ ) (только Севастопольская бухта) и Ni ( $r = 0,8$ ) (Балаклавская и Казачья бухты). Для Sr установлена высокая корреляционная связь с содержанием  $\text{CaCO}_3$  ( $r = 0,8$ ) для донных отложений во всех исследуемых бухтах.

Показано, что пространственное распределение тяжелых металлов определяется физико-химическими характеристиками донных отложений исследуемых акваторий, что подтверждается также величиной корреляционных связей исследуемых элементов с некоторыми из них.

Таблица 1

**Диапазон изменения исследуемых элементов в донных отложениях акваторий Севастопольского региона, мг/кг**

Акватория	Zn	Ni	Cr	Cu	Co
Севастопольская бухта	46–579	20–63	47–122	48–76	67–115
Казачья бухта	16–171	5–47	45–105	10–30	20–39
Балаклавская бухта	29–870	15–95	42–125	49–170	2,5–20
Среднее содержание в донных отложениях шельфа Черного моря	60	34	45	31	14

Источник: [Емельянов и др., 2004].

Таблица 2

**Коэффициенты корреляции ряда исследуемых элементов с содержанием в донных отложениях  $C_{орг}$  и илистой фракции**

Элемент	Севастопольская бухта		Казачья бухта		Балаклавская бухта	
	$C_{орг}$	Ил	$C_{орг}$	Ил	$C_{орг}$	Ил
Zn	0,8	0,2	0,6	0,5	0,8	0,2
Ni	0,7	0,6	0,8	0,7	0,8	0,8
Cr	0,6	0,3	0,7	0,6	0,3	0,7
Cu	0,8	0,4	0,7	0,7	0,7	0,8
Co	0,6	0,4	0,6	0,7	0,5	0,8
MnO	0,3	0,4	0,5	0,7	0,2	0,7
Fe	0,7	0,7	0,6	0,6	0,3	0,7

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания по теме № FNNN-2024-0016 «Прибрежные исследования».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондарева Л.В., Мильчакова Н.А. Флора общезоологического заказника «Бухта Казачья» (Крым, Черное море) // Заповедное дело в Украине. 2002. Т. 8. № 2. С. 36–47.
- Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в горных породах // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
- Геоэкология Черноморского шельфа Украины / Емельянов В.А. [и др.] // Академперіодика. 2004. 296 с.
- Котельянец Е.А. Особенности накопления макро- и микроэлементов в донных отложениях прибрежных акваторий Крыма (Черное море) с различной интенсивностью водообмена по данным РФА // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. Т. 2. С. 106–120.
- Ломакин П.Д., Попов М.А. Океанологическая характеристика и оценка загрязнения вод Балаклавской бухты. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 184 с.
- Митропольский А.Ю., Безбородов А.А., Овсяный Е.И. Геохимия Черного моря. Киев: Наукова думка, 1982. 140 с.
- Методика выполнения измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах почв методом рентгено-флуоресцентного анализа (Свидетельство Госстандарта РФ № 2420/53-2002).
- Овсяный Е.И., Коновалов С.К., Митропольский А.Ю., Котельянец Е.А. Органический углерод и карбонатность современных донных отложений Керченского пролива // Геохимия. 2015. № 12. С. 1120–1131. DOI: 10.7868/S0016752515120079.
- Овсяный Е.И., Романов А.С., Игнатъева О.Г. Распределение тяжелых металлов в поверхностном слое донных осадков Севастопольской бухты (Черное море) // Морской экологический журнал. 2003. № 2. С. 85–93.
- Орехова Н.А., Коновалов С.К. Полярография донных осадков Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал. 2009. № 2. С. 52–66.
- Петелин В.П. Гранулометрический анализ морских донных осадков. М.: Наука, 1967. 128 с.
- Романов А.С., Орехова Н.А., Игнатъева О.Г. и др. Влияние физико-химических характеристик донных осадков на распределение микроэлементов на примере бухт Севастополя (Черное море) // Экология моря. 2007. Вып. 73. С. 85–90.
- Тихонова Е.А., Котельянец Е.А. Многолетняя динамика загрязнения донных отложений Севастопольского побережья (на примере б. Казачья, Черное море) // Комплексные исследования Мирового океана (КИМО-2017): материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых (Москва, 10–14 апреля 2017 г.). 2017. С. 48–49.
- Burgess R.M., Terletskaia A.V., Milyukin M.V. et al. Concentration and distribution of hydrophobic organic contaminants and metals in the estuaries of Ukraine, *Marine Pollution Bulletin*, 2009, vol. 58(8), p. 1103–1115.
- Gurov K.I., Kurinnaia Yu.S., Kotelyanets E.A. Features of Accumulation and Spatial Distribution of Microelements in Bottom Sediments of the Crimea Coastal Regions, *Processes in GeoMedia*, vol. III, DOI: 10.1007/978-3-030-69040-3.
- Tankéré P.C., Muller F.L., Burton J.D. Trace metal distributions in shelf waters of the northwestern Black Sea, *Continental Shelf Research*, 2001, vol. 21, iss. 13–14, p. 1501–1532, DOI: 10.1016/S0278-4343 (01) 00013-9.
- Электронный ресурс  
Слуковский З.И. Эколого-геохимический анализ состояния донных отложений малых рек урбанизированных территорий (на примере города Петрозаводска): автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2014. URL: <https://www.disscat.com/content/ekologo-geokhimicheskii-analiz-sostoyaniya-donnykh-otlozhenii-malykh-rek-urbanizirovannykh-t> (дата обращения 15.02.2023).
- Bat L., Yesim Özkan E., Can Öztekin H. The contamination status of trace metals in Sinop coast of the Black Sea, Turkey, *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 2015, vol. 13, iss. 1, p. 1–10, URL: [https://cjes.guilan.ac.ir/article\\_112\\_4a666ae9d2870de30036717ef4f9a5d0.pdf](https://cjes.guilan.ac.ir/article_112_4a666ae9d2870de30036717ef4f9a5d0.pdf) (дата обращения 15.02.2023).
- Eckert S., Schnetger B., Brumsack H.-J. Trace metal patterns in Black Sea sapropels as a chemostratigraphic tool, *Geophysical Research Abstracts*, 2009, vol. 11, EGU2009-9371, URL: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2009/EGU2009-9371.pdf> (дата обращения 15.02.2023).

Поступила в редакцию 25.07.2023

После доработки 16.01.2024

Принята к публикации 24.04.2024

## SPATIAL DISTRIBUTION OF HEAVY METALS IN THE BOTTOM SEDIMENTS OF BAYS OF THE SEVASTOPOL REGION

E.A. Kotelyanets<sup>1</sup>, E.E. Sovga<sup>2</sup>, S.K. Konovalov<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup> Federal Research Center "Marine Hydrophysical Institute of RAS" (Sevastopol)

<sup>1</sup> Shelf Hydrophysics Department, Junior Scientific Researcher; e-mail: ekotelyanets@mhi-ras.ru

<sup>2</sup> Shelf Hydrophysics Department, Leading Scientific Researcher D.Sc. in Geography; e-mail: esovga@mhi-ras.ru

<sup>3</sup> Director of the Institute, corresponding member of RAS, D.Sc. in Geography; e-mail: sergey\_konovalov@yahoo.com

The paper presents the results of studying the spatial distribution of heavy metals (Zn, Cu, Ni, Cr, Sr, Co, Fe, Mn) in the bottom sediments of the bays of the Sevastopol region. The data obtained during the 2003 to 2018 expeditions are analyzed. The spatial distribution and accumulation of heavy metals in the bottom sediments of the Sevastopol, Kazachya and Balaklava bays are studied. Correlations between their content and the physico-chemical characteristics of bottom sediments of the studied water areas (content of  $C_{org}$ ,  $CaCO_3$ , fractional composition) were obtained.

The metals with the same correlation coefficients for both the content of  $C_{org}$  and the silt fraction content are identified. These are Fe ( $r = 0,7$ ) and Ni ( $r = 0,6$ ) for bottom sediments of the Sevastopol Bay, Fe ( $r = 0,6$ ) and Cu ( $r = 0,7$ ) for the Kazachya Bay and only Ni ( $r = 0,8$ ) for the Balaklava Bay. High correlation between Sr and  $CaCO_3$  content ( $r = 0,8$ ) has been established for bottom sediments of all studied water areas.

It is shown that the spatial distribution of heavy metals is determined by physico-chemical characteristics of bottom sediments, which is confirmed by the magnitude of correlations in terms of the content of fine fraction and organic carbon, while the difficult water exchange with the open sea contributes to their accumulation up to maximum values.

**Keywords:** physico-chemical characteristics, the Black Sea, coastal waters

**Acknowledgments.** The work was carried out within the framework of the State task on the topic no. FNNN-2024-0016 Coastal research.

### REFERENCES

- Bondareva L.V., Milchakova N.A. Flora obshchezoologicheskogo zakaznika "Kazachya Bukhta" (Krym, Chernoe more) [Flora of the general zoological reserve "Cossack Bay" (Crimea, Black Sea)], *Zapovednoe delo v Ukraine*, 2002, vol. 8, no. 2, p. 36–47. (In Russian)
- Burgess R.M., Terletskaia A.V., Milyukin M.V. et al. Concentration and distribution of hydrophobic organic contaminants and metals in the estuaries of Ukraine, *Marine Pollution Bulletin*, 2009, no. 58(8), p. 1103–1115.
- Geoekologiya Chernomorskogo shel'fa Ukrainy* [Geoecology of the Ukrainian Black Sea shelf], V.A. Emelyanov et al. (avt.), Kiev, Akademperiodika Publ., 2004, p. 296. (In Russian)
- Gurov K.I., Kurinnaia Yu.S., Kotelyanets E.A. Features of Accumulation and Spatial Distribution of Microelements in Bottom Sediments of the Crimea Coastal Regions, *Processes in GeoMedia*, vol. III, DOI: 10.1007/978-3-030-69040-3.
- Kotelyanets E.A. [Peculiarities of Macro- and Microelement Accumulation in Bottom Sediments of the Crimea Coastal Water Areas (the Black Sea) with Different Water Exchange Intensity based on XRF Data], *Ekologicheskaja bezopasnost' pribrezhnoj i shel'fovoj zon morja* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zone of Sea], 2021, no. 2, p. 106–120. (In Russian)
- Lomakin P.D., Popov M.A. *Okeanologicheskaya kharakteristika i otsenka zagryazneniya vod Balaklavskoi bukhty* [Oceanological characteristics and assessment of water pollution in the Balaklava Bay], ECOSI-Hydrophysics Publ., 2011, p. 184. (In Russian)
- Metodika vypolnenija izmerenij massovoj doli metallov i oksidov metallov v poroshkovyh probah pochv metodom rentgenofluorescentnogo analiza, reglamentirovannaja v dokumente M049-P/02* [Technique of performing the measurements of the weight percentage of metals and metal oxides in powdered samples of soils by X-ray fluorescence analysis regulated by the M049-P/02 document], St Petersburg, Spektron Publ., 2002, 16 p. (In Russian).
- Mitropolskii A.Yu., Bezborodov A.A., Ovsyanyi E.I. *Geo-khimiya Chernogo morya* [Geochemistry of the Black Sea], Kiev, Naukova dumka Publ., 1982, 140 p. (In Russian)
- Orehkova N.A., Konovalov S.K. Polarography of the bottom sediments in the Sevastopol Bay, *Physical Oceanography*, 2009, no. 19(2), p. 111–123, DOI: 10.1007/s11110-009-9038-6.
- Ovsyanyi E.I., Romanov A.S., Ignatieva O.G. Raspredele-nie tyazhelykh metallov v poverkhnostnom sloe donnykh osadkakh Sevastopol'skoi bukhty (Chernoe more) [Distribution of heavy metals in superficial layer of bottom sediments of Sevastopol Bay (the Black Sea)], *Morskoy Ekologicheskij Zhurnal*, 2003, no. 2(2), p. 85–93. (In Russian)
- Ovsyanyi E.I., Konovalov S.K., Mitropol'skii A.Yu., Kotelyanets E.A. Organicheskie uglerod i karbonatnost' sovremennykh donnykh otlozhenii Kerchenskogo proliva [Organic carbon and carbonates in the recent bottom sediments of the Kerch Strait] *Geokhimiya*, 2015, no. 12, p. 1120–1131, EDN UVEMQL, DOI: 10.7868/S0016752515120079. (In Russian)

- Petelin V.P. *Granulometricheskii analiz morskikh donnykh osadkov* [Granulometric analysis of marine bottom sediments], Moscow, Nauka Publ., 1967, p. 128. (In Russian)
- Romanov A.S., Orekhova N.A., Ignat'eva O.G. et al. Vliyanie fiziko-khimicheskikh kharakteristik donnykh osadkov na raspredelenie mikroelementov na primere bukht Sevastopolya (Chernoe more) [Influence of physico-chemical characteristics of the bottom sediments on the trace elements distribution by the example of Sevastopol bays (Black Sea)], *Ekologiya morya*, 2007, vyp. 73, p. 85–90. (In Russian)
- Tankéré P.C., Muller F.L., Burton J.D. Trace metal distributions in shelf waters of the northwestern Black Sea, *Continental Shelf Research*, 2001, vol. 21, iss. 13–14, p. 1501–1532, DOI: 10.1016/S0278-4343(01)00013-9.
- Tikhonova E.A., Kotelyanets E.A. [Long-term dynamics of pollution of bottom sediments of the Sevastopol coast (case study of the Kazachya Bay, Black Sea)], *Kompleksnye issledovaniya Mirovogo okeana (KIMO-2017)* [Complex investigation of the World Ocean], Moscow, 2017, p. 48–49. (In Russian)
- Vinogradov A.P. Srednee sodержanie khimicheskikh elementov v gornykh porodakh [Average concentrations of chemical elements in rocks], *Geokhimiya*, 1962, no. 7, p. 555–571. (In Russian)
- Web source*
- Bat L., Yesim Ö.E., Can Ö.H. The contamination status of trace metals in Sinop coast of the Black Sea, Turkey, *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 2015, vol. 13, iss. 1, p. 1–10, URL: [https://cjes.guilan.ac.ir/article\\_112\\_4a666ae9d2870de30036717ef4f9a5d0.pdf](https://cjes.guilan.ac.ir/article_112_4a666ae9d2870de30036717ef4f9a5d0.pdf) (access date 15.02.2023).
- Eckert S., Schnetger B., Brumsack H.-J. Trace metal patterns in Black Sea sapropels as a chemostratigraphic tool, *Geophysical Research Abstracts*, 2009, vol. 11, EGU2009-9371, URL: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2009/EGU2009-9371.pdf> (access date 15.02.2023).
- Slukovskii Z.I. *Ekologo-geokhimicheskii analiz sostoyaniya donnykh otlozhenii malykh rek urbanizirovannykh territorii (na primere goroda Petrozavodsk)* [Ecological and geochemical analysis of the state of bottom sediments of small rivers of urbanized territories (case study of the city of Petrozavodsk)], Abstract of the candidate's dissertation in biology, Petrozavodsk, 2014, URL: <https://www.dissercat.com/content/ekologo-geokhimicheskii-analiz-sostoyaniya-donnykh-otlozhenii-malykh-rek-urbanizirovannykh-t> (access date 15.02.2023). (In Russian)

Received 25.07.2023

Revised 16.01.2024

Accepted 24.04.2024

## ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ МАЗУТА В ПОЧВАХ КРЫМА

А.А. Кузина<sup>1</sup>, Т.В. Минникова<sup>2</sup>, В.Г. Гайворонский<sup>3</sup>, С.Ю. Ревина<sup>4</sup>, С.И. Колесников<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 4, 5</sup> Южный федеральный университет, Академия биологии и биотехнологий имени Д.И. Иванковского, кафедра экологии и природопользования

<sup>3</sup> Южный федеральный университет, Академия физической культуры и спорта, кафедра теоретических основ физического воспитания

<sup>1</sup> Ст. науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: nyuta\_1990@mail.ru

<sup>2</sup> Вед. науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: loko261008@yandex.ru

<sup>3</sup> Доц., канд. биол. наук; e-mail: vggayvoronskiy@sfedu.ru

<sup>4</sup> Магистр; e-mail: soffy.soff@mail.ru

<sup>5</sup> Зав. кафедрой, д-р с.-х. наук; e-mail: kolesnikov1970@list.ru

На территории Крымского полуострова расположены уникальные типы и подтипы почв. Возрастающая туристическая нагрузка на регион требует увеличения производительности всех отраслей, в том числе нефтеперерабатывающей. Все это увеличивает риски разлива и утечки нефти и нефтепродуктов при их транспортировках и перекачке. В сфере нормирования загрязнения почв нефтепродуктами (валового содержания) существует большой пробел, заключающийся в отсутствии предельно-допустимой концентрации в нормативной базе Российской Федерации. Для прогнозирования возможных негативных последствий загрязнения окружающей среды нефтью и нефтепродуктами необходима разработка региональных экологически безопасных концентраций нефти и нефтепродуктов, при расчете которых учтены местные региональные эколого-геохимические особенности типов почв. Цель исследования – провести лабораторное моделирование экологически безопасных концентраций мазута в почвах Крыма. Загрязнение мазутом (1, 5 и 10% от массы почвы) моделировали в лабораторных условиях. В исследовании было изучено семь типов почв Крыма: чернозем остаточно-карбонатный, чернозем слитой солонцеватый, темно-каштановая солонцеватая, коричневая карбонатная, коричневая выщелоченная красноцветная, бурая лесная кислая почвы и чернозем неполноразвитый. По истечению 30 суток модельного эксперимента в почвенных образцах определяли наиболее информативные биологические показатели: биохимические (активность каталазы, дегидрогеназ), микробиологические (общая численность почвенных бактерий, обилие бактерий рода *Azotobacter*) и фитотоксические (длина корней) показатели. Установлено, что загрязнение мазутом негативно сказалось на биологических свойствах исследуемых почв Крыма. Получен ряд устойчивости почв к загрязнению мазутом: чернозем остаточно-карбонатный  $\geq$  чернозем слитой солонцеватый = темно-каштановая солонцеватая = коричневая выщелоченная красноцветная  $\geq$  чернозем неполноразвитый  $\geq$  коричневая карбонатная почва > бурая лесная кислая почва. Получены значения предельно допустимых уровней остаточного содержания мазута (ПДОС<sub>м</sub>) в почвах Крыма: в черноземе остаточно-карбонатном составляет 0,33%, в темно-каштановой солонцеватой почве и черноземе слитом солонцеватом – 0,30%, в коричневой карбонатной почве – 0,28%, в коричневой выщелоченной красноцветной почве – 0,35%, в черноземе неполноразвитом – 0,33%, в бурой лесной кислой почве – 0,21%. Результаты исследования возможно использовать при биодиагностике экологического состояния и здоровья почв при загрязнении мазутом.

**Ключевые слова:** загрязнение, моделирование, фитотоксичность, ферментативная активность, микробиологические показатели

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.7

### ВВЕДЕНИЕ

Мазут – это конечный продукт переработки нефти, который является самой тяжелой фракцией. Этот нефтепродукт так же, как и остальные жидкие продукты переработки нефти, оказывает определенное негативное воздействие на человека и окружающую среду, в частности на почву [García et al., 2019; Shah et al., 2003; Karkush, Abdul Kereem, 2018; Jayasinghe et al., 2022]. Компоненты нефти имеют

гидрофобный состав, и их внесение в почву приводит к изменению не только химических, но и физических свойств [Marin-Garcia et al., 2016; Gordon et al., 2018; Vodyanitskii et al., 2016; Булуктаев, 2017; Dindar et al., 2015; Ofori, 2021], что влечет за собой ухудшение аэрации, снижение иммобилизации элементов питания и реакции почвенной среды (pH) [Shukry et al., 2013; Коршунова и др., 2019]. Эти изменения ведут к нарушению биологического равно-

веса почвы, которое выражается в угнетении жизнедеятельности микроорганизмов [Li et al., 2022; Minnikova et al., 2022]. Таким образом, почва становится менее продуктивной [Salam et al., 2022].

В сфере нормирования загрязнения почв нефтепродуктами (валового содержания) существует большой пробел, заключающийся в отсутствии предельно допустимой концентрации в нормативной базе Российской Федерации [Околелова и др., 2015; Ковалева и др., 2022]. Для прогнозирования возможных негативных последствий разливов нефтепродуктов и проникновения их в окружающую среду необходима разработка региональных экологически безопасных концентраций, в которых будут учитываться местные эколого-геохимические особенности почв. В настоящее время при стандартизации и оценке состояния окружающей среды большое внимание уделяется экологическому подходу. Наиболее чувствительные и информативные биологические показатели выбираются для оценки экотоксичности нефтепродуктов и нарушения экологических функций почв [Гайворонский и др., 2023; Minnikova et al., 2019; Ковалева, Яковлев, 2018; Newelke et al., 2018; Колесников и др., 2010].

Крымский полуостров – развивающийся, перспективный туристический регион России. На территории Крымского полуострова расположены уникальные типы и подтипы почв Юга России: солонцовые, солончаковые, суглинистые почвы Присивашья, каштановые и черноземные почвы степной части полуострова Крым, горно-лесные и горно-луговые почвы предгорий и гор, шиферные, известковые и суглинистые почвы Южного берега Крыма [Сухачева, Ревина, 2020]. Кроме того, на территории полуострова можно встретить более двух тысяч видов различных растений. Несмотря на это, регион подвержен значительной антропогенной нагрузке [Демченко, Полякова, 2020; Государственный доклад..., 2023]. Начиная с 2020 г., благодаря завершению строительства дороги федерального значения «Таврида», значительно увеличился поток автотранспорта к рекреационным объектам, возросло строительство новых туристических объектов, автомобильных дорог и нефтепроводов [Коптилов, 2020; Калашников, 2021]. Утечки и проливы нефтепродуктов при аварийных ситуациях на нефтебазах могут привести к существенному загрязнению окружающей территории [Elum et al., 2016; Dhaka, Chattopadhyay, 2021; Andrews et al., 2021; Zhang et al., 2019]. При таких утечках возможно накопление нефтепродуктов в почвенном профиле, миграция и попадание в грунтовые воды рек и озер. Возрастающая туристическая нагрузка на регион требует повышения производительности всех отраслей, в том числе нефтеперерабатывающей. Все

это увеличивает риски разлива и утечки нефтепродуктов при транспортировках и перекачке [Bolade et al., 2021; Haider et al., 2021; Klemz et al., 2021].

Цель исследования – провести лабораторное моделирование экологически безопасных концентраций мазута в почвах Крыма. Для осуществления цели исследования были поставлены следующие задачи: 1) оценить экологическое состояние почв Крыма после загрязнения мазутом по биологическим показателям; 2) рассчитать интегральный показатель биологического состояния почв; 3) рассчитать и проанализировать предельно допустимое остаточное содержание мазута в почвах Крыма.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Объекты исследования.** Модельные эксперименты по загрязнению мазутом были проведены для почв горного и равнинного Крыма. На картосхеме цветом указаны разнообразные типы и подтипы почв Крыма (рис. 1). В данном исследовании анализировано загрязнение мазутом семи типов почв. Образцы почв были отобраны в октябре 2021 г. Для модельного эксперимента по химическому загрязнению было отобрано по 30 кг каждой почвы в типичном месте для каждого типа почв. Основные характеристики исследуемых почв были определены на кафедре экологии и природопользования и представлены в табл. 1. Содержание органического вещества в почве определяли по методу И.В. Тюрина, реакцию почвенной среды – потенциометрически, гранулометрический состав почвы по методу Н.А. Качинского [Практикум по почвоведению..., 1986]. Для модельных экспериментов использовали почву из верхнего слоя Апах – 0–15 см. Как видно из табл. 1, почвы различаются по своим свойствам [Вальков и др., 2008; Казеев, Колесников, 2015], а значит, можно предположить, что и по устойчивости к их загрязнению мазутом.

**Мазут.** Для моделирования загрязнения почв Крыма мазутом в предварительно увлажненную почву (с учетом объема мазута до 30%) вносили мазут в весовой концентрации 1% (небольшое загрязнение), 5% (среднее загрязнение) и 10% (высокий уровень загрязнения) от массы почвы. Такое загрязнение почвы мазутом часто встречается в районах добычи, транспортировки и переработки нефти даже после ликвидации загрязнения. В табл. 2 представлены основные физико-химические показатели мазута.

**Модельный эксперимент.** Вегетационные сосуды с почвой закладывали в трехкратной повторности. Инкубирование почвы проводили при температуре воздуха равной 20–22°C и 25%-й влажности почвы в течение 30 суток. Выбор такого периода инкубации как периода, при котором происходит снижение/ингибирование биологических

показателей, обусловлен нашими предыдущими исследованиями [Kolesnikov et al., 2019; Кузина и др., 2021]. На основе этих исследований были выбраны наиболее информативные показатели: активность каталазы, дегидрогеназ, общая численность почвенных бактерий, обилие бактерий рода *Azotobacter*, длина корней редиса (табл. 3). На основании полученных данных биологических показателей по каждому варианту был рассчитан интегральный показатель биологического состояния почвы (ИПБС)

[Kolesnikov et al., 2019]. Расчет ИПБС проводили по формуле (1), значение каждого показателя в контроле принято за 100%:

$$\text{ИПБС} = (A_{\text{кат}} + A_{\text{дг}} + B + A_z + D_k) / N, \quad (1)$$

где  $A_{\text{кат}}$  – активность каталазы;  $A_{\text{дг}}$  – активность дегидрогеназ;  $B$  – общая численность почвенных бактерий;  $A_z$  – обилие бактерий рода *Azotobacter*, %;  $D_k$  – длина корней, мм;  $N$  – число показателей.

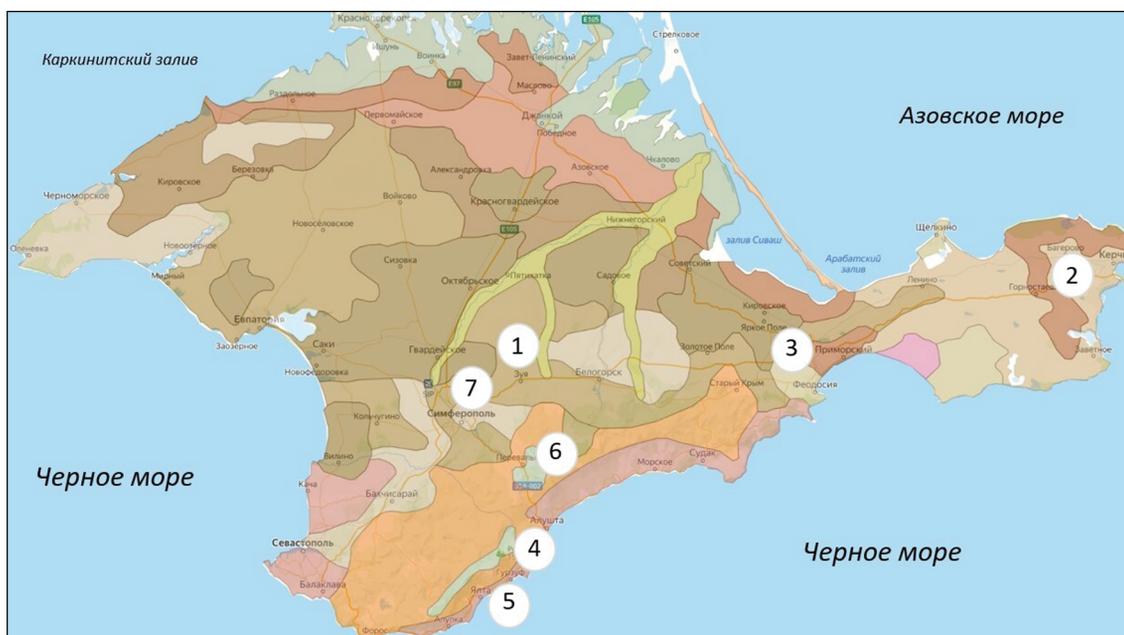


Рис. 1. Карта-схема с расположением точек отбора почв Крыма: 1 – чернозем остаточно-карбонатный; 2 – чернозем слитой солонцеватый; 3 – темно-каштановая солонцеватая; 4 – коричневая карбонатная; 5 – коричневая выщелоченная красноцветная; 6 – буряя лесная кислая; 7 – чернозем неполноразвитый

Fig. 1. Schematic map with the location of soil sampling points in Crimea: 1 – Leptic Chernozems Skeletic; 2 – Mollic Vertisols Eutric; 3 – Endosalic Kastanozems Sodic; 4 – Haplic Cambisols Eutric; 5 – Haplic Cambisols Eutric; 6 – Haplic Cambisols Eutric; 7 – Mollic Leptosols Eutric

Для оценки достоверности влияния загрязнения на исследуемые показатели использовали дисперсионный анализ. Для удобства интерпретации результатов дисперсионного анализа была вычислена наименьшая существенная разность (НСР). Для оценки тесноты связи между изменением ИПБС и биологическими показателями рассчитывали коэффициент корреляции Спирмена (ненормальное распределение). Статистическая обработка результатов исследования проводилась с помощью программы Statistica 12.0.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Общая численность бактерий.** В результате модельного загрязнения почв Крыма мазутом было установлено, что внесение 1% мазута достоверно

не снижает общую численность бактерий в черноземе неполноразвитом (рис. 2А). В коричневой карбонатной, коричневой выщелоченной красноцветной и темно-каштановой солонцеватой почвах отмечено снижение на 26, 27 и 28% соответственно. В бурой лесной кислой и черноземе остаточно-карбонатном – на 30% и 43% – в черноземе слитом солонцеватом. При добавлении 5% мазута зафиксировано уменьшение общей численности бактерий на 40% в черноземе неполноразвитом, на 46, 49, 50, 52 и 54% – в коричневой карбонатной, темно-каштановой солонцеватой, коричневой выщелоченной красноцветной, в черноземе остаточно-карбонатном и черноземе слитом солонцеватом соответственно. В бурой лесной кислой – на 61%. При внесении 10% мазута общая численность бактерий снизилась на 58% в черноземе неполноразвитом, в черноземе

Таблица 1

Основные характеристики почв Крыма

№ п/п	Название почв	Название почв по WRB [IUSS, 2022]	Место отбора почвы	Экосистема	pH	Гранулометрический состав	$C_{орг}$ , %	Численность бактерий, млрд/г	Активность каталазы, мкг/г/мин	Активность дегидрогеназ, мкг ТФФ/г/24 ч	Обилие бактерий рода <i>Azotobacter</i> , % комочков обрастания
1	Чернозем остаточно-карбонатный	Leptic Chernozems Skeletic	Белгородский район, с. Крым-роза	Пашня	7,8	Тяжелосуглинистый	3,1	5,4	8,9	19,3	100
2	Чернозем слитый солонцеватый	Mollic Vertisols Eutric	Ленинский район, с. Горностаевка	Пашня	7,9	Тяжелосуглинистый	3,3	4,6	9,0	19,1	100
3	Темно-каштановая солонцеватая	Endosalic Kastanozems Sodic	Ленинский район, с. Батальное	Пашня	7,5	Тяжелосуглинистый	3,7	3,7	7,0	13,0	79
4	Коричневая карбонатная	Halpic Cambisols Eutric	Городской округ г. Алушты, с. Кипарисное	Виноградник	7,8	Тяжелосуглинистый	1,7	3,5	6,9	10,9	49
5	Коричневая выщелоченная красноцветная	Halpic Cambisols Eutric	Район городского округа г. Ялты, заповедник «Мыс Мартыан»	Можжевельное редколесье	6,9	Глинистый	3,1	4,5	11,7	18,6	56
6	Бурая лесная кислая	Halpic Cambisols Eutric	Район Ангарского перевала	Буковый лес	5,3	Тяжелосуглинистый	1,4	2,7	5,4	10,2	22
7	Чернозем неполноразвитый	Mollic Leptosols Eutric	Симферопольский район, с. Трудовое	Пашня	7,9	Тяжелосуглинистый	2,6	4,5	7,7	13,3	100

слитом солонцеватом, темно-каштановой солонцеватой, коричневой карбонатной, черноземе остаточного-карбонатном – на 61, 63, 66, 67% соответственно. В бурой лесной кислой – на 74%.

При загрязнении 1% мазута в черноземе неполноразвитом, коричневой карбонатной и коричневой выщелоченной красноцветной почвах не зафиксировано достоверных изменений обилия бактерий рода *Azotobacter* (рис. 2Б). В черноземе остаточного-карбонатном, в черноземе слитом солонцеватом, в темно-каштановой солонцеватой почве и в бурой лесной кислой почвах отмечено снижение этого показателя на 13, 18, 24 и 31% соответственно. При внесении 5% мазута снижение обилия бактерий

рода *Azotobacter* отмечалось в коричневой выщелоченной красноцветной почве на 15%, в черноземе неполноразвитом и коричневой карбонатной, в черноземе слитом солонцеватом и темно-каштановой солонцеватой почвах – на 24, 26, 31 и 33% соответственно. В черноземе остаточного-карбонатном – на 40%. При загрязнении 10% мазута наблюдалось снижение обилия бактерий рода *Azotobacter* в коричневой выщелоченной красноцветной почве на 27%, в черноземах неполноразвитом, остаточного-карбонатном, черноземе слитом солонцеватом, темно-каштановой солонцеватой и коричневой карбонатной почвах на 35, 45, 46, 48 и 53% соответственно. В бурой лесной кислой почве – на 81%.

Таблица 2

### Физико-химические показатели мазута

№ п/п	Наименование показателя	Значение
1	Плотность при 20°C, кг/м <sup>3</sup>	923,4
2	Вязкость условная при 80°C, градусы	3,8
3	Температура застывания, °C	15
4	Массовая доля серы, %	1,71
5	Зольность, %	0,06

Таблица 3

### Методы оценки биологической активности почвы

Наименование биологического показателя	Метод, единицы измерения
Активность каталазы	Волюметрическим методом по скорости разложения 3% раствора перекиси водорода при контакте с почвой, мл O <sub>2</sub> за 1 мин в 1 г почвы
Активность дегидрогеназ	Колориметрическим методом по преобразованию трифенилтетразолия хлористого в трифенилформазаы, в мг трифенилформазаы за 24 ч в 10 г почвы
Общая численность почвенных бактерий	Подсчет общей численности бактерий методом люминесцентной микроскопии в падающем свете, в млрд/г почвы
Обилие бактерий рода <i>Azotobacter</i>	Методом подсчета комочков почвы обрастания бактериями рода <i>Azotobacter</i> на среде Эшби, %
Длина корней редиса	Измерение длины корней редиса по окончании 7 суток вегетационного эксперимента, мм

**Ферментативная активность.** Активность каталазы достоверно снизилась при добавлении 1% мазута в черноземе неполноразвитом на 12%, в коричневой карбонатной – на 15%, в черноземе слитом солонцеватом – на 17%, в темно-каштановой солонцеватой – на 20% и в бурой лесной кислой – на 35% (рис. 3А). При внесении 5% мазута зафиксировано уменьшение активности каталазы на 25% в коричневой выщелоченной красноцветной почве, в темно-каштановой солонцеватой, коричневой карбонатной почвах и черноземе неполноразвитом со-

ответственно – на 34, 36, 38%. В черноземе слитом солонцеватом, в бурой лесной кислой и черноземе остаточного-карбонатном – на 46, 48 и 49% соответственно. При загрязнении 10% мазута наблюдалось уменьшение активности каталазы на 51, 52, 53, 54% в коричневой выщелоченной красноцветной, бурой лесной кислой, черноземе неполноразвитом, коричневой карбонатной почвах соответственно. В темно-каштановой солонцеватой – на 67%, а в черноземе слитом солонцеватом и черноземе остаточного-карбонатном – на 76 и 78% соответственно.

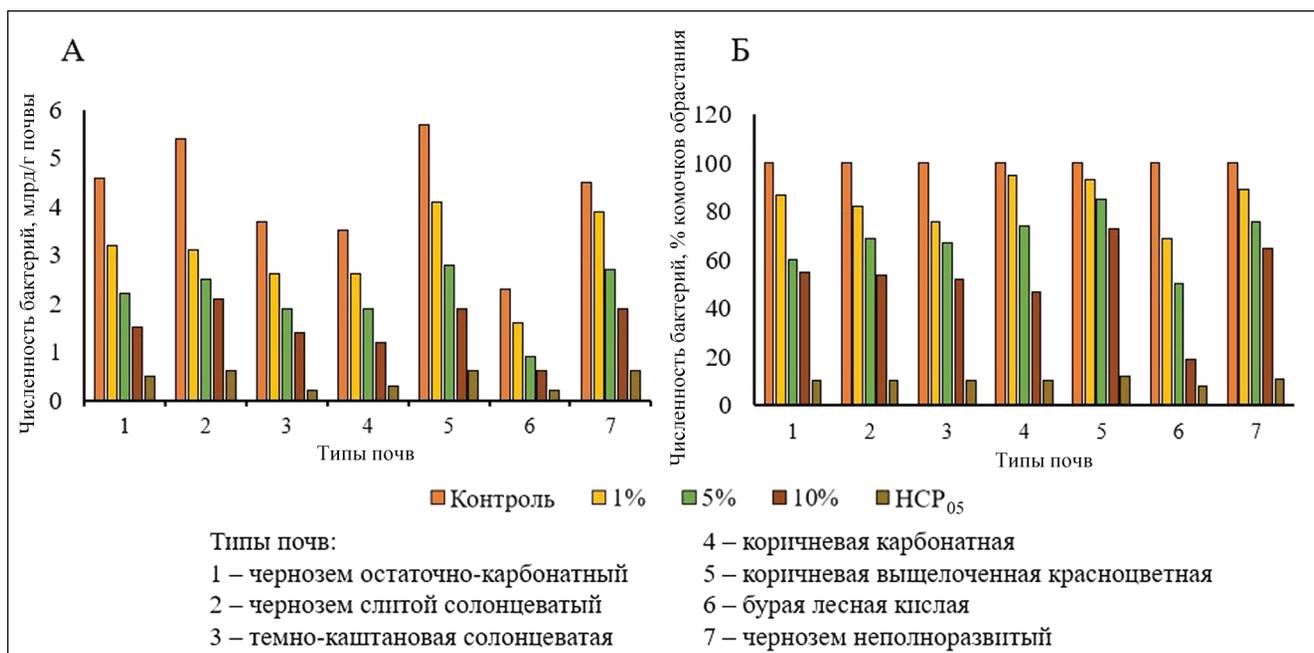


Рис. 2. Изменение микробиологических показателей в почвах Крыма после загрязнения мазутом: А – общая численность бактерий, млрд/г; Б – обилие бактерий рода *Azotobacter*, % комочков обрастания

Fig. 2 Changes of microbiological indicators in the soils of Crimea after fuel oil pollution: А – total number of bacteria, billion/g; Б – the abundance of bacteria of the *Azotobacter* genus, % of the lumps of fusing

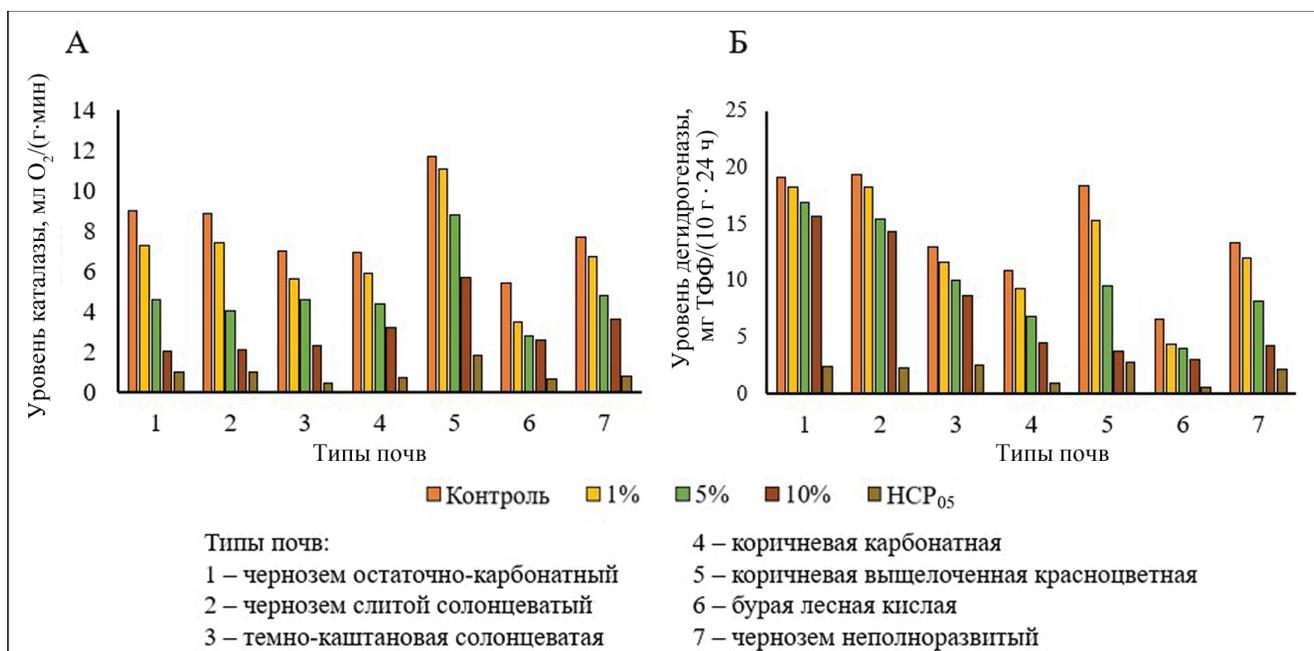


Рис. 3. Изменение ферментативной активности в почвах Крыма после загрязнения мазутом:

А – каталазы, мл O<sub>2</sub>/(г·мин); Б – дегидрогеназы, мг ТФФ/(10 г·24 ч)

Fig. 3. Change in enzymatic activity in the soils of Crimea after fuel oil pollution:

А – of catalase, ml O<sub>2</sub>/(g·min); Б – of dehydrogenases, mg TPF/(10 g·24 hours)

Активность дегидрогеназ достоверно не изменилась в черноземах остаточно-карбонатном, слитом солонцеватом, неполноразвитом и темно-каштановой солонцеватой почве при добавлении 1% мазута (см. рис. 3Б). В коричневой карбонатной и коричневой выщелоченной красноцветной почвах при

такой концентрации мазута активность дегидрогеназ снизилась на 14 и 17% соответственно. В бурой лесной кислой – на 33%. Загрязнение мазутом 5% достоверно снизило активность дегидрогеназ в черноземе слитом солонцеватом на 20%, в темно-каштановой солонцеватой почве – на 27%, в черно-

земе неполноразвитом – на 38%, в бурой лесной кислой – на 40%, в коричневой выщелоченной красноцветной – на 48% соответственно. При внесении 10% мазута зафиксировано снижение активности дегидрогеназы на 18% в черноземе остаточного-карбонатного, в черноземе слитом солонцеватом – на 26%, в темно-каштановой солонцеватой почве – на 33%, в бурой лесной кислой – на 53%, в черноземе неполноразвитом – на 67% и в коричневой выщелоченной красноцветной почве – на 79%.

**Длина корней редиса.** Длина корней редиса при внесении 1% мазута снизилась на 12, 19, 21 и 23% в коричневой выщелоченной красноцветной, черноземе остаточного-карбонатного, черноземе слитом солонцеватом и темно-каштановой солонцеватой почвах соответственно (табл. 4). В черноземе неполноразвитом отмечено уменьшение длины корней редиса на 31%, в бурой лесной кис-

лой на 36%, а в коричневой карбонатной на 44%. Загрязнение 5% мазута снизило длину корней редиса в черноземе слитом солонцеватом и остаточного-карбонатном на 25 и 28% соответственно. В темно-каштановой солонцеватой отмечалось снижение показателя на 35%, в коричневой выщелоченной красноцветной почве – на 43%, в бурой лесной кислой – на 49%. В коричневой карбонатной почве и черноземе неполноразвитом отмечено снижение длины корней редиса на 60 и 62% соответственно. При внесении 10% мазута длина корней редиса снизилась на 33% в черноземе остаточного-карбонатном, в черноземе слитом солонцеватом – на 53%, в темно-каштановой солонцеватой – на 63%, в бурой лесной кислой, коричневой карбонатной, коричневой выщелоченной красноцветной и черноземе неполноразвитом – на 71, 72, 74 и 76% соответственно.

Таблица 4

#### Изменение длины корней редиса в почвах Крыма после загрязнения мазутом, % от контроля

Тип почв	Контроль	Концентрация мазута, %			НСР <sub>05</sub> *
		1	5	10	
Чернозем остаточного-карбонатный	100	81	72	67	10
Чернозем слитой солонцеватый	100	79	75	47	7
Темно-каштановая солонцеватая почва	100	77	65	37	10
Коричневая карбонатная	100	56	40	18	7
Коричневая выщелоченная красноцветная почва	100	88	57	24	10
Бурая лесная кислая почва	100	64	51	29	7
Чернозем неполноразвитый	100	69	38	26	8

*Примечание.* \*НСР<sub>05</sub> – наименьшая существенная разность, величина, указывающая границу возможных случайных отклонений в эксперименте при 5%-м уровне значимости.

**Интегральный показатель биологического состояния почв Крыма при загрязнении мазутом.** На основе полученных показателей были рассчитаны ИПБС почв Крыма, которые отражают чувствительность биологических показателей почвы к внесению мазута (табл. 5). Был получен следующий ряд устойчивости почв к загрязнению мазутом: чернозем остаточного-карбонатный (66) ≥ чернозем слитой солонцеватый (63) = темно-каштановая солонцеватая почва (63) = коричневая выщелоченная красноцветная почва (63) ≥ чернозем неполноразвитый (62) ≥ коричневая карбонатная почва (58) > бурая лесная кислая почва (50). Для интерпретации полученного ряда был проведен корреляционный анализ между ИПБС почв и изменением биологических показателей. Установлено, что общая численность бактерий почв и обилие бактерий рода *Azotobacter* сильно коррелируют со значениями ИПБС (коэф-

фициент корреляции 0,89 и 0,85 соответственно). Чем выше показатели биологической активности (численность бактерий), тем, по-видимому, быстрее происходит разложение мазута, почва более устойчива к загрязнению. Также высокая корреляция отмечается между показателями  $C_{орг}$  и рН (0,86 и 0,81 соответственно). От содержания  $C_{орг}$  в почве зависят показатели биологической активности, поэтому наблюдается тесная корреляция между  $C_{орг}$  и ИПБС почв. Что касается рН почв, то механизмов, объясняющих связь рН с устойчивостью к загрязнению мазутом в литературных данных нами не найдено. Поскольку все исследуемые почвы Крыма имеют один гранулометрический состав (исключение – коричневая выщелоченная красноцветная почва с глинистым гранулометрическим составом), то на различие в их устойчивости к загрязнению мазутом гранулометрический состав существенной роли не

оказывает. Таким образом, самым устойчивым типом почв Крыма к загрязнению мазутом является чернозем остаточно-карбонатный. Данная почва имеет высокую биологическую активность, способствующую более быстрому разложению мазута, показатель  $pH = 7,8$  и  $C_{орг} = 3,1$ . Наименьшей устойчивостью обладает бурая лесная кислая почва. Это объясняется кислой реакцией среды ( $pH = 5,3$ ) и небольшим содержанием органического вещества  $C_{орг} = 1,4$ , низ-

кой биологической активностью [Колесников и др., 2019а; Дауд и др., 2019]. Такая же тенденция по чувствительности чернозема остаточно-карбонатного и наименьшей чувствительности бурой лесной почвы была обнаружена ранее при анализе экотоксичности свинца, хрома, меди, никеля для почв Крыма [Колесников и др., 2019б]. Низкая устойчивость бурых лесных почв была также ранее установлена в [Duan et al., 2020; Dospatliev, Ivanova, 2018].

Таблица 5

**Изменение интегрального показателя биологического состояния почв Крыма после загрязнения мазутом, % от контроля**

Тип почв	Контроль	Концентрация мазута, %			Среднее значение
		1	5	10	
Чернозем остаточно-карбонатный	100	83	64	52	66
Чернозем слитой солонцеватый	100	79	63	48	63
Темно-каштановая солонцеватая	100	79	65	45	63
Коричневая карбонатная	100	79	59	37	58
Коричневая выщелоченная красноцветная	100	86	64	40	63
Бурая лесная кислая	100	67	50	34	50
Чернозем неполноразвитый	100	85	60	43	62

Проведенное исследование позволило определить предельно-допустимое остаточное содержание мазута ( $ПДОС_m$ ) в почвах Крыма (табл. 6). На основе уравнений регрессии, отражающих зависимость ИПБС каждой исследованной почвы от содержания в ней мазута, были установлены концентрации мазута, при которых наблюдается сбой той или иной группы экологических функций, также степень ухудшения сельскохозяйственных функций. Классификация экосистемных функций почвы дана по Г.В. Добровольскому и Е.Д. Никитину (2006). Была использована установленная ранее [Kolesnikov et al., 2019] шкала: снижение ИПБС менее чем на 5% не приводит к нарушению экологических функций почвы, на 5–10% диагностирует нарушение информационных функций, на 10–25% – биохимических, физико-химических, химических и целостных, более чем на 25% – физических. В качестве  $ПДОС_m$  была выбрана та концентрация, при которой нарушаются экологические функции почвы. Соответственно, как видно из табл. 6, в черноземе остаточно-карбонатном  $ПДОС_m$  составляет 0,33%, в темно-каштановой солонцеватой и черноземе слитом солонцеватом – 0,30%, в коричневой карбонатной почве – 0,28%, в коричневой выщелоченной красноцветной почве – 0,35%, в черноземе неполноразвитом – 0,33%, в бурой лесной кислой почве – 0,21%. В работе М.В. Быковой (2019) проводится сравнение допустимых концентраций нефтепродук-

тов, в том числе со ссылкой на документ от 27 декабря 1993 г. «Порядок определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами»<sup>1</sup>. В документе говорится, что допустимый уровень загрязнения варьирует от 0,1 до 0,2%. При повышении значения допустимого содержания нефти более 0,2% загрязнения уровень воздействия увеличивается. В нашем исследовании такому уровню загрязнения (0,1–0,2%) соответствует уровень нарушения почвой информационных функций, таких как передача сигнала о сезонных и других биологических процессах, регуляция численности, состава и структуры биоценоза [Добровольский, Никитин, 2006; Ashraf et al., 2014].

Экологически безопасные концентрации мазута для почв Крыма возможно применять для оценки вероятных антропогенных последствий при утечке мазута. Исследования почв этого региона необходимо продолжить, используя другие химические вещества, часто встречающиеся на этой территории (тяжелые металлы, металлоиды, неметаллы, антибиотики, пестициды, нефть, бензин, мазут, дизельное топливо, ароматические углеводороды). Акту-

<sup>1</sup> Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов Российской Федерации (от 27 декабря 1993 г. № 04-25), Комитет Российской Федерации по земельным ресурсам и землеустройству (от 27 декабря 1993 г. № 61-5678) «О порядке определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами» [<https://docs.cntd.ru/document/9033369>].

ально исследовать различные концентрации этих веществ с целью определения пределов устойчивости почв. В дальнейшем перспективно изучать загрязнение почв с разными сроками экспозиции (от 10 до 365 дней), чтобы оценить процесс изменения биологических показателей в динамике.

### ВЫВОДЫ

В результате лабораторного моделирования загрязнения мазутом основных почв Крыма установлено ухудшение биологических свойств почв при загрязнении. Негативное воздействие увеличивается при росте концентрации мазута в почве.

Был получен следующий ряд устойчивости почв Крыма к загрязнению мазутом: чернозем остаточного-карбонатный  $\geq$  чернозем слитой солонцеватый = темно-каштановая солонцеватая почва = коричневая выщелоченная красноцветная почва  $\geq$  чернозем неполноразвитый  $\geq$  коричневая карбонатная почва  $>$  бурая лесная кислая почва. Наиболее устойчивой почвой к загрязнению мазутом является чернозем

остаточно-карбонатный, а наименее – бурая лесная кислая почва.

Проведенное исследование позволило определить предельно-допустимое остаточное содержание мазута (ПДОС<sub>м</sub>) в почвах Крыма: в коричневой выщелоченной красноцветной почве составляет 0,35%, в черноземе остаточного-карбонатном и черноземе неполноразвитом – 0,33%, в темно-каштановой солонцеватой почве и черноземе слитом солонцеватом – 0,30%, в коричневой карбонатной почве – 0,28%, в бурой лесной кислой почве – 0,21%.

Использованные в работе показатели биологического состояния почв можно рекомендовать к широкому использованию в целях мониторинга, диагностики, оценки здоровья почв и нормирования загрязнения почв мазутом, а полученные ПДОС<sub>м</sub> использовать при разработке региональных экологических нормативов содержания мазута в разных типах и подтипах почв Крыма с учетом их местных эколого-геохимических особенностей.

Таблица 6

### Предельно-допустимое остаточное содержание мазута в почвах Крыма, %

Степень снижения интегрального показателя <sup>1</sup>	<5%	5–10%	10–25%	>25%
Нарушаемые экологические функции <sup>2</sup>	–	Информационные	Химические, физико-химические, биохимические, целостные	Физические
Степень загрязнения почв	Не загрязненные	Слабозагрязненные	Среднезагрязненные	Сильнозагрязненные
Чернозем остаточного-карбонатный	<0,20	0,20–0,33	<b>0,33</b> <sup>3</sup> –1,45	>1,45
Чернозем слитой солонцеватый	<0,19	0,19–0,30	<b>0,30</b> –1,18	>1,18
Темно-каштановая солонцеватая почва	<0,19	0,19–0,30	<b>0,30</b> –1,15	>1,15
Коричневая карбонатная почва	<0,19	0,19–0,28	<b>0,28</b> –0,92	>0,92
Коричневая выщелоченная красноцветная почва	<0,24	0,24–0,35	<b>0,35</b> –1,20	>1,20
Буряя лесная кислая почва	<0,14	0,14–0,21	<b>0,21</b> –0,60	>0,60
Чернозем неполноразвитый	<0,22	0,22–0,33	<b>0,33</b> –1,15	>1,15

Примечания. <sup>1</sup> [Kolesnikov et al., 2019].

<sup>2</sup> [Добровольский, Никитин, 2006].

<sup>3</sup> Жирным шрифтом выделены значения ПДОС<sub>м</sub>.

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта Программы стратегического академического лидерства Южного федерального университета («Приоритет 2030») (№ СП-12-23-01), исследование выполнено в международной лаборатории «Здоровье почв» Южного федерального университета при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2022-1122), проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по поддержке молодежной лаборатории в рамках межрегионального НОЦ Юга России (FENW-2024-0001).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Быкова М.В. Проблема нормирования при оценке уровня загрязнения почв нефтепродуктами // Вестник евразийской науки. 2019. № 11(6). С. 90.
- Булуктаев А.А. Фитотоксичность и ферментативная активность почв Калмыкии в условиях нефтяного загрязнения // Юг России: экология, развитие. 2017. № 12. С. 147–156. DOI: 10.18470/1992-1098-2017-4-147-156.
- Вальков В.Ф., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Почвы Юга России. Ростов н/Д: Эверест, 2008. 276 с.
- Водяницкий Ю.Н., Трофимов С.Я., Шоба С.А. Перспективные подходы к очистке почв и почвенно-грунтовых вод от углеводородов (обзор) // Почвоведение. 2016. № 6. С. 755–764. DOI: 10.7868/S0032180X16040158.
- Гайворонский В.Г., Колесников С.И., Кузина А.А. и др. Изменение активности каталазы в почвах Крыма при загрязнении мазутом // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2023. №1 (217). С. 137–141. DOI: 10.18522/1026-2237-2023-1-137-141.
- Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Республике Крым и городе федерального значения Севастополе в 2022 году». Симферополь, 2023. 337 с.
- Дауд Р.М., Колесников С.И., Кузина А.А. и др. Разработка региональных предельно допустимых концентраций нефти в почвах аридных экосистем Юга России // Экология и промышленность России. 2019. № 23. Вып. 9. С. 66–71. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-9-66-71.
- Демченко Н.П., Полякова Н.Ю. Об антропогенных и экономических факторах экологического состояния Крыма // Экономика строительства и природопользования. 2020. № 2(75). С. 5–14. DOI: 10.37279/2519-4453-2020-2-5-14.
- Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Экология почв. Учение об экологических функциях почв. М.: Наука, 2006. 362 с.
- Казеев К.Ш., Колесников С.И. Атлас почв Азово-Черноморского бассейна. Ростов н/Д: Изд-во Южного федерального ун-та, 2015. 80 с.
- Калашиников А.С. Трасса А-291 «Таврида»: путь от идеи к реализации // Бюллетень государственной экспертизы. 2021. С. 69–72.
- Ковалева Е.И., Трофимов С.Я., Шоба С.А. Реакция высших растений на уровень загрязнения почвы нефтью в вегетационном эксперименте // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17: Почвоведение. 2022. № 3. С. 74–84.
- Ковалева Е.И., Яковлев А.С. Модель экологической регуляции нефтезагрязненных почв путем изменения некоторых биогеоценологических функций // Экология и промышленность России. 2018. № 11. С. 34–39.
- Колесников С.И., Азнаурян Д.К., Казеев К.Ш. и др. Биологические свойства почв юга России: устойчивость к нефтяному загрязнению // Экология. 2010. Т. 41. № 5. С. 357–364.
- Колесников С.И., Вернигорова Н.А., Кузина А.А. и др. Пределы устойчивости почв и экосистем Крыма к загрязнению тяжелыми металлами // Экология и промышленность России. 2019б. № 23. Вып. 10. С. 56–60. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-10-56-60.
- Колесников С.И., Дауд Р.М., Кузина А.А. и др. Региональные нормативы содержания мазута в засушливых почвах Юга России // Охрана окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2019а. №3(288). С. 25–29.
- Коптилов А. Трасса «Таврида» по-настоящему современна и красива // Дороги России. 2020. № 4(118). С. 6–23.
- Корицунова Т.Ю., Четвериков М.Д., Бакаева М.Д. и др. Микроорганизмы в ликвидации последствий нефтяных загрязнений (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. 2019. № 55. Вып. 4. С. 338–349.
- Кузина А.А., Колесников С.И., Минникова Т.В. и др. Экологически безопасные концентрации нефти в почвах Черноморского побережья Кавказ // Экология и промышленность России. 2021. № 25. Вып. 11. С. 61–65. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-11-61-65.
- Околелова А.А., Желтобрюхов В.Ф., Тарасов А.П. и др. Особенности регулирования нефтепродуктов в почвенном покрове // Фундаментальные исследования. 2015. № 12-2. С. 315–319.
- Практикум по почвоведению / И.С. Кауричев, Н.Н. Панов, М.В. Страгонович [и др.]; под ред. И.С. Кауричева. М.: Колос, 1986. 336 с.
- Сухачева Е.Ю., Ревина Я.С. Цифровая почвенная карта южного берега Крыма // Почвоведение. 2020. № 4. С. 389–397. DOI: 10.31857/S0032180X20040140.
- Andrews N., Bennett N.J., Le Billon P. et al. Oil, Fisheries and Coastal Communities: A Review of Impacts on the Environment, Livelihoods, Space, and Governance, *Energy Research & Social Science*, 2021, no. 75, 102009, DOI: 10.1016/j.erss.2021.102009.
- Ashraf M.A., Maah M.J., Yusoff I. Soil Contamination, Risk Assessment and Remediation, *Environmental Risk Assessment of Soil Contamination*, Chapter 1, 2014, DOI: 10.5772/57287.
- Bolade O., Adeniyi K., Williams A. et al. Remediation and optimization of petroleum hydrocarbons degradation in contaminated water using alkaline activated persulphate, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, no. 9, p. 105801, DOI: 10.1016/j.jece.2021.105801.
- Dindar E., Sagban F.O.T., Baskaya H.S. Variations of soil enzyme activities in petroleum-hydrocarbon contaminated soil, *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, 2015, vol. 105, p. 268–275, DOI: 10.1016/j.ibiod.2015.09.011.
- Dhaka A., Chattopadhyay P. A review on physical remediation techniques for treatment of marine oil spills, *Journal*

- of environmental management, 2021, vol. 288, 112428, DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112428.
- Dospatliev L.K., Ivanova M. Correlation between Cambisols soil characteristics and lead content in wild edible mushrooms (*Cantharellus cibarius*, *Tricholoma equestre*, *Craterellus cornucopioides*), *Bulgarian Chemical Communications*, 2018, no. 50, p. 32–37.
- Duan C., Liu Y., Zhang H. et al. Cadmium Pollution Impact on the Bacterial Community of Haplic Cambisols in Northeast China and Inference of Resistant Genera, *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, p. 1–15, DOI: 10.1007/s42729-020-00201-5.
- Elum Z.A., Mopipi K., Henri-Ukoha A. Oil exploitation and its socioeconomic effects on the Niger Delta region of Nigeria, *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, vol. 23, p. 12880–12889, DOI: 10.1007/s11356-016-6864-1.
- García V.J., Márquez C.O., Cedeño A.R. et al. Assessing Bioremediation of Soils Polluted with Fuel Oil 6 by Means of Diffuse Reflectance Spectroscopy, *Resources*, 2019, no. 8(1), p. 36, DOI: 10.3390/resources8010036.
- Gordon G., Stavi I., Shavit U. et al. Oil spill effects on soil hydrophobicity and related properties in a hyper-arid region, *Geoderma*, 2018, vol. 312, p. 114–120, DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.10.008.
- Haider F., Liqun C., Coulter J. et al. Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, no. 211, p. 111887, DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.111887.
- Hewelke E., Szatylowicz J., Hewelke P. et al. The impact of diesel oil pollution on the hydrophobicity and CO<sub>2</sub> efflux of forest soils, *Water, Air, & Soil Pollution*, 2018, no. 229, p. 51–61, DOI: 10.1007/s11270-018-3720-6.
- IUSS Working Group. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition published in 2022 by the International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 2022, 234 p.
- Jayasinghe G.Y., Perera T.A.N.T., Bandara W.B.M.A.C. et al. A Review of Soil Injection of Liquid Organic Wastes: Potentials and Challenges, *Environ. Process.*, 2022, vol. 9, p. 37, DOI: 10.1007/s40710-022-00587-7.
- Karkush M.O., Abdul Kareem M.S. Impacts of petroleum fuel oil contamination on the geotechnical properties of fine-grained soils, *Indian Journal of Engineering*, 2018, vol. 15, p. 228–237.
- Klemz A.C., Damas M.S.P., Weschenfelder S.E. et al. Treatment of real oilfield produced water by liquid-liquid extraction and efficient phase separation in a mixer-settler based on phase inversion, *Chemical Engineering Journal*, 2020, DOI: 10.1016/j.cej.2020.127926.
- Kolesnikov S.I., Kazeev K.S., Akimenko Y.V. Development of regional standards for pollutants in the soil using biological parameters, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, no. 191, p. 544, DOI: 10.1007/s10661-019-7718-3.
- Li Y., Li C., Xin Y. et al. Petroleum pollution affects soil chemistry and reshapes the diversity and networks of microbial communities, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2022, no. 246, p. 114129, DOI: 10.1016/j.ecoenv.2022.114129.
- Marin-García D.C., Adams R.H., Hernandez-Barajas R. Effect of crude petroleum on water repellency in a clayey alluvial soil, *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 2016, no. 13, p. 55–64, DOI: 10.1007/s13762-015-0838-6.
- Minnikova T., Ruseva A., Kolesnikov S. Assessment of ecological state of soils in southern Russia by petroleum hydrocarbons pollution after bioremediation, *Environmental Processes*, 2022, no. 9, p. 49, DOI: 10.1007/s40710-022-00604-9.
- Minnikova T.V., Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh. Impact of ameliorants on the biological condition of oil-contaminated black soil, *Soil and Environment*, 2019, no. 38(2), p. 170–180, DOI: 10.25252/SE/19/101872.
- Ofori S.A., Cobbina S.J., Imoro A.Z. et al. Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) Pollution and its Associated Human Health Risks in the Niger Delta Region of Nigeria: a Systematic Review, *Environ. Process.*, 2021, vol. 8, p. 455–482, DOI: 10.1007/s40710-021-00507-1.
- Salam M.M.A., Ruhui W., Sinkkonen A. et al. Effects of Contaminated Soil on the Survival and Growth Performance of European (*Populus tremula* L.) and Hybrid Aspen (*Populus tremula* L. × *Populus tremuloides* Michx.) Clones Based on Stand Density, *Plants (Basel)*, 2022, vol. 28, 11(15), p. 1970, DOI: 10.3390/plants11151970.
- Shah S.J., Shroff A.V., Patel J.V. et al. Stabilization of fuel oil contaminated soil – A case study, *Geotechnical and Geological Engineering*, 2003, vol. 21, p. 415–427, DOI: 10.1023/B:GEGE.0000006052.61830.
- Shukry W.M., Al-Hawas G.H.S., Al-Moaikal R.M.S. et al. Effect of petroleum crude oil on mineral nutrient elements, soil properties and bacterial biomass of the rhizosphere of jojoba, *British journal of environment and climate change*, 2013, vol. 3, iss. 1, p. 103.
- Zhang B., Matchinski E.J., Chen B. et al. Marine Oil Spills, Oil Pollution, Sources, and Effects, *World Seas: An Environmental Evaluation*, C. Sheppard (ed.), Elsevier, 2019, p. 391–406, DOI: 10.1016/B978-0-12-805052-1.00024-3.

Поступила в редакцию 20.10.2023

После доработки 12.01.2024

Принята к публикации 24.04.2024

## LABORATORY MODELING OF ENVIRONMENTALLY SAFE CONCENTRATIONS OF FUEL OIL IN THE SOILS OF CRIMEA

A.A. Kuzina<sup>1</sup>, T.V. Minnikova<sup>2</sup>, V.G. Gaivoronsky<sup>3</sup>, S.Yu. Revina<sup>4</sup>, S.I. Kolesnikov<sup>5</sup>

<sup>1,2,4,5</sup> Southern Federal University, Academy of Biology and Biotechnology named after D.I. Ivanovsky,  
Department of Ecology and Environmental Management

<sup>3</sup> Southern Federal University, Academy of Physical Culture and Sports,  
Department of Theoretical Foundations of Physical Training

<sup>1</sup> Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: nyuta\_1990@mail.ru

<sup>2</sup> Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: loko261008@yandex.ru

<sup>3</sup> Associate Professor, Ph.D. in Biology; e-mail: vggayvoronskiy@sfdedu.ru

<sup>4</sup> Master student; e-mail: soffy.soff@mail.ru

<sup>5</sup> Head of the department, D.Sc. in Agriculture; e-mail: kolesnikov1970@list.ru

There are unique types and subtypes of soils within the territory of the Crimean Peninsula. The growing tourist pressure on the region requires the increasing productivity of all industries, including oil refining. All this increases the risk of spills and leaks of oil and petroleum products during their transportation and pumping. However there is a large gap in the field of regulation of soil pollution with petroleum products (gross content), i. e. the absence of maximum permissible concentrations in the regulatory framework of the Russian Federation. To predict possible negative consequences of environmental pollution with oil and oil products, it is necessary to develop regional environmentally safe concentrations of oil and oil products, with due consideration of the local ecological and geochemical characteristics of soil types. The purpose of the study is to find the environmentally safe content of fuel oil in the soils of Crimea. Fuel oil contamination (1, 5 and 10% of the soil mass) was simulated in laboratory conditions. The study examined 7 types of Crimean soils, namely residual carbonate chernozem, drained solonetzic chernozem, dark chestnut solonetzic soil, brown carbonate soil, brown leached red soil, brown forest acidic soil and underdeveloped chernozem. After 30 days of the model experiment, the most informative biological indicators were determined in soil samples, i.e. biochemical (activity of catalase and dehydrogenases), microbiological (total number of soil bacteria and *Azotobacter* sp. abundance) and phytotoxic (root length) indicators. It was established that fuel oil pollution had a negative impact on the biological properties of studied soils. The following series of soil resistance to fuel oil pollution has been obtained: residual-carbonate chernozem  $\geq$  solonetzic drained chernozem = dark chestnut alkali = brown leached red-colored  $\geq$  underdeveloped chernozem  $\geq$  brown carbonate soil > brown forest acidic soil. The values of the maximum permissible levels of residual fuel oil content (MRLC) in the soils of Crimea were obtained: 0,33% in residual carbonate chernozem, 0,30% in dark chestnut solonetzic soil and solonetzic chernozem, 0,28% in brown carbonate soil, 0,35% in brown leached red soil, 0,33% in underdeveloped chernozem, 0,21% in brown forest acidic soil. The results of the study could be used in biodiagnostics of the ecological state and health of soils polluted with fuel oil.

**Keywords:** pollution, modeling, phytotoxicity, enzymatic activity, microbiological indicators

**Acknowledgments.** The study was carried out at the Soil Health international laboratory of the Southern Federal University and financially supported by the Program of Strategic Academic Leadership at the Southern Federal University (Priority-2030, no. CII-12-23-01), the RF Ministry of Science and Higher Education (Agreement no. 075-15-2022-1122) and the project of the RF Ministry of Science and Higher Education on the support of the youth laboratory through the interregional Scientific and Education Center of the South of Russia (FENW-2024-0001).

### REFERENCES

- Andrews N., Bennett N.J., Le Billon P. et al. Oil, Fisheries and Coastal Communities: A Review of Impacts on the Environment, Livelihoods, Space, and Governance, *Energy Research & Social Science*, 2021, vol. 75, p. 102009, DOI: 10.1016/j.erss.2021.102009.
- Ashraf M.A., Maah M.J., Yusoff I. Soil Contamination, Risk Assessment and Remediation, *Environmental Risk Assessment of Soil Contamination*, Edited by Maria C. Hernandez-Soriano, Chapter 1, IntechOpen, 2014, 920 p. DOI: 10.5772/57287.
- Bolade O., Adeniyi K., Williams A., Benson N. Remediation and optimization of petroleum hydrocarbons degradation in contaminated water using alkaline activated persulphate, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, vol. 9, p. 105801, DOI: 10.1016/j.jece.2021.105801.
- Buluktaev A.A. Fitotoksichnost i fermentativnaya aktivnost pochv Kalmykii v usloviyakh neftyanogo zagryazneniya [Phytotoxicity and Enzymatic Activity of Kalmykian Soils under Oil Pollution], *Yug Rossii: Ekologiya, Razvitiye*, 2017, no. 12, p. 147–156, DOI: 10.18470/1992-1098-2017-4-147-156. (In Russian)

- Bykova M.V. Problema normirovaniya pri otsenke urovnya zagryazneniya pochv nefteproduktami [The problem of rationing in assessing the level of soil pollution by oil products], *Vestnik Evrazijskoj nauki*, 2019, vol. 11(6), p. 90. (In Russian)
- Daud R.M., Kolesnikov S.I., Kuzina A.A. et al. Razrabotka regionalnykh predelno dopustimykh kontsentratsiy nefi v pochvakh aridnykh ekosistem Yuga Rossii [Development of regional maximum permissible concentrations of oil in the soils of arid ecosystems in the South of Russia], *Ecology and Industry of Russia*, 2019, vol. 23(9), p. 66–71, DOI: 10.18412/1816-0395-2019-9-66-71. (In Russian)
- Demchenko N.P., Polyakova N.Yu. Ob antropogennykh i ekonomicheskikh faktorakh ekologicheskogo sostoyaniya Kryma [On anthropogenic and economic factors of the ecological state of the Crimea], *Ekonomika stroitelstva i prirodopolzovaniya*, 2020, vol. 2(75), p. 5–14, DOI: 10.37279/2519-4453-2020-2-5-14. (In Russian)
- Dhaka A., Chattopadhyay P.A. Review on physical remediation techniques for treatment of marine oil spills, *Journal of environmental management*, 2021, vol. 288, 112428, DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112428.
- Dindar E., Sagban F.O.T., Baskaya H.S. Variations of soil enzyme activities in petroleum-hydrocarbon contaminated soil, *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, 2015, vol. 105, p. 268–275, DOI: 10.1016/j.ibiod.2015.09.011.
- Dobrovolsky G.V., Nikitin E.D. *Ekologiya pochv. Uchenie ob ekologicheskikh funktsiyakh pochv* [Soil ecology. The doctrine of the ecological functions of soils], Moscow, Nauka Publ., 2006, 362 p. (In Russian)
- Dospatliev L.K., Ivanova M. Correlation between Cambisols soil characteristics and lead content in wild edible mushrooms (*Cantharellus cibarius*, *Tricholoma equestre*, *Craterellus cornucopioides*). *Bulgarian Chemical Communications*, 2018, vol. 50, p. 32–37.
- Duan C., Liu Y., Zhang H. et al. Cadmium Pollution Impact on the Bacterial Community of Haplic Cambisols in Northeast China and Inference of Resistant Genera, *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, p. 1–15, DOI: 10.1007/s42729-020-00201-5.
- Elum Z.A., Mopipi K., Henri-Ukoha A. Oil exploitation and its socioeconomic effects on the Niger Delta region of Nigeria, *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, vol. 23, p. 12880–12889, DOI: 10.1007/s11356-016-6864-1.
- Gaivoronsky V.G., Kolesnikov S.I., Kuzina A.A., Kazeev K.Sh. Izmenenie aktivnosti katalazy v pochvakh Kryma pri zagryaznenii mazutom [Changes in the activity of catalase in the soils of the Crimea under contamination with fuel oil], *Izvestiya visshikh uchebnykh zavedenij, Severo-Kavkazskij region, Estestvennye nauki*, 2023, vol. 1(217), p. 137–141, DOI: 10.18522/1026-2237-2023-1-137-141. (In Russian)
- García V.J., Márquez C.O., Cedeño A.R. et al. Assessing Bioremediation of Soils Polluted with Fuel Oil 6 by Means of Diffuse Reflectance Spectroscopy, *Resources*, 2019, vol. 8(1), p. 36, DOI: 10.3390/resources8010036.
- Gordon G., Stavi I., Shavit U. et al. Oil spill effects on soil hydrophobicity and related properties in a hyper-arid region, *Geoderma*, 2018, vol. 312, p. 114–120, DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.10.008.
- Gosudarstvennyj doklad O sostoyanii sanitarno-epidemičeskogo blagopoluchiya naseleniya v Respublike Krym i gorode federalnogo znacheniya Sevastopole v 2020 g.* [State report “On the state of sanitary and epidemiological well-being of the population in the Republic of Crimea and the city of Federal significance Sevastopol in 2022”], Simferopol, 2023, 337 p. (In Russian)
- Haider F., Liqun C., Coulter J. et al. Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, vol. 211, p. 111887, DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.111887.
- Hewelke E., Szatylowicz J., Hewelke P. et al. The impact of diesel oil pollution on the hydrophobicity and CO<sub>2</sub> efflux of forest soils, *Water, Air, & Soil Pollution*, 2018, vol. 229, p. 51–61, DOI: 10.1007/s11270-018-3720-6.
- IUSS Working Group, *World Reference Base for Soil Resources*, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition published in 2022 by the International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 2022, 234 p.
- Jayasinghe G.Y., Perera T.A.N.T., Bandara W.B.M.A.C. et al. A Review of Soil Injection of Liquid Organic Wastes: Potentials and Challenges, *Environ. Process.*, 2022, vol. 9, p. 37, DOI: 10.1007/s40710-022-00587-7.
- Kalashnikov A.S. [Highway A-291 “Tavrida”: the path from idea to implementation], *Byulleten gosudarstvennoj ekspertizy* [Bulletin of state expert review], 2021, p. 69–72. (In Russian)
- Karkush M.O., Abdul Kareem M.S. Impacts of petroleum fuel oil contamination on the geotechnical properties of fine-grained soils, *Indian Journal of Engineering*, 2018, vol. 15, p. 228–237.
- Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. *Atlas pochv Azovo-Chernomorskogo bassejna* [Atlas of soils of the Azov-Black Sea basin], Rostov-on-Don, Southern Federal University Press, 2015, p. 80. (In Russian)
- Klemz A.C., Damas M.S.P., Weschenfelder S.E. et al. Treatment of real oilfield produced water by liquid-liquid extraction and efficient phase separation in a mixer-settler based on phase inversion, *Chemical Engineering Journal*, 2020, DOI: 10.1016/j.cej.2020.127926.
- Kolesnikov S.I., Aznaurian D.K., Kazeev K.Sh. et al. Biological Properties of South Russian Soils: Tolerance to Oil Pollution, *Russian Journal of Ecology*, 2010, vol. 41, no. 5, p. 398–404.
- Kolesnikov S.I., Daud R.M., Kuzina A.A. et al. Regionalnye normativy sodержaniya mazuta v zasushlivykh pochvakh Rossii [Regional standards for the content of fuel oil in arid soils of the South of Russia], *Okhrana okruzhayushej sredy v neftegazovom komplekse*, 2019a, vol. 3(288), p. 25–29. (In Russian)
- Kolesnikov S.I., Kazeev K.S., Akimenko Y.V. Development of regional standards for pollutants in the soil using biological parameters, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, vol. 191, p. 544, DOI: 10.1007/s10661-019-7718-3.
- Kolesnikov S.I., Vernigorova N.A., Kuzina A.A. et al. Predely ustojchivosti pochv i ekosistem Kryma k zagryazneniyu tyazhelymi metallami [Limits of resistance of soils and ecosystems of the Crimea to heavy metal pollution], *Ecology and Industry of Russia*, 2019b, vol. 23, no. 10, p. 56–60, DOI: 10.18412/1816-0395-2019-10-56-60. (In Russian)
- Kopotilov A. Trassa “Tavrida” po-nastoyaschemu sovremenna i krasiva [The Tavrida track is truly modern and beautiful], *Dorogi Rossii*, 2020, vol. 4(118), p. 6–23. (In Russian)

- Korshunova T.Yu., Chetverikov M.D., Bakaeva M.D. et al. Microorganisms in the elimination of oil pollution consequences (review), *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2019, vol. 55, no. 4, p. 344–353.
- Kovaleva E.I., Trofimov S.Ya., Shoba S.A. Reaktsiya visshikh rastenij na uroven zagryazneniya pochvy neftyu v vegetatsionnom eksperimente [The reaction of higher plants to the oil contamination of soils in the pot experiment], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 17, Pochvovedenie*, 2022, no 3, p. 74–84. (In Russian)
- Kovaleva E.I., Yakovlev A.S. Model ekologicheskoy regulyatsii neftezagryaznennykh pochv putem izmeneniya nekotorykh biogeotsenoticheskikh funktsij [Model of ecological regulation of oil-contaminated soils by changing some biogeocenotic functions], *Ecology and industry of Russia*, 2018, vol. 11, p. 34–39. (In Russian)
- Kuzina A.A., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V. et al. Ekologicheski bezopasnye kontsentratsii nefti v pochvakh Chernomorskogo poberezhniya Kavkaza [Ecologically safe concentrations of oil in the soils of the Black Sea coast of the Caucasus], *Ecology and industry of Russia*, 2021, vol. 25, iss. 11, p. 61–65, DOI: 10.18412/1816-0395-2021-11-61-65. (In Russian)
- Li Y., Li C., Xin Y. et al. Petroleum pollution affects soil chemistry and reshapes the diversity and networks of microbial communities, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2022, vol. 246, p. 114129, DOI: 10.1016/j.ecoenv.2022.114129.
- Marin-Garcia D.C., Adams R.H., Hernandez-Barajas R. Effect of crude petroleum on water repellency in a clayey alluvial soil, *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 2016, vol. 13, p. 55–64, DOI: 10.1007/s13762-015-0838-6.
- Minnikova T., Ruseva A., Kolesnikov S. Assessment of ecological state of soils in southern Russia by petroleum hydrocarbons pollution after bioremediation, *Environmental Processes*, 2022, vol. 9, p. 49, DOI: 10.1007/s40710-022-00604-9.
- Minnikova T.V., Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh. Impact of ameliorants on the biological condition of oil-contaminated black soil, *Soil and Environment*, 2019, vol. 38(2), p. 170–180, DOI: 10.25252/SE/19/101872.
- Ofori S.A., Cobbina S.J., Imoro A.Z. et al. Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) Pollution and its Associated Human Health Risks in the Niger Delta Region of Nigeria: a Systematic Review, *Environ. Process.*, 2021, vol. 8, p. 455–482, DOI: 10.1007/s40710-021-00507-1.
- Okolelova A.A., Zheltobryukhov V.F., Tarasov A.P. et al. Osobennosti regulirovaniya nefteproduktov v pochvennom pokrove [Features rationing of petroleum products in soil cover], *Fundamental Research*, 2015, vol. 12-2, p. 315–319. (In Russian)
- Praktikum po pochvovedeniyu* [Soil science practice]. S. Kaurichev, N.N. Panov, M.V. Stratonovich [et al.], edited by I.S. Kaurichev, Moscow, Kolos Publ., 1986, 336 p. (In Russian)
- Salam M.M.A., Ruhui W., Sinkkonen A. et al. Effects of Contaminated Soil on the Survival and Growth Performance of European (*Populus tremula* L.) and Hybrid Aspen (*Populus tremula* L. × *Populus tremuloides* Michx.) Clones Based on Stand Density, *Plants (Basel)*, 2022, vol. 28, 11(15), p. 1970, DOI: 10.3390/plants11151970.
- Shah S.J., Shroff A.V., Patel J.V. et al. Stabilization of fuel oil contaminated soil – A case study, *Geotechnical and Geological Engineering*, 2003, vol. 21, p. 415–427, DOI: 10.1023/B:GEGE.0000006052.61830.
- Shukry W.M., Al-Hawas G.H.S., Al-Moaikal R.M.S. et al. Effect of petroleum crude oil on mineral nutrient elements, soil properties and bacterial biomass of the rhizosphere of jojoba, *British journal of environment and climate change*, 2013, vol. 3, iss. 1, p. 103.
- Sukhacheva E.Yu., Revina Ya.S. Medium-scale soil map of the Crimea southern coast, *Eurasian Soil science*, 2020, no. 4, p. 397–404, DOI: 10.31857/S0032180X20040140.
- Val'kov V.F., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. *Pochvy Yuga Rossii* [Soils of the South of Russia], Rostov-on-Don, Everest Publishing House, 2008, p. 276. (In Russian)
- Vodyanitskii Y.N., Trofimov S.Y., Shoba S.A. Promising approaches to the purification of soils and groundwater from hydrocarbons (a review), *Eurasian Soil Sci.*, 2016, vol 49, no. 6, p. 705–713.
- Zhang B., Matchinski E.J., Chen B. et al. Marine Oil Spills, Oil Pollution, Sources, and Effects, C. Sheppard (ed.), *World Seas: An Environmental Evaluation*, Elsevier, 2019, p. 391–406, DOI: 10.1016/B978-0-12-805052-1.00024-3.

Received 20.10.2023

Revised 12.01.2024

Accepted 24.04.2024

УДК 631.4

## ЛЕСНЫЕ ПОЛОСЫ КАК ФАКТОР ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ В АГРОЛАНДШАФТАХ ЮГА СРЕДНЕРУССКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

Ю.Г. Чендев<sup>1</sup>, А.Н. Геннадиев<sup>2</sup>, М.А. Смирнова<sup>3</sup>, М.Г. Лебедева<sup>4</sup>

<sup>1,4</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет, институт наук о Земле  
<sup>2,3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,  
кафедра геохимии ландшафтов и географии почв

<sup>1</sup> Кафедра природопользования и земельного кадастра, проф., д-р геогр. наук; e-mail: chendev@bsu.edu.ru

<sup>2</sup> Проф., д-р геогр. наук; e-mail: alexagenna@mail.ru

<sup>3</sup> Доц., канд. геогр. наук; e-mail: summerija@yandex.ru

<sup>4</sup> Кафедра географии, геоэкологии и безопасности жизнедеятельности,  
доц., канд. геогр. наук; e-mail: lebedeva\_m@bsu.edu.ru

Для выявления особенностей воздействия лесомелиораций на распаханые почвы на трех ключевых участках лесостепи юга Среднерусской возвышенности изучены автоморфные черноземы под широкими (30 м) меридионально ориентированными широколиственными лесополосами и их пахотные аналоги вблизи от лесополос. Исследования проводились в ареале распространения тяжелосуглинистых и глинистых черноземов типичных. За 60 лет произрастания лесополос произошли заметные изменения морфологических, физических и химических свойств черноземов. Анализ полевой влажности почв, проводившийся в течение двух вегетационных периодов (2020–2021), показал большее увлажнение почв на пашнях к западу от лесополос, чем к востоку, что обусловлено преимущественно западным переносом воздушных масс в теплую половину года. В почвах под лесополосами по сравнению с почвами пашен выявлен рост мощности гумусово-аккумулятивной части профилей (в среднем на 13 см), обнаружены признаки илювиирования веществ в горизонте В (глянцевые пленки и тонкие кутаны), идентифицировано фрагментарное осветление средней и нижней части гумусированной толщи в виде слабого налета скелетан. В почвах под лесополосами имеет место радиальный вынос карбонатов по сравнению с пахотными аналогами. В трехметровой толще углерода карбонатов в среднем содержится на 40–50 т /га меньше, чем в почвах пашен. Указанные отличия свидетельствуют об эволюционной трансформации почв под лесополосами в направлении от черноземов типичных к черноземам выщелоченным. В трехметровой толще почв лесополос установлены более высокие запасы углерода органического вещества, в среднем на 27 т /га по сравнению с почвами пашен. Групповой состав гумуса в черноземах под лесополосами заметно трансформируется в сторону лесного типа – в слое 0–20 см возрастает содержание фульвокислот, а глубже формируется максимум накопления гуминовых кислот, тогда как для почв на пашнях остается характерным черноземный тип его профильного распределения. Установлена латеральная подтяжка ряда веществ (в частности, фосфора) от пашен в сторону лесополос благодаря десукционной деятельности корневых систем деревьев. Таким образом, защитные лесополосы активизируют комплекс автохтонных и аллохтонных явлений в почвенном покрове, заметно трансформирующих почвы в течение 60-летнего периода времени.

**Ключевые слова:** лесостепь, лесонасаждения, черноземы, пахотные почвы, агролесомелиорации, эволюция и динамика почв, влажность почв, карбонаты в почвах, гумус

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.8

### ВВЕДЕНИЕ

Среди широкого спектра вопросов, касающихся изучения техногенной трансформации почвенного покрова, отдельное место занимают вопросы его изменения под влиянием агролесомелиораций. Эта тематика весьма значима в связи с признанием агролесомелиораций эффективным инструментом

управления качеством почв и повышения продуктивности сельскохозяйственных земель в различных, в том числе аридных, регионах мира [Wezel et al., 2000; Szajdak, Życzyńska-Bałoniak, 2013; Чендев и др., 2015; Wu et al., 2019]. Особенно актуально исследование влияния агролесомелиораций на направленность и стадийность видоизменения почв

в староосвоенных сельскохозяйственных районах России, где длительное возделывание земель во многих случаях привело к деградационным явлениям в почвах, и возникла необходимость восстановления утраченного почвенного плодородия [Данилов, Лобанов, 1973; Ерусалимский, Рыжков, 2017]. В настоящее время накоплен достаточно большой объем сведений по разным аспектам влияния лесополос на свойства почв и урожайность сельскохозяйственных культур, особенно в результате работ на опытных агролесомелиоративных станциях и стационарах как в нашей стране [Каменная..., 1992; Когут и др., 2009; Чевердин и др., 2016; Турусов и др., 2017], так и за рубежом [Kort, 1988; Breman, Kessler, 1997; Li et al., 2022]. В последнее десятилетие наряду с исследованиями на экспериментальных научных станциях перспективными полигонами для изучения влияния лесомелиораций на почвы все чаще становятся лесополосы на участках обычного сельскохозяйственного назначения – на фермерских полях и территориях других сельскохозяйственных предприятий, тем самым расширяется географическое пространство проводимых исследований [Рухович и др., 2014; Chendev et al., 2014; Novykh, Chendev, 2014; Chendev et al., 2015; Хитров, Чевердин, 2016; Li et al., 2022].

Большинство опубликованных работ, касающихся вопросов лесомелиорации, посвящено изучению лесополос как фактора: а) улучшения микроклимата вследствие снегозадержания [Kort, 1988; Wu et al., 2019]; б) снижения физического испарения и создания условий для накопления доступной для растений почвенной влаги [Breman, Kessler, 1997; Wezel et al., 2000]; в) повышения урожайности сельскохозяйственных культур [Агроэкологическое..., 1996; Кретинин, 1991]; г) удерживания в почвах углерода углекислого газа, что связано с регулированием парникового эффекта [Кретинин, 1992; Стеценко, 2013]; д) снижения интенсивности почвенной эрозии [Brandle et al., 2004]; е) формирования среды обитания диких животных и дикорастущих растений [Чегодаева и др. 2005]; ж) улучшения эстетического восприятия ландшафта [Perry et al., 2009; Li et al., 2020]. Значительно меньше работ рассматривает лесополосы как фактор экспериментального видоизменения направленности почвообразования, позволяющий дополнить и углубить фундаментальные эволюционно-генетические представления о почвах, детальнее оценить особенности их развития в координатах пространства и времени. Именно этот подход к анализу строения и функционирования системы «лесополосы – почвы» используется нами в настоящем исследовании.

Результаты почвенно-генетического изучения названной системы различными авторами не одно-

значны. Это относится, например, к выявлению реакции черноземов на произрастание лесополос. В числе первых сведения о влиянии лесомелиораций на черноземные почвы были опубликованы Г.М. Туминым в 1930 г. [Тумин, 1930]. При исследовании почв Каменной степи автор отмечал улучшение почвенной структуры, понижение глубины вскипания, увеличение мощности гумусового горизонта и содержания в нем гумуса, констатировалась трансформация обыкновенного чернозема в выщелоченный. Однако в более поздних исследованиях на территории Каменной степи мнения авторов о вкладе лесополос в почвообразовательный процесс стали не столь однозначными. По данным Б.П. Ахтырцева [Каменная..., 1992], срок произрастания лесополос недостаточен для трансформации обыкновенных черноземов в выщелоченные. Под влиянием лесных полос в почвах отмечается лишь некоторое повышение содержания гумуса в верхнем 10–15-сантиметровом слое [Каменная..., 1992]. Близкие выводы содержатся в работах других авторов [Когут и др., 2009; Каганов, 2012; Приходько и др., 2013]. Имеется также дефицит сведений, либо существуют разноречивые суждения и по ряду других аспектов воздействия агролесомелиораций на черноземы: по масштабам территории, на которую лесополосы распространяют свое влияние на почвы [Данилов, Лобанов, 1973; Агролесомелиорация..., 1991; Кретинин, 1992; Колесникова, 2006]; по выраженности изменений физических свойств, включая гранулометрический состав черноземов под лесополосами [Королев и др., 2012; Трофимов и др., 2013]; по вопросу влияния лесополос на солевой баланс черноземов [Чевердин и др., 2014; 2016] и т. д. В этой связи представляется очевидной необходимость продолжения исследований для выявления и анализа изменений во времени и пространстве черноземных почв, обусловленных воздействием агролесомелиораций.

Цель настоящей работы – проведение комплексного анализа трендов преобразования черноземов, вызванных обустройством и длительным функционированием лесополос на территории аграрно-освоенной лесостепи юга Среднерусской возвышенности.

#### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ключевые участки исследования выбирались с учетом ряда условий. Все участки должны были находиться на территории лесостепи юга Среднерусской возвышенности. На всех участках должны были практиковаться традиционные для региона способы обработки почв и выращивания сельскохозяйственных культур. Участки должны были находиться на ровных или слабонаклонных водораздельных поверхностях и включать многорядные и

широкие (30–35 м) старовозрастные поlezащитные лесополосы с меридиональной (юг–север) ориентировкой для достижения равноэкспозиционного эффекта влияния лесополос на прилегающие к ним с запада и востока почвы. Исследовались лесополосы, которые высаживались на пашнях с лугово-степными черноземами. Прилегающие к ле-

сополосам почвы весь период развития лесополос должны были распаиваться. Схема местоположения ключевых участков исследования приводится на рис. 1. Участок «Бондарев» расположен на плоской приводораздельной поверхности, «Приветный» и «Терновка» – в верхней приводораздельной части склонов с крутизной менее 2°.

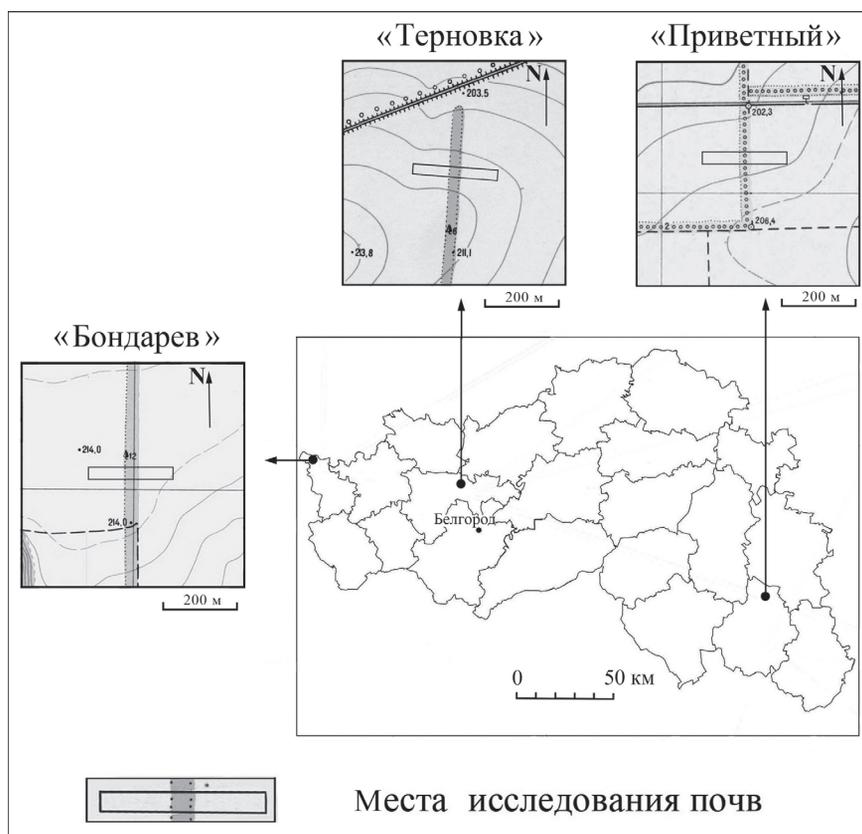


Рис. 1. Местоположение ключевых участков исследования

Fig. 1. Location of key research sites

На участке «Бондарев» объектом исследования была 7-рядная ясеневая-вязовая лесополоса, высаженная в конце 1950-х гг., на участке «Терновка» – 5-рядная дубовая лесополоса, высаженная в середине 1960-х гг., на участке «Приветный» – 6-рядная вязово-ясеневая с примесью клена лесополоса, высаженная в начале 1950-х гг. Средний возраст лесополос составляет 60 лет, все они создавались в соответствии с государственным планом преобразования природы, утвержденном в 1948 г. [Ерусалимский, Рожков, 2017].

Все ключевые участки исследования в 1780-х гг. занимали пограничное положение между распаиваемыми угодьями и целинными степями. Поэтому возраст земледельческого освоения участков нами был принят в 230–240 лет (с 1784–1791-го (время создания старинных карт периода Генерального межевания) по 2024 г.).

Ключевые участки находятся в различных климатических обстановках лесостепной зоны – от наиболее влажной лесостепи на западе с коэффициентом увлажнения 1,24 (участок «Бондарев») до наиболее засушливой лесостепи на юго-востоке региона с коэффициентом увлажнения 1,03 (участок «Приветный»). Все участки соответствуют ареалам распространения черноземов типичных с незначительным участием в структуре почвенного покрова черноземов выщелоченных.

Содержание физической глины в верхнем 20-сантиметровом слое почв на крайнем западе (участок «Бондарев») составляет 55–62% и имеет тенденцию роста в юго-восточном направлении: на участке «Терновка» – 60–69%, на участке «Приветный» – 63–79%. На участках «Бондарев» и «Терновка» почвообразующими породами являются лессовидные карбонатные тяжелые суглинки и глины (содер-

жание физической глины – 51–69%), а на участке «Приветный» – лессовидные карбонатные легкие глины (содержание физической глины – 66–85%).

На всех участках закладывалось по два почвенных разреза в центральной части лесополос и по одному разрезу на пашнях с двух сторон лесополос на расстоянии 10, 30 и 60 м от их края. Пробоотбор на разные виды лабораторного анализа осуществлялся послойно с одинаковых глубин почв в каждом разрезе. На каждом участке отдельно изучались свойства почв в слое 0–20 см вдоль линий трех трансект, удаленных друг от друга на 10 м и ориентированных перпендикулярно лесополосе. Трансекта начиналась в 100 м от края лесополосы, пересекала лесополосу и заканчивалась на другом поле также в 100 м от края лесополосы. На каждой трансекте пробы почв отбирались на пашнях через 10 м, а под лесополосами – через 6 м. Дополнительно в течение двух полных вегетационных периодов 2020–2021 гг. (с апреля по октябрь) в почвах крайних участков («Бондарев» и «Приветный») проводились ежемесячные наблюдения за режимами почвенной влажности с помощью парного бурения и отбора проб до глубины 2 м в каждой изучаемой точке (центр лесополосы, пашня к западу и востоку на удалении 10, 30 и 60 м от края лесополосы).

Полевые описания почв выполнялись с помощью метода морфологического анализа почвенного профиля. Лабораторные анализы включали определение плотности сложения почв с помощью стальных колец известного объема, гранулометрического состава почв методом Качинского (ГОСТ 12536),  $S_{\text{орг}}$  по методу Тюрина (ГОСТ 26213-91), группового состава гумуса по ускоренной методике Кононовой-Бель-

чиковой [Пономарева, Плотникова, 1980], pH водной суспензии (ГОСТ 26423-85), подвижных форм фосфора по методу Чирикова (ГОСТ 26205-91),  $\text{CO}_2$  карбонатов ацидиметрическим методом. Определение полевой влагоемкости почв осуществлялось согласно ГОСТ 28268-89. Почвы. При анализе и интерпретации полученных данных также были использованы методы математической статистики с помощью программного комплекса STATISTICA.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ результатов двухлетних наблюдений за изменением почвенной влажности в зонах влияния лесополос позволяет сделать ряд наиболее важных выводов.

В целом, содержание влаги в почвах участка «Приветный», расположенного в засушливых условиях лесостепной зоны (ГТК = 1,03), оказалось более высоким по сравнению с почвами участка «Бондарев», расположенного в более влажных обстановках лесостепи (ГТК = 1,24). Главной причиной выявляемых различий выступает более глинистый гранулометрический состав почв участка «Приветный» (в глинах содержание капиллярной и пленочной влаги выше, чем в суглинках, что повышает общий процент влажности почв).

Вторым выводом является констатация факта формирования в почвах под лесополосами зон пониженной влажности (рис. 2). Это происходит вследствие эффекта корневой десукции деревьев, когда корни извлекают необходимую влагу с большой глубиной намного интенсивнее, чем корни культурных растений [Wu et al., 2019].

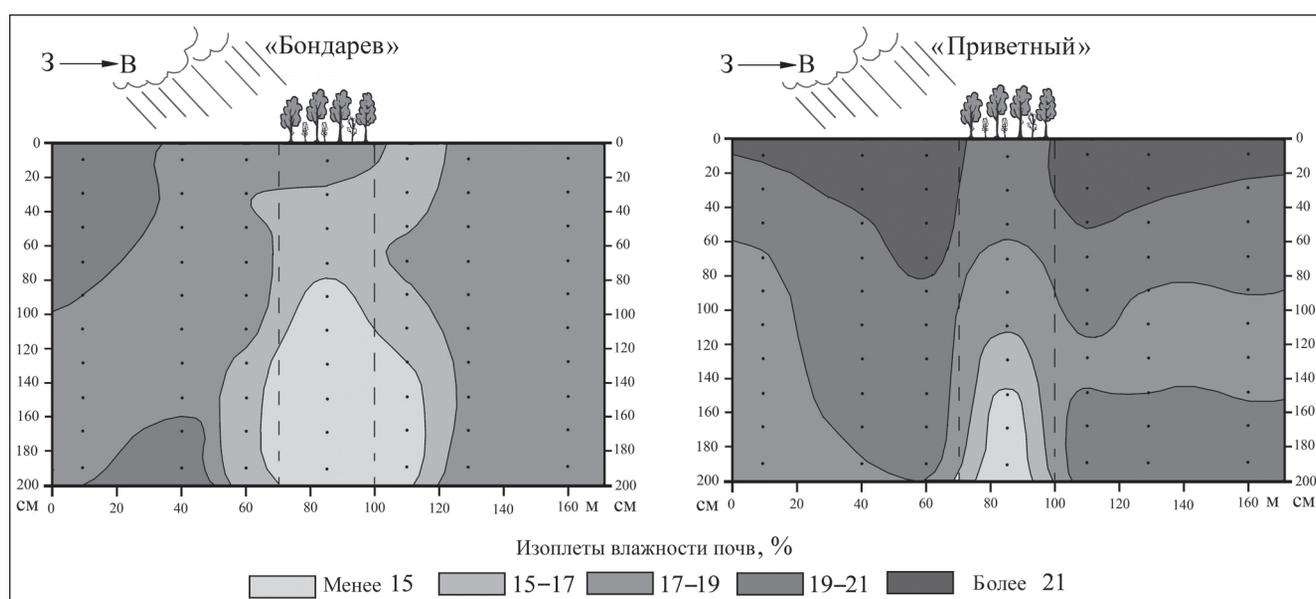


Рис. 2. Изоплеты влажности почв на двух изученных участках (средние значения за вегетационные периоды 2020–2021 гг.)

Fig. 2. Isoleths of soil moisture at two studied sites (average values for the 2020–2021 vegetation periods)

Кроме того, установлено более интенсивное накопление почвенной влаги на полях, расположенных к западу от лесополос по сравнению с полями к востоку от них (см. рис. 2). Это явление обусловлено тем, что территория центра Восточно-Европейской равнины находится в области западного переноса воздушных масс. Поэтому пахотные поля с наветренной стороны лесополос получают больше влаги по сравнению с почвами подветренных сторон: высокая (20–25 м) стена деревьев в лесополосах формирует ветровую и дождевую тень на участках пашен к востоку от лесополос; кроме того, лесополосы способствуют большему накоплению снега в зимний период с наветренной стороны [Данилов, Лобанов, 1973].

Морфометрические признаки почв, изученных на каждом участке, представлены в табл. 1. На всех ключевых участках («Бондарев», «Терновка», «Приветный») при переходе от почв лесополос к почвам пашен выявляются направленные пространственные изменения мощности гумусированной части почвенных профилей (суммарной мощности горизонтов А1 и А1В) и мощности горизонтов В: мощность гумусированной части профилей достоверно снижается (в среднем на 13 см), а мощность горизонтов В достоверно возрастает (в среднем на 7 см). Установленные изменения отражают различия в трендах почвообразования, складывающихся на пашнях и под длительно произрастающими лесополосами и наблюдаемые в различных физико-географических условиях [Chendev et al., 2014].

По глубине залегания карбонатов (глубина вскипания) направленное выщелачивание почв под лесополосами установлено на участках «Бондарев» и «Приветный» и не столь очевидный тренд выявляется на участке «Терновка» (см. табл. 1). В первых двух случаях почвы под лесополосами в результате произошедшего выщелачивания были идентифицированы как черноземы выщелоченные, тогда как на прилегающих пашнях их аналогами являются черноземы типичные.

В черноземах под лесополосами по сравнению с черноземами пашен повсеместно констатировались новые морфологические признаки, образованные в относительно влажном микроклимате под пологом древесной растительности и отражающие начальную стадию текстурной дифференциации почвенных профилей. К ним относятся очаговый налет скелетан в нижней части гумусовых горизонтов, наличие пленок иллювиирования со слабым глянцевым блеском в горизонтах А1В, тонкие фрагментарные кутаны иллювиирования и мелкие железисто-марганцевые примазки в горизонтах В и ВС.

Еще одним важным отличием профильного строения черноземов под лесополосами от черноземов на пашнях выступает разная степень перерывности профилей роющими животными – полевыми мышами-слепышами (табл. 2). Повышенное количество слепышин в почвах центральных зон под лесополосами может быть следствием определенной этапности формирования экосистем лесополос: на стадии закладки лесополос и в первые годы роста деревьев, когда еще хорошо освещаемое пространство лесополос функционировало в режиме залежного угодья, почвы на этих участках могли активно осваиваться слепышами, оставившими значительное количество ходов в почвенных профилях (см. табл. 2).

Как показали более детальные исследования, корни деревьев распространяются на расстояние более 10 м от края лесополос. Это выявлялось повсеместно на участках полевого исследования почв. В качестве примера на рис. 3 приводится профиль чернозема, изученного на пашне в 10 м от края лесополосы на участке «Бондарев», с присутствием на стенках разреза древесных корней.

Следствием распространения корней деревьев в разные стороны от лесополос является латеральная подтяжка корнями некоторых веществ из почв пашни к почвам лесополос [Wu et al., 2019]. Одним из примеров такой подтяжки служит пространственный профиль распределения в почвах содержания подвижного фосфора по усредненным характеристикам на трех ключевых участках (рис. 4). Фосфор, попадающий на поля с минеральными удобрениями, захватывается древесными корнями, поступает в деревья, а затем с опадом листьев и веток аккумулируется в почвах, постепенно накапливаясь в краевых зонах лесополос и формируя здесь своеобразные почвенно-геохимические аномалии. Данный процесс контролируется количеством вносимых на поля минеральных удобрений: чем выше дозы вносимых удобрений, тем больше проявляется накопление элементов питания растений в краевых частях лесополос. Таким образом, лесополосы являются биогеохимическими барьерами, аккумулирующими в органах растений и почвах различные химические элементы и вещества в концентрациях, которые могут иметь негативные последствия для здоровья человека.

В почвах пашен в 10–30 м от края лесополос формируются зоны повышенного уплотнения и более ярко выражен горизонт подплужной подошвы по сравнению с удаленными от лесополос пахотными почвами (рис. 5). Главной причиной этого является более частое и регулярное прохождение сельскохозяйственной техники вблизи границ пахотных полей.

Таблица 1

## Результаты статистической обработки морфометрических признаков изученных почв

Показатель	Расположение почвы	<i>n</i>	<i>Lim</i>	$X \pm \delta_x$	$\delta$	<i>V</i> , %
<i>Участок «Бондарев»</i>						
Мощность гумусированной части профиля (A1+A1B), см	Под лесополосой	30	72–91	82,8±1,0	5,49	6,6
	В 10 м от края лесополосы	30	59–78	67,1±0,9	4,70	7,0
	В 30 м от края лесополосы	30	62–80	69,4±0,9	4,72	6,8
	В 60 м от края лесополосы	30	51–82	69,4±1,1	6,16	8,9
Мощность горизонта В, см	Под лесополосой	30	9–35	23,1±1,0	5,24	22,7
	В 10 м от края лесополосы	30	8–47	27,0±1,8	9,88	36,6
	В 30 м от края лесополосы	30	10–38	26,5±1,1	6,01	22,7
	В 60 м от края лесополосы	30	23–52	33,3±1,1	6,25	18,8
Глубина вскипания, см	Под лесополосой	15	93–116	106,3±1,8	7,09	6,7
	В 10 м от края лесополосы	30	37–70	54,9±1,8	10,11	18,4
	В 30 м от края лесополосы	30	54–95	68,7±2,1	11,70	17,0
	В 60 м от края лесополосы	30	32–61	43,5±1,4	7,60	17,5
<i>Участок «Терновка»</i>						
Мощность гумусированной части профиля (A1+A1B), см	Под лесополосой	30	67–84	76,3±0,8	4,19	5,5
	В 10 м от края лесополосы	30	63–77	68,7±0,7	3,66	5,3
	В 30 м от края лесополосы	30	61–84	69,3±0,8	4,15	6,0
	В 60 м от края лесополосы	30	58–77	65,4±0,8	4,65	7,1
Мощность горизонта В, см	Под лесополосой	30	15–38	25,3±1,1	5,88	23,2
	В 10 м от края лесополосы	30	17–45	28,3±1,3	7,04	24,9
	В 30 м от края лесополосы	30	19–55	38,5±1,4	7,58	19,7
	В 60 м от края лесополосы	30	20–45	31,3±1,1	6,24	19,9
Глубина вскипания, см	Под лесополосой	30	70–89	77,9±0,9	5,08	6,5
	В 10 м от края лесополосы	30	70–90	79,2±1,0	5,33	6,7
	В 30 м от края лесополосы	30	48–83	68,4±1,6	8,57	12,5
	В 60 м от края лесополосы	30	92–116	103,3±1,3	7,03	6,8
<i>Участок «Приветный»</i>						
Мощность гумусированной части профиля (A1+A1B), см	Под лесополосой	30	80–98	88,9±0,8	4,52	5,1
	В 10 м от края лесополосы	30	70–88	79,4±0,7	3,72	4,7
	В 30 м от края лесополосы	30	62–76	69,3±0,7	3,84	5,5
	В 60 м от края лесополосы	30	57–74	63,4±0,7	4,00	6,3
Мощность горизонта В, см	Под лесополосой	30	12–36	24,7±1,0	5,66	22,9
	В 10 м от края лесополосы	30	21–46	30,1±1,2	6,43	21,4
	В 30 м от края лесополосы	30	16–45	32,3±1,4	7,80	24,1
	В 60 м от края лесополосы	30	20–65	36,0±1,9	10,45	29,0
Глубина вскипания, см	Под лесополосой	30	87–126	106,3±2,8	15,14	14,2
	В 10 м от края лесополосы	30	39–66	52,8±1,4	7,88	14,9
	В 30 м от края лесополосы	30	35–60	45,1±1,2	6,52	14,5
	В 60 м от края лесополосы	30	30–65	49,5±1,8	10,09	20,4

*Примечание:* *n* – объем выборки; *Lim* – разброс значений, *X* – среднее арифметическое значение,  $\delta$  – ошибка выборочной средней, *V* – коэффициент вариации; те же показатели использованы в табл. 3.

## Распределение слепышин в профилях почв ключевых участков исследования, % от площади слоя

Слой, см	Почвы			
	Лесополосы, $n = 2$	Пашни в 10 м от края, $n = 2$	Пашни в 30 м от края, $n = 2$	Пашни в 60 м от края, $n = 2$
<i>Участок «Бондарев»</i>				
0–40	5,4	1,0	1,9	5,1
40–80	74,2	43,0	44,0	62,6
80–120	79,4	79,6	65,9	70,9
120–160	48,8	34,9	56,2	62,8
0–160	52,0	39,6	42,0	50,4
<i>Участок «Терновка»</i>				
0–40	10,0	0,3	3,6	0,8
40–80	66,4	44,2	50,8	50,1
80–120	46,6	35,4	57,5	36,3
120–160	18,7	7,2	23,7	10,5
0–160	35,4	21,8	33,9	24,4
<i>Участок «Приветный»</i>				
0–40	10,8	0,6	1,7	5,5
40–80	74,0	53,9	54,8	59,7
80–120	73,2	68,1	30,5	59,1
120–160	4,1	7,9	6,0	15,8
0–160	40,5	32,6	23,3	35,0



Рис. 3. Живые и отмершие корни деревьев в стенке почвенного разреза в 10 м от края лесополосы на участке «Бондарев»

Fig. 3. Living and dead tree roots in the soil profile wall 10 m from the edge of the shelterbelt at the “Bondarev” site

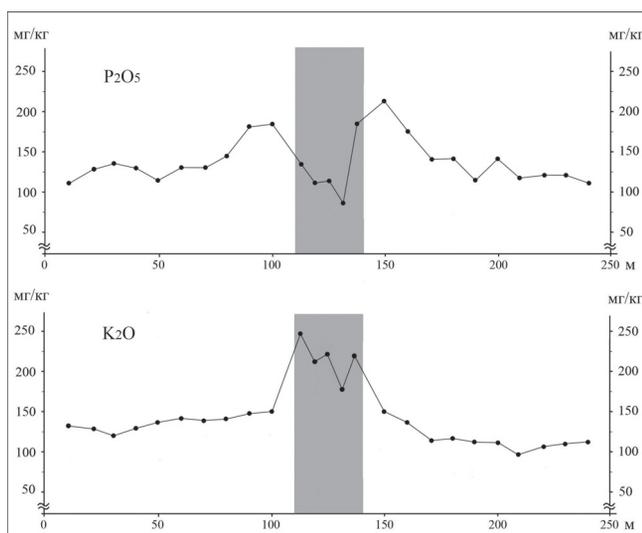


Рис. 4. Содержание подвижного фосфора ( $P_2O_5$ ) и калия ( $K_2O$ ) в слое почв 0–20 см в зоне влияния лесополос (по усредненным характеристикам на трех ключевых участках исследования). Каждая точка обеспечена результатами девяти анализов. Серый столбик – место нахождения лесополос

Fig. 4. Content of mobile phosphorus ( $P_2O_5$ ) and potassium ( $K_2O$ ) in the 0–20 cm soil layer within the influence zone of the shelterbelt (based on averaged characteristics at three key research sites). Each point represents results from 9 analyses. Gray column – location of the shelterbelt

На территории наиболее влажной лесостепи (участок «Бондарев») в слоях образования подпужной подошвы формируются признаки поверхностного оглеения. В более южных (засушливых) районах лесостепи данные признаки не выявлены.

Для понимания изменений, происходящих в профилях черноземов при смене пашен лесополосами, важным аспектом выступает сравнительный анализ запасов в почвах органического (в гумусе почв) и неорганического (в почвенных карбонатах) углерода (табл. 3). По результатам сравнительного анализа (см. табл. 3), главные отличия почв лесополос от почв прилегающих пашен заключаются в более значительных запасах в них органического углерода (в слое 0–300 см – на 27 т/га, а в слое 0–100 см – на 19 т/га); по оценкам [Чендев и др., 2015], средняя скорость накопления органического углерода в почвах под лесополосами Среднерусской возвышенности и Великих равнин США составляла 0,7–1,5 т/га в слое 1 м за 55–60-летний период. В почвах под лесополосами обнаружены меньшие запасы углерода педогенных карбонатов (в слое 0–300 см – на 46 т/га, а в слое 0–100 см – 23 т/га) за счет прогрессирующего выщелачивания почв под лесополосами в результате изменения микроклимата, который становится более прохладным и влажным.

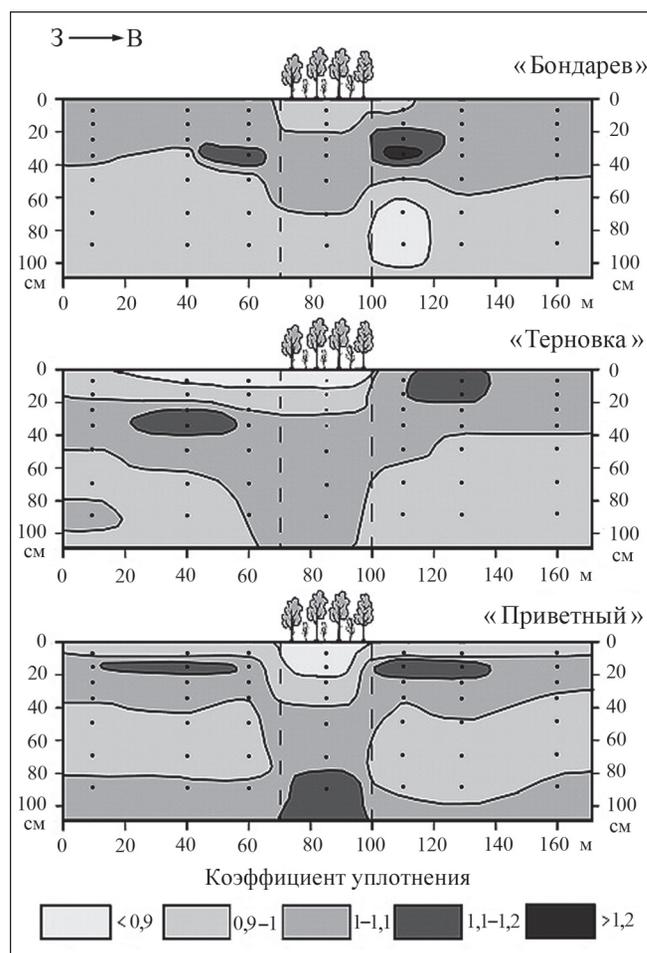


Рис. 5. Пространственное распределение коэффициента уплотнения ( $K_{уп}$ ) в метровой толще черноземов трех изученных участков.  $K_{уп}$  – плотность ( $г/см^3$ ) в каждом 20-сантиметровом слое: средняя плотность в метровом слое

Fig. 5. Spatial distribution of the compaction coefficient ( $K_{уп}$ ) in the meter-thick chernozems of the three studied areas.  $K_{уп}$  – density ( $г/см^3$ ) in each 20-centimeter layer: average density in a meter layer

За 60 лет произрастания лесополос заметные изменения произошли в качественном составе органического вещества почв. В почвах под лесополосами гумус верхних слоев обогащается фульвокислотами, а в нижележащих слоях становится более гуматным по сравнению с идентичными слоями почв прилегающих пашен (табл. 4). Изменение состава органического вещества почв под лесополосами выявлено и в других работах [Maryganova et al., 2010].

Изменение характера профильного распределения Сгк:Сфк в почвах под лесополосами можно объяснить сменой почвенных климатических режимов и характера растительности – с условно луговой на сельскохозяйственных полях на широколиственно-лесную. В литературе есть указание на то, что для почв широколиственных лесов на территории Европейской России «характерно передвижение в ниж-

ние горизонты почвы неполноусредненных гуматов кальция... Усреднение перемещающихся гуматов кальция часто начинается уже в нижней части горизонта А (гор. А1А2), где образуется первый подгоризонт вымывания гумуса» [Рубилин и др., 1964, с. 63].

Как показал анализ почв, изученных в разрезах и на трансектах, лесополосы способствуют проявлению различных вариантов латеральной дифференциации почвенных свойств. Так, некоторые почвенные характеристики (такие как рН и групповой состав гумуса), изменяясь в пределах пространства лесополос и прилегающих пашен, обусловили формирование двухкомпонентных полосчатых микроструктур почвенного покрова – с центральным компонентом под лесополосой, где происходит подкисление почв и наблюдается перераспределение группового состава гумуса с повышенным содержанием фульвокислот в слое 0–20 см, и с боковым компонентом на пахотном пространстве с двух сторон лесополосы, где в почвах выражен черноземный тип распределения значений рН и отношения С<sub>гк</sub>:С<sub>фк</sub> (рис. 6А, 6Б). Другой вариант латеральной дифференциации почвенных свойств указывает на формирование трехкомпонентной полосчатой микроструктуры по-

чвенного покрова: с центральным компонентом под лесополосами, со вторым компонентом на удалении до 30 м от края лесополос на пашнях и с третьим компонентом, распространяющимся на более удаленную от лесополос часть пахотных почв (см. рис. 6В, 6Г). Эти пространственно сопряженные полосчатые микрокомпоненты почвенного покрова отличаются такими показателями, как коэффициент уплотнения и площадь распространения слепышин (коэффициент уплотнения рассчитывался как отношение плотности сложения в 20 см слоях к средней плотности сложения в слое 0–1 м почвенных профилей). В пространстве второго компонента микроструктуры с двух сторон лесополос в слое 20–40 см почв четко фиксируются участки повышенного уплотнения как результат более частого здесь прохождения сельскохозяйственной техники при обработке почв и при уборке урожая. В период промачивания атмосферными осадками или в весенние периоды после снеготаяния здесь в почвах возникают водоупоры, на которых застаивается влага. Это приводит к поверхностному оглеению, что было установлено на участке «Бондарев» в наиболее влажной части лесостепной зоны. На других изученных участках лесостепи

Таблица 3

### Запасы углерода в профилях почв под лесополосами и на пашне, т /га

Слой, см	Органическое вещество почв				Карбонаты почв			
	<i>Lim</i>	$X \pm \delta_x$	$\delta$	$V, \%$	<i>Lim</i>	$X \pm \delta_x$	$\delta$	$V, \%$
<i>Почвы лесополос</i>								
0–100	210–375	286±25	61,44	21,5	0–37	18±6	14,28	79,3
100–200	53–119	86±12	29,63	34,4	150–226	178±11	26,00	14,6
200–300	50–91	69±6	14,65	21,2	55–180	147±20	48,68	33,1
0–300	313–579	441±41	101,45	23,0	274–423	342±20	48,71	14,2
<i>10 м от края лесополос</i>								
0–100	182–361	266±24	59,51	22,4	11–86	44±12	30,38	69,0
100–200	57–111	84±9	23,42	27,9	155–245	207±14	34,87	16,8
200–300	36–68	57±5	12,32	21,6	55–185	135±23	56,82	42,1
0–300	286–534	407±36	87,36	21,5	237–509	386±45	110,44	28,6
<i>30 м от края лесополос</i>								
0–100	211–355	267±23	57,09	21,4	20–77	41±8	20,19	49,2
100–200	56–102	81±8	18,55	22,9	152–247	213±15	36,07	16,9
200–300	49–80	65±5	12,63	19,4	43–291	158±35	86,02	54,4
0–300	324–535	412±34	82,45	20,0	215–509	411±48	118,75	28,9
<i>60 м от края лесополос</i>								
0–100	221–352	268±23	57,09	21,3	0–73	38±12	30,56	80,4
100–200	51–118	87±7	18,55	21,3	73–236	188±24	59,73	31,8
200–300	32–98	67±5	12,63	18,9	58–194	142±22	54,72	38,5
0–300	305–568	422±34	82,45	19,5	131–503	367±55	135,10	36,8

Примечание. Средние характеристики трех изученных участков, для каждого слоя объем выборки равен 6.

с менее влажным климатом поверхностное оглеение в почвах указанных местоположений не было выявлено. На этих же участках в результате уплотнения формируется неблагоприятное для жизнедеятельности слепыша пространство, что отражается в снижении площади слепышин (см. рис. 6Г).

Таблица 4

**Отношение Сгк : Сфк в изученных черноземах под лесополосами и на пашнях**

Глубина, см	Лесополосы, n = 2	Пашня (10, 30, 60 м от края лесополос), n = 6
<i>Влажная лесостепь (участок «Бондарев», ГТК = 1,24)</i>		
0–20	1,49	1,71
20–40	1,67	1,47
40–60	1,12	1,13
60–80	0,97	0,92
80–100	0,80	0,72
<i>Типичная лесостепь (участок «Терновка», ГТК = 1,10)</i>		
0–20	2,06	2,42
20–40	2,31	2,32
40–60	2,05	1,62
60–80	1,32	0,89
80–100	0,86	0,68
<i>Южная лесостепь (участок «Приветный», ГТК = 1,03)</i>		
0–20	1,67	1,78
20–40	2,02	1,40
40–60	1,15	1,08
60–80	0,98	0,81
80–100	0,65	0,65

*Примечание.* Усредненные характеристики почвенных разрезов на каждом участке.

**ВЫВОДЫ**

Под меридионально ориентированными широколиственными лесополосами на водораздельных поверхностях в разных климатических условиях лесостепи юга Среднерусской возвышенности в вегетационные периоды происходит глубокое иссушение почв в результате корневой десукции деревьев. На пашнях к западу от лесополос формируются бóльшие запасы влаги в почвах, чем на пашнях к востоку от них, что определяется западным переносом воздушных масс и эффектом ветровой тени под влиянием высоких древостоев.

Черноземы типичные в результате 60-летнего произрастания на них многорядных лесополос из широколиственных пород деревьев характеризуются трендом перехода в черноземы выщелоченные. Запасы углерода карбонатов в этих почвах меньше по сравнению с почвами прилегающих пашен (в трехметровой толще – на 46 т/га, а в слое 0–1 м – на 23 т/га). Почвы под лесополосами также характеризуются более высокой гумусированностью по сравнению с почвами пашен (в слое 0–300 см углерода органического вещества содержится на 27 т/га больше, чем на пашнях, а в слое 0–100 см – на 19 т/га больше). Групповой состав гумуса верхних слоев черноземов под лесополосами становится более фульватным по

сравнению с черноземами прилегающих пашен. Почвы под лесополосами характеризуются более высокой степенью перерытости роющими животными (слепышами) и определенной этапностью зоогенной трансформации морфологических профилей.

В процессе функционирования лесополос в почвах происходит латеральная подтяжка веществ со стороны пашен в сторону лесонасаждений благодаря воздействию корневых систем деревьев, которые распространяются на расстояние более 10 м от края лесополос в сторону пашен. Таким образом, лесополосы оказывают влияние на направленность и интенсивность почвообразования как внутри лесонасаждений (автохтонные процессы), так и на участках прилегающих пахотных угодий (аллохтонные процессы).

Изученные лесополосы и сопряженные с ними участки агроландшафтов являются специфическими геосистемами со своей структурной организацией и особенностями развития во времени. Установлено формирование линейно ориентированных (полосчатых) двух- и трехкомпонентных микроструктур почвенного покрова, обусловленных особенностями развития почвообразовательных процессов при формировании лесополос, а также характером агротехнических приемов земледелия на краях полей вблизи лесополос.

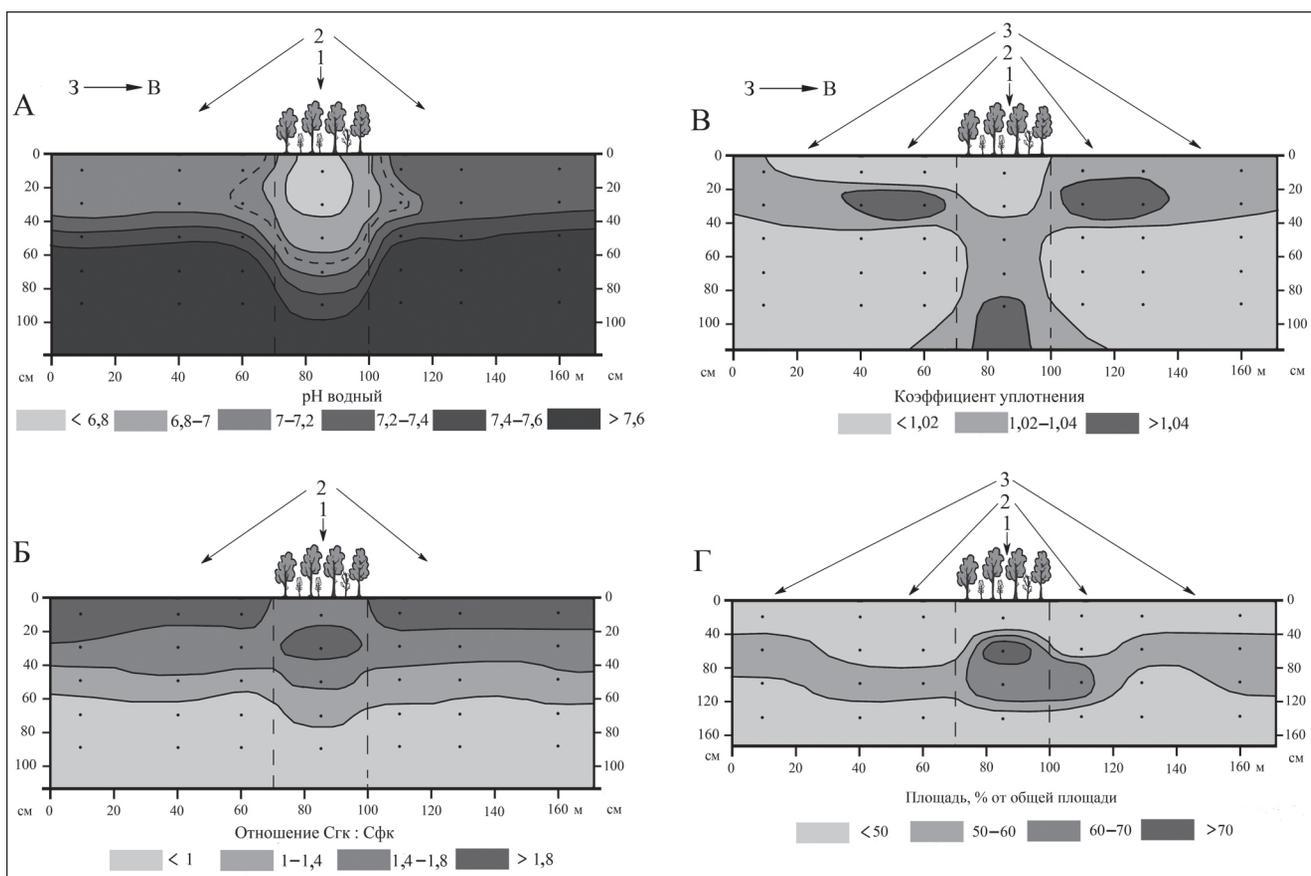


Рис. 6. Пространственное распределение почвенных свойств, сформировавших разное количество вариантов полосчатых микроструктур почвенного покрова под лесополосами и на прилегающих пашнях (усредненные характеристики трех ключевых участков): двухкомпонентные варианты: А – рН водный; Б – отношение Сгк : Сфк; трехкомпонентные варианты: В – коэффициент уплотнения; Г – площадь слепышин, %

Fig. 6. Spatial distribution of soil properties that formed a different number of variants of banded microstructures of the soil cover under forest belts and on adjacent arable lands (averaged characteristics of three key areas): two-component variants: А – aqueous pH; Б – ratio Sgk : Sfk; three-component options: В – compaction coefficient; Г – area of mole rats, %

**Благодарность.** Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 19-17-00056-П.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агролесомелиорация и плодородие почв / под ред. Е.С. Павловского. М.: Агропромиздат, 1991. 288 с.
- Агрэкологическое состояние черноземов. Курск: Изд-во Всероссийского НИИ земледелия и защиты почв от эрозии, 1996. 330 с.
- Данилов Г.Г., Лобанов Д.А. Агролесомелиорация лесостепи. М.: Лесная промышленность, 1973. 125 с.
- Ерусалимский В.И., Рожков В.А. Многофункциональная роль защитных лесных насаждений // Бюллетень почвенного института имени В.В. Докучаева. 2017. № 88. С. 121–137.
- Каганов В.В. Изменение экосистемных запасов углерода при облесении в степной и полупустынной зонах Европейской части России // Проблемы региональной экологии. 2012. № 4. С. 7–12.
- Каменная степь: Лесоаграрные ландшафты. Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1992. 224 с.
- Когут Б.М., Титова Н.А., Булеева В.С. Антропогенная трансформация качественного состава гумуса черноземов Каменной степи // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2009. № 64. С. 41–49.
- Колесникова Л.В. Лесные полосы и их влияние на плодородие чернозема обыкновенного и продуктивность угодий в степи Приволжской возвышенности: дис. ... канд. с.-х. наук. Саратов, 2006. 238 с.
- Королев В.А., Громовик А.И., Йонко О.А. Изменение физических свойств почв Каменной степи под влиянием полезайтных лесных полос // Почвоведение. 2012. № 3. С. 299–308.
- Кретинин В.М. Мониторинг плодородия почв лесоаграрного ландшафта лесостепи Среднерусской равнины // Вестник сельско-хоз. науки. 1991. № 6. С. 45–49.
- Кретинин В.М. Мониторинг плодородия почв лесоаграрных ландшафтов лесостепной зоны // Доклады ВАСХНИЛ. № 3. 1992. С. 16–20.

- Пономарева В.В., Плотникова Т.А. Гумус и почвообразование. Л.: Наука, 1980. 222 с.
- Приходько В.Е., Чевердин Ю.И., Титова Т.В. Изменение форм органического вещества черноземов Каменной степи при разном использовании, местоположении и увеличении степени гидроморфизма // Почвоведение. 2013. № 12. С. 1494–1504. DOI: 10.7868/S0032180X13120095.
- Рубилин Е.В., Вернандер Н.Б., Парфенова Е.И. и др. Серые лесные почвы европейской части СССР // Генезис, классификация и картография почв СССР. Доклады к VIII Международному конгрессу почвоведов. Отдельный оттиск. М.: Наука, 1964. С. 58–73.
- Рухович Д.И., Симакова М.С., Куляница А.Л. и др. Влияние лесополос на фрагментацию овражно-балочной сети и образование мочаров // Почвоведение. 2014. № 47. С. 1086–1099. DOI: 10.7868/S0032180X14110094.
- Стеценко А.В. Лесные проекты – результаты Киотского протокола // Вестник алтайской науки. 2013. № 2-2. С. 48–51.
- Трофимов И.Т., Беховых Ю.В., Болотов А.Г. и др. Физические свойства черноземов под хвойными лесополосами // Вестник Алтайского гос. аграрного ун-та. 2013. № 9(107). С. 23–27.
- Тумин Г.М. Влияние лесных полос на почву в Каменной степи. Воронеж: Коммуна, 1930. 40 с.
- Турусов В.И., Лепехин А.А., Чеканышкин А.С. Опыт лесной мелиорации степных ландшафтов (к 125-летию «Особой экспедиции...» В.В. Докучаева). Воронеж: Истоки, 2017. 228 с.
- Хитров Н.Б., Чевердин Ю.И. Почвы Каменной степи от времени В.В. Докучаева до наших дней // Живые и биокосные системы. 2016. № 16. DOI: 10.18522/2308-9709-2016-16-2.
- Чевердин Ю.И., Вавин В.С., Ахтямов А.Г. Формирование солевого режима почв под влиянием лесных полос // Современные тенденции развития аграрного комплекса: материалы Международной научно-практической конференции. Соленое Займище: ФГБНУ «Прикаспийский научно-исследовательский институт аридного земледелия», Региональный фонд «Аграрный университетский комплекс». 2016. С. 352–355.
- Чевердин Ю.И., Вавин В.С., Ахтямов А.Г. и др. Роль лесных насаждений в изменении свойств черноземов // Достижения науки и техники АПК. 2014. № 2. С. 11–14.
- Чегодаева Н.Д., Каргин И.Ф., Астрадамов В.И. Влияние защитных лесных полос на водно-физические свойства почвы и состав населения жуличиц прилегающих полей: монография. Саранск: Мордовское кн. изд-во, 2005. 125 с.
- Чендев Ю.Г., Соэр Т.Д., Геннадиев А.Н. и др. Накопление органического углерода в черноземах (Моллисолях) под защитными лесными насаждениями в России и США // Почвоведение. 2015. № 1. С. 49–60. DOI: 10.7868/S0032180X15010037.
- Brandle J.R., Hodges L., Zhou X.H. Windbreaks in North American agricultural systems, *Agroforestry Systems*, 2004, no. 61, p. 65–78, DOI: 10.1007/978-94-017-2424-1\_5.
- Breman H., Kessler J.J. The potential benefits of agroforestry in the Sahel and other semi-arid regions, *European Journal of Agronomy*, 1997, vol. 7, no. 1–3, p. 25–33, DOI: 10.1016/S1161-0301(97)00035-X.
- Chendev Yu.G., Novykh L.L., Sauer T.J. et al. Evolution of Soil Carbon Storage and Morphometric Properties of Afforested Soils in the U.S. Great Plains, *Soil Carbon. Progress in Soil Science*, New York, Springer International Publ., 2014, p. 475–482, DOI: 10.1007/978-3-319-04084-4\_47.
- Chendev Yu.G., Sauer T.J., Ramirez G.H. et al. History of East European Chernozem Soil Degradation; Protection and Restoration by Tree Windbreaks in the Russian Steppe, *Sustainability*, 2015, vol. 7(1), p. 705–724, DOI: 10.3390/su7010705.
- Kort J. Benefits of windbreaks to field and forage crops, *Agricultural Ecosystems and Environment*, 1988, vol. 22/23, p. 165–190, DOI: 10.1016/0167-8809(88)90017-5.
- Li S., Gong S., Hou Y. et al. The impacts of agroforestry on soil multi-functionality depending on practices and duration, *Science of the Total Environment*, 2022, vol. 847, p. 157438, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157438.
- Maryganova V., Szajdak L.W., Tychinskaya L. et al. Chemical composition and hydrophobic-hydrophilic properties of humic acids from soils under shelterbelts of different age, *Physical, chemical and biological processes in soils*, Poznan, Wydawnictwo-Drukarnia “Prodruk”, 2010, p. 359–372.
- Novykh L.L., Chendev Y.G. Change in the Morphological Properties of Chernozems in an Agrosilvicultural Landscape, *Arid Ecosystems*, 2014, vol. 4, no. 1, p. 6–10, DOI: 10.1134/S2079096114010065.
- Perry C.H., Woodall C.W., Liknes G.C. et al. Filling the gap: improving estimates of working tree resources in agricultural landscapes, *Agroforestry Systems*, 2009, vol. 75, no. 1, p. 91–101, DOI: 10.1007/s10457-008-9125-6.
- Szajdak L.W., Życzyńska-Bałoniak I. Effectiveness of a shelterbelt in decreasing the level of inorganic elements in agricultural landscape, *Estonian Journal of Ecology*, 2013, vol. 62, no. 1, p. 24–34.
- Wezel A., Rajot J.L., Herbrig C. Influence of shrubs on soil characteristics and their function in Sahelian agroecosystems in semi-arid Niger, *Journal of arid environments*, 2000, vol. 44, no. 4, p. 383–398, DOI: 10.1006/jare.1999.0609.
- Wu Y., Wang Q., Wang H. et al. Shelterbelt poplar forests induced soil changes in deep soil profiles and climates contributed their inter-site variations in dryland regions, northeastern China, *Frontiers in Plant Science*, 2019, vol. 10, p. 220, DOI: 10.3389/fpls.2019.00220.

Поступила в редакцию 05.04.2024

После доработки 15.04.2024

Принята к публикации 24.04.2024

## SHELTERBELTS AS A FACTOR OF SOIL FORMATION IN AGROLANDSCAPES OF THE SOUTHERN PART OF THE CENTRAL RUSSIAN UPLAND

Yu.G. Chendev<sup>1</sup>, A.N. Gennadiev<sup>2</sup>, M.A. Smirnova<sup>3</sup>, M.G. Lebedeva<sup>4</sup>

<sup>1,4</sup> *Belgorod State University, Institute of Earth Sciences*

<sup>2,3</sup> *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of landscape geochemistry and soil geography*

<sup>1</sup> *Department of Environmental Management and Land Cadastre, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: chendev@bsu.edu.ru*

<sup>2</sup> *Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: alexagenna@mail.ru*

<sup>3</sup> *Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: summerija@yandex.ru*

<sup>4</sup> *Department of geography, geoecology and life safety, Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: lebedeva\_m@bsu.edu.ru*

The study aimed to identify the impact of shelterbelts on cultivated soils at three key sites in the forest-steppe zone of the southern part of the Central Russian Uplands. Automorphic chernozems were studied under 30 m wide longitudinally oriented broad-leaved shelterbelts; their plowed analogues – near the shelterbelts. The research was carried out in the area with heavy loamy and clayey typical chernozems. Over 60 years of shelterbelt growth, significant changes in the morphological, physical, and chemical properties of chernozems have occurred. Field soil moisture was analyzed during two growing seasons (2020–2021) showing that soils in the fields are moister to the west of the shelterbelts than to the east, primarily due to the western transport of air masses in the warm season. Compared to arable soils, those under shelterbelts demonstrated greater depth of the humus-accumulative part of the profiles (on average by 13 cm), signs of clay illuviation in the B horizons (glossy films and thin cutans), and fragmentary lightening of the middle and lower parts of the humus layer in the form of a weak skeleton deposit. There is a radial outflow of carbonates in soils under shelterbelts, compared to arable analogues. Three-meter deep soil profile contains on average 40–50 t/ha less carbonate carbon than the arable soils. These differences indicate an evolutionary transformation of soils under shelterbelts from typical chernozems to leached chernozems. Higher stocks of organic carbon have been recorded in the three-meter profiles of shelterbelt soils (on average by 27 t/ha) compared to arable soils. The composition of humus in chernozems under shelterbelts undergoes significant transformation towards a forest type: the content of fulvic acid increases in the 0–20 cm layer, and deeper layers show a maximum accumulation of humic acids, while the chernozem type of its vertical distribution remains characteristic of soils on arable lands. Lateral transfer of several substances (particularly phosphorus) from arable land towards shelterbelts soils has been established due to the desuction activity of tree root systems. Thus, shelterbelts activate a complex of autochthonous and allochthonous phenomena in soil cover, resulting in an obvious transformation of soils over a 60-year period.

**Keywords:** forest-steppe, shelterbelts, chernozems, arable soils, agroforestry, soil evolution and dynamics, soil moisture, soil carbonates, humus

**Acknowledgements.** The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 19-17-00056-P).

### REFERENCES

- Agroekologicheskoe sostoyanie chernozemov* [Agroecological state of chernozems], Kursk, Izd-vo vserossijskogo NII zemledeliya i zashchity pochv ot erozii Publ., 1996, 330 p. (In Russian)
- Agrolesomeliyaciya i plodorodie pochv* [Agroforestry and soil fertility], E.S. Pavlovskij (ed.), Moscow, Agropromizdat Publ., 1991, 288 p. (In Russian)
- Brandle J.R., Hodges L., Zhou X.H. Windbreaks in North American agricultural systems, *Agroforestry Systems*, 2004, no. 61, p. 65–78, DOI: 10.1007/978-94-017-2424-1\_5.
- Breman H., Kessler J.J. The potential benefits of agroforestry in the Sahel and other semi-arid regions, *European Journal of Agronomy*, 1997, vol. 7, no. 1-3, p. 25–33, DOI: 10.1016/S1161-0301(97)00035-X.
- Chegodavaeva N.D., Kargin I.F., Astradamov V.I. *Vliyanie polezashchitnyh lesnyh polos na vodno-fizicheskie svoystva pochvy i sostav naseleniya zhuzhelic privileyushchih polej: monografiya* [Study of shelterbelt forest belts on the water-physical properties of the soil and the composition of the population of ground beetles colonizing the fields: monograph], Saransk, Mordovskoe kn. Izd-vo Publ., 2005, 125 p. (In Russian)
- Chendev Yu.G., Novykh L.L., Sauer T.J. et al. Evolution of Soil Carbon Storage and Morphometric Properties of Afforested Soils in the U.S. Great Plains, *Soil Carbon. Progress in Soil Science*, monograph., New York, Springer International Publ., 2014, p. 475–482, DOI: 10.1007/978-3-319-04084-4\_47.
- Chendev Yu.G., Sauer T.J., Ramirez G.H., Burras C.L. History of East European Chernozem Soil Degradation; Protection and Restoration by Tree Windbreaks in the Russian Steppe, *Sustainability*, 2015, no. 7(1), p. 705–724, DOI: 10.3390/su7010705.

- Chendev Yu.G., Soer T.D., Gennadiev A.N. et al. Accumulation of organic carbon in chernozems (Mollisols) under shelterbelts in Russia and the United States, *Eurasian soil science*, 2015, vol. 48, p. 43–53, DOI: 10.1134/S1064229315010032.
- Cheverdin Yu.I., Vavin V.S., Ahtyamov A.G. [Formation of the salt regime of soils under the influence of forest belts], *Sovremennye tendencii razvitiya agrarnogo kompleksa: Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* [Modern trends of the agrarian complex development: Proceedings of the International scientific and practical conference], Solenoe Zajmishche, FGBNU “Prikaspijskij nauchno-issledovatel'skij institut aridnogo zemledeliya”, Regional'nyj Fond “Agrarnyj universitet-skij kompleks” Publ., 2016, p. 352–355. (In Russian)
- Cheverdin Yu.I., Vavin V.S., Ahtyamov A.G., Voronin D.A. Rol' lesnyh nasazhdenij v izmenenii svojstv chernozemov [The role of forest plantations on changes in chernozems properties], *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2014, no. 2, p. 11–14. (In Russian)
- Danilov G.G., Lobanov D.A. *Agrolesomeliaciya lesostepi* [Agroforestry of forest-steppe], Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973, 125 p.
- Hitrov N.B., Cheverdin Yu.I. Pochvy Kamennoj stepi ot vremeni V.V. Dokuchaeva do nashih dnei [Soils of the Kamennaya Steppe from the time of V.V. Dokuchaev to the present days], *Zhivye i biokosnye sistemy*, 2016, no. 16, DOI: 10.18522/2308-9709-2016-16-2. (In Russian)
- Kaganov V.V. Izmenenie ekosistemnyh zasobov ugleroda pri oblesenii v stepnoj i polupustynnoj zonah Evropejskoj chasti Rossii [Changes in ecosystem carbon stocks during afforestation in the steppe and semi-desert zones of the European part of Russia], *Problemy regional'noj ekologii*, 2012, no. 4, p. 7–12. (In Russian)
- Kamennaya step': Lesoagrarnye landshafty* [Kamennaya Steppe: forest-agrarian landscapes], Voronezh, Izd-vo Voronezh. un-ta Publ., 1992, 224 p. (In Russian)
- Kogut B.M., Titova N.A., Buleeva V.S. Antropogennaya transformaciya kachestvennogo sostava gumusa chernozemov Kamennoj stepi [Anthropogenic transformation of the qualitative composition of humus in the chernozems of the Kamennaya Steppe], *Byulleten' pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*, 2009, no. 64, p. 41–49. (In Russian)
- Kolesnikova L.V. *Lesnye polosy i ih vliyanie na plodorodie chernozema obyknovennogo i produktivnost' ugodij v stepi Privolzhskoj vozvyshehnosti* [Shelterbelts and their impact on the fertility of typical chernozem and land productivity in the steppe of the Near-Volga Upland], Ph.D. thesis in agricultural science, Saratov, 2006, 238 p. (In Russian)
- Korolev V.A., Gromovik A.I., Jonko O.A. Changes in the organic matter forms in chernozems of the Kamennaya Steppe under different land uses, locations, and hydromorphism degrees, *Eurasian soil science*, 2013, vol. 46, p. 1230–1240, DOI: 10.1134/S1064229313120065.
- Kort J. Benefits of windbreaks to field and forage crops, *Agricultural Ecosystems and Environment*, 1988, vol. 22/23, p. 165–190, DOI: 10.1016/0167-8809(88)90017-5.
- Kretinin V.M. Monitoring plodorodiya pochv lesoagrarnogo landshafta lesostepi Srednerusskoj ravniny [Monitoring of soil fertility within the forest-agrolandscape in forest-steppe of the Middle Russian Plain], *Vestnik s.-h. nauki*, 1991, no. 6, p. 45–49. (In Russian)
- Kretinin V.M. Monitoring plodorodiya pochv lesoagrarnykh landshaftov lesostepnoj zony [Monitoring of soil fertility of forest-agrolandscapes in the forest-steppe zone], *Dokl. VASKHNIL*, 1992, no. 3, p. 16–20. (In Russian)
- Li S., Gong S., Hou Y. et al. The impacts of agroforestry on soil multi-functionality depending on practices and duration, *Science of the Total Environment*, 2022, vol. 847, p. 157438, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157438.
- Maryganova V., Szajdak L.W., Tychinskaya L., Parmon S. Chemical composition and hydrophobic-hydrophilic properties of humic acids from soils under shelterbelts of different age, *Physical, chemical and biological processes in soils*, Poznan, Wydawnictwo-Drukarnia “Prodruck”, 2010, p. 359–372.
- Mnogofunkcional'naya rol' zashchitnykh lesnyh nasazhdenij [Multifunctional role of protective forest plantings], *Byulleten' pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*, 2017, no. 88, p. 121–137.
- Novykh L.L., Chendev Y.G. Change in the Morphological Properties of Chernozems in an Agrosilvicultural Landscape, *Arid Ecosystems*, 2014, vol. 4, no. 1, p. 6–10, DOI: 10.1134/S2079096114010065.
- Perry C.H., Woodall C.W., Liknes G.C., Schoeneberger M.M. Filling the gap: improving estimates of working tree resources in agricultural landscapes, *Agroforestry Systems*, 2009, vol. 75, no. 1, p. 91–101, DOI: 10.1007/s10457-008-9125-6.
- Ponomareva V.V., Plotnikova T.A. *Gumus i pochvoobrazovanie* [Humus and soil formation], Leningrad, Nauka Publ., 1980, 222 p. (In Russian)
- Prihod'ko V.E., Cheverdin Yu.I., Titova T.V. Changes in the organic matter forms in chernozems of the Kamennaya Steppe under different land uses, locations, and hydromorphism degrees, *Eurasian soil science*, 2013, vol. 46, p. 1230–1240, DOI: 10.1134/S1064229313120065.
- Rubilin E.V., Vernander N.B., Parfenova E.I. et al. [Gray forest soils of the territory of the USSR], *Genesis, klassifikaciya i kartografiya pochv SSSR (doklady k VIII Mezhdunarodnomu kongressu pochvovedov)* [Genesis, classification and cartography of soils of the USSR (reports to the VIII International Congress of Soil Scientists)], Moscow, Nauka Publ., 1964, p. 58–73. (In Russian)
- Ruhovich D.I., Simakova M.S., Kulyanica et al. Impact of shelterbelts on the fragmentation of erosional networks and local soil waterlogging, *Eurasian soil science*, 2014, vol. 47, p. 1086–1099, DOI: 10.1134/S106422931411009X.
- Stecenko A.V. Lesnye proekty – rezul'taty Kiotskogo protokola [Forestry projects – results of the Kyoto Protocol], *Vestnik altajskoj nauki*, 2013, no. 2–2, p. 48–51. (In Russian)
- Szajdak L.W., Życzyńska-Bałoniak I. Effectiveness of a shelterbelt in decreasing the level of inorganic elements in agricultural landscape, *Estonian Journal of Ecology*, 2013, vol. 62, no. 1, p. 24–34.
- Trofimov I.T. Bekhovyyh Yu.V., Bolotov A.G., Sizov E.G. Fizicheskie svojstva chernozemov pod hvojnymi lesopolosami [Physical properties of chernozems under coniferous forest belts], *Vestnik Altajskogo gos. agrarnogo un-ta*, 2013, no. 9(107), p. 23–27. (In Russian)
- Tumin G.M. *Vliyanie lesnykh polos na pochvu v Kamennoj Step'i* [Influence of forest belts on soil in the Kamennaya Steppe], Voronezh, Kommuna Publ., 1930, 40 p. (In Russian)

- Turusov V.I., Lepekhin A.A., Chekanyshkin A.S. *Opyt lesnoj melioracii stepnyh landshaftov (k 125-letiyu "Osoboj ekspedicii..." V.V. Dokuchaeva)* [Experience of forest reclamation of steppe landscapes (to the 125th anniversary of the "Special Expedition..." of V.V. Dokuchaev)], Voronezh, Istoki Publ., 2017, 228 p. (in Russian)
- Wezel A., Rajot J.L., Herbrig C. Influence of shrubs on soil characteristics and their function in Sahelian agro-ecosystems in semi-arid Niger, *Journal of arid environments*, 2000, vol. 44, no. 4, p. 383–398, DOI: 10.1006/jare.1999.0609.
- Wu Y., Wang Q., Wang H. et al. Shelterbelt poplar forests induced soil changes in deep soil profiles and climates contributed their inter-site variations in dryland regions, northeastern China, *Frontiers in Plant Science*, 2019, vol. 10, p. 220, DOI: 10.3389/fpls.2019.00220.

Received 05.04.2024

Revised 15.04.2024

Accepted 24.04.2024

## К ВОПРОСУ О ГИРКАНСКИХ ОТЛОЖЕНИЯХ НИЖНЕЙ ВОЛГИ

А.А. Свиточ<sup>1</sup>, Р.Р. Макшаев<sup>2</sup>, Т.С. Клювиткина<sup>3</sup>, А.А. Ткач<sup>4</sup><sup>1–4</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, лаборатория новейших отложений и палеогеографии плейстоцена<sup>1</sup>Гл. науч. сотр., д-р геогр. наук<sup>2</sup>Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: radikm1986@mail.ru<sup>3</sup>Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: t.klyuvitkina@mail.ru<sup>4</sup>Мл. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: alinaberdnikowa@yandex.ru

На примере опорного разреза Копановка изучено строение верхнеплейстоценовых отложений для верификации гирканского горизонта в Нижнем Поволжье. Синтез данных по стратиграфии и анализу малакофауны, полученных при сопоставлении собственных полевых материалов и литературных сведений, в настоящий момент не позволяет выделить гирканские отложения в разрезе Копановка. Выдвинутые предложения о гирканском возрасте отложений в районе разреза Цаган-Аман не согласуются с многочисленными данными по стратиграфии и абсолютной хронологии верхнеплейстоценовых отложений Нижнего Поволжья. Гирканские отложения отмечены только в отложениях Маныча и северной части Каспийского моря, возраст их накопления соотносится со стадией МИС-5.

**Ключевые слова:** поздний плейстоцен, Каспийское море, стратиграфия, малакофауна

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.9

## ВВЕДЕНИЕ

Гирканские отложения древнего Каспия установлены Г.И. Поповым [1949] и Г.И. Горецким [1953] на Маныче. Гирканский этап отвечает развитию трансгрессивной фазы Каспийского моря. Г.И. Горецкий выделил гирканские отложения из кернов буровых скважин из северо-западного Прикаспия и долины Маныча и соотнес их с осадками верхнехазарской трансгрессии [Горецкий, 1957]. По этим же материалам Г.И. Попов описал гирканские отложения северного Прикаспия и восточной части долины Маныча как самый нижний горизонт хвалынской толщи [1957, 1961]. В этих слоях была обнаружена фауна хвалынского типа, но приуроченная к этапу до максимальной стадии хвалынской трансгрессии Каспия. Несколько позднее Г.И. Попов [1967, 1983] выделил отдельную гирканскую трансгрессию, обосновав это залеганием ательских субаэральных песков между гирканскими и хвалынскими отложениями. Позднее по материалам бурения они выделены между устьем р. Восточного Маныча и дельтой р. Волги, а также в Северном Каспии [Безродных и др., 2015; Янина, 2012; Sorokin et al., 2018; Курбанов и др., 2018]. Максимальное положение уровня гирканского бассейна до сих пор не установлено, существуют лишь предположения, что береговая линия достигала отметок 0–20 м абс. [Попов, 1967; Krijgsmann et al., 2019; Tudryn et al., 2022]. В гирканский этап существовал сброс Каспийских вод

через Манычский пролив в Черное море, где в этот момент развивалась последняя фаза карангатской трансгрессии [Попов, 1983; Yanina, 2014].

Возраст гирканского этапа в течение длительного времени был предметом дискуссий и до сих пор точно не установлен. Данные термолюминесцентного и ОСЛ датирования соответствуют интервалу 120–90 т. л. н. [Курбанов и др., 2018]. Радиоуглеродные даты гирканских раковин из Северного Каспия превышают 55 т. л. н. (это предельные значения для данной методики). Учитывая особенности перекристаллизации материала, возрастные величины оцениваются в 75–80 т. л. н. [Sorokin et al., 2018]. Существует также радиоуглеродная дата – 43 т. л. н., полученная из разреза Цаган-Аман, которая рассматривается авторами [Tudryn et al., 2013; Лаврушин и др., 2014] как гирканская.

По составу гирканские отложения представлены разнообразными песчано-глинистыми осадками, содержащими раковины солоноватоводных моллюсков: *Didacna subcatillus*, *D. delenda*, *D. parallela*, *D. cristata*, *D. pallasi*, *D. subcrassa*, а также пресноводных теплолюбивых моллюсков *Corbicula fluminalis* [Янина, 2012].

В стратотипических изученных опорных разрезах плейстоцена Нижней Волги гирканские отложения были отмечены только Г.И. Поповым [1967], а позднее Ю.А. Лаврушиным с соавторами [2014]. Другими исследователями Поволжья [Васи-

льев, 1961; Гричук, 1954; Москвитин, 1962; Свиточ, 2012; Федоров, 1957; Шкатова, 1973] гирканские отложения в опорных нижеволжских разрезах не выделялись. В настоящей работе дается оценка собственных фактологических материалов по изучению серии разрезов и анализ литературных данных для верификации гирканских отложений в Нижнем Поволжье.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалы исследования опираются главным образом на анализ литологического строения одного из наиболее изученных разрезов в Нижнем Поволжье – Копановка (Астраханская область) (рис. 1). В работе приводится анализ как собственных по-

левых материалов по изучению разреза Копановка, так и литературных данных. Для проведения корреляции строения отложений разреза Копановка приводятся детальные литологические описания Г.И. Попова [1967], В.П. Гричука [1954], П.В. Федорова [1957], Е.Ю. Васильева [1961], А.И. Москвитина [1962], В.К. Шкатовой [1973].

Разрез Копановка представляет собой вытянутое на почти 5 км береговое обнажение на правом борту р. Волги, начинающееся в 2,5 км выше одноименного села и заканчивающееся на его южной окраине. Исследованная часть обнажения располагается в 700 м севернее с. Копановка и вскрывает строение 23 м толщи нижнехазарских, ниже- и верхнехвалынских и голоценовых отложений (см. рис. 1).

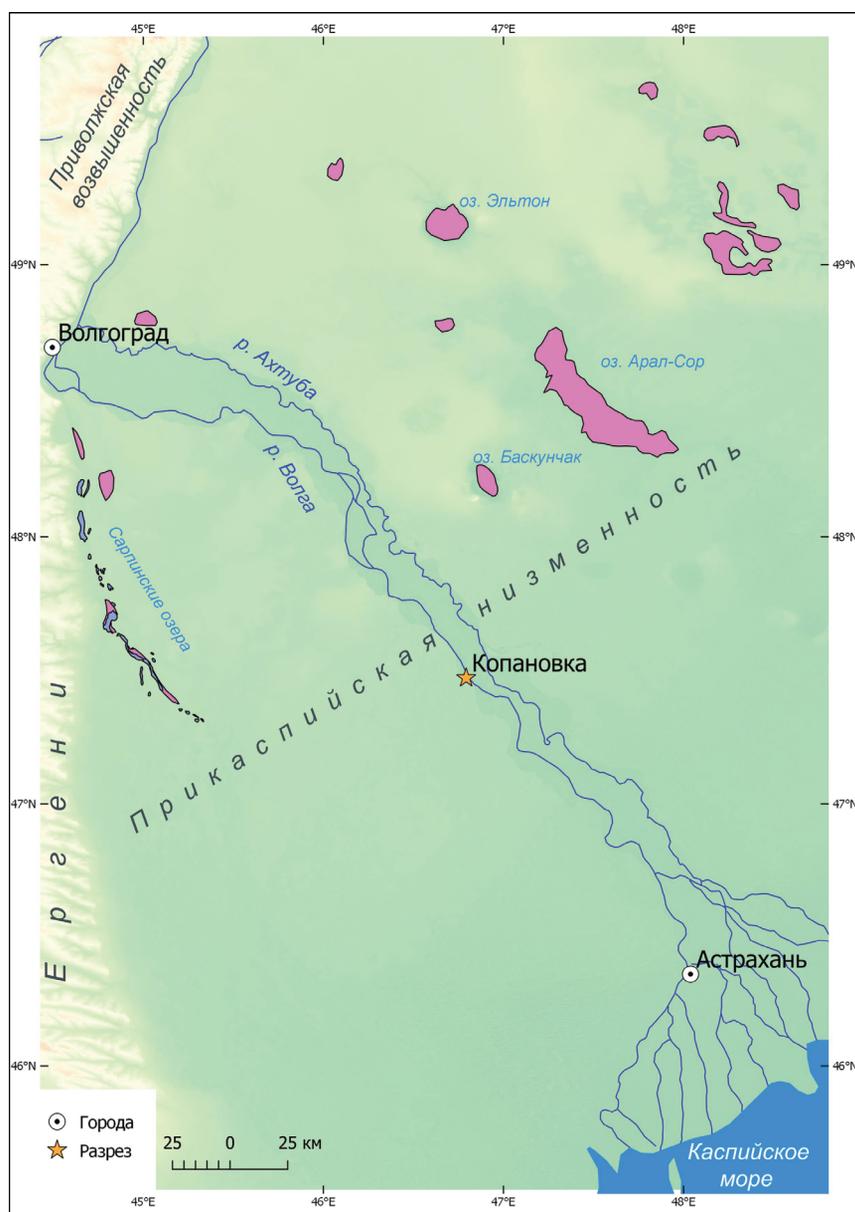


Рис. 1. Местоположение разреза Копановка

Fig. 1. Location of Kopanovka section

Из нижнехвалынских отложений (слои 2, 3 и 4) были отобраны раковины хвалынских моллюсков для проведения радиоуглеродного датирования в научной лаборатории геоморфологических и палеогеографических исследований полярных регионов и Мирового океана СПбГУ (индекс ЛУ). Полученные радиоуглеродные даты были откалиброваны с помощью приложения CALIB 8.1 [CALIB, 2021] с использованием калибровочной шкалы IntCal20 [Reimer et al., 2020]. Все даты представлены в доверительном интервале  $2\sigma$ .

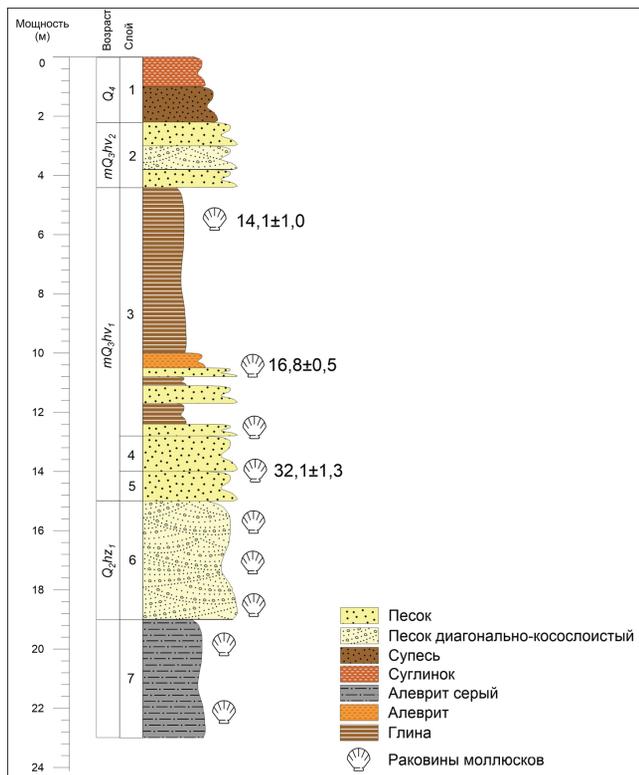


Рис. 2. Строение разреза Копановка. Радиоуглеродные даты (в т. л. н.) представлены из работы [Макшаев, Ткач, 2023]

Fig. 2. The structure of the Kopanovka section. Radiocarbon dates (ka) are presented from the work [Makshaev, Tkach, 2023]

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В исследованном разрезе Копановка (рис. 2) верхняя часть отложений представлена светло-коричневыми суглинками и серовато-бежевыми супесями (слой 1), которые залегают на верхнехвалынских ( $h\nu_2$ ) диагонально-косослоистых бежевых песках (слой 2).

Ниже залегают мощная толща нижнехвалынских ( $h\nu_1$ ) шоколадных глин (слой 3) с включениями тонких прослоев алевроитов и песков. В верхней и нижней частях слоя 3 в алевроито-песчаных прослоях встречаются скопления раковин хвалынских моллю-

сков *Didacna ebersini*, *D. praetrigonoides*, *D. delenda* и *Dreissena distincta*. По двум образцам из данных прослоев получены даты  $14,1 \pm 1,0$  (ЛУ-6917) и  $16,8 \pm 0,5$  кал. т. л. (ЛУ-8741). Основание нижнехвалынских отложений представлено слоями 4 и 5. Слой 4 сложен светло-бежевыми песками с линзами раковин моллюсков *Didacna protracta*, *D. parallela*, *D. ebersini*, *Dreissena polymorpha*, *Monodacna sp.* и *Adacna sp.* Слой 5 является переходным между нижнехвалынскими и хазарскими отложениями. Он представлен плотными, хорошо отсортированными бежевыми песками с включениями раковин *Didacna nalivekini* и *D. praetrigonoides*. По раковинам была получена радиоуглеродная дата  $32,1 \pm 1,3$  (ЛУ-8751). Нижнехазарские отложения ( $hz_1$ ) (слой 6) представлены диагонально-косослоистыми бежевыми песками с железистыми вкраплениями и крупными раковинами солоноватоводных (*Didacna pallasii*, *D. subpyramidata*, *D. pontocaspia*, *Monodacna sp.*) и пресноводных (*Corbicula fluminalis*, *Viviparus viviparus*) видов. В основании изученного обнажения залегают слой 7, представленный плотными горизонтально-слоистыми сизыми глинами, в которых встречаются крупные раковины *Didacna subpyramidata* и более редкие *Didacna pallasii*.

Согласно полученным результатам по литологическому строению и фаунистическому составу в исследованном обнажении Копановка выделяется группа голоценовых, верхне- и нижнехвалынских и нижнехазарских отложений. В то же время гирканские отложения, выделенные Г.И. Поповым [1967] в разрезе Копановка в качестве стратотипа, в Нижнем Поволжье обнаружены не были.

В работе Г.И. Попова [1967] (рис. 3) литологическое строение разреза Копановка и последующее выделение гирканских отложений были изучены приблизительно в той же части берегового обнажения (ориентир – в 1,2 км от пристани). Г.И. Поповым отмечено, что под верхнехвалынскими слоистыми супесями (слой 2) залегают шоколадно-бурые слоистые глины (слой 3) мощностью до 9 м, с разрывом перекрывающие ательско-ахтубинские пески (слой 4) буро-серые, косослоистые с раковинами моллюсков, характерных для руслового аллювия (*Dreissena polymorpha*, *Sphaerium rivgicola*, *Viviparus sp.*). В основании отложения содержат гравий и раковины каспийских моллюсков. Мощность до 6 м. Пески лежат на гирканских отложениях (слой 5). По составу это глины серо-кофейные с тонкими прослоями песков. В крупных прослоях и линзах песка содержатся раковины *Didacna praetrigonoides*, *D. cristata*, *D. zhukovi*, *D. subcatillus*, *Monodacna caspia*, *Adacna plicata*, *A. vitrea*, *Dreissena rostriformis*, *D. turricaspia*, *Lithoglyphus sp.* Граница резкая, неровная, мощность до 3 м. Ниже лежит глина серая, слоистая (слой 6),

мощностью 0,7 м, перекрывающая песок зеленовато-серый, с раковинами *Didacna pallasii*, *D. subcrassa*, *D. paleotrigonoides* (слой 7), мощностью 1,6 м. Таким образом, в разрезе гирканские слоистые глины слоя 5, охарактеризованные комплексом дидакн (*D. cristata*, *D. subcatillus* и др.), с размывом перекрыты ательскими аллювиальными песками слоя 4 и с размывом лежат на морских хазарских отложениях слоя 6.

Согласно работе В.П. Гричука [1954], в разрезе Копановка (см. рис. 3) выше пристани под шоколадными глинами (hv<sub>1</sub>, мощность 2,15 м) залегает песок светло-серый, диагонально-слоистый, с типичной хвалынской фауной: *Didacna protracta*, *D. parallela*, *D. ebersini*, *Monodacna caspia* и *Dreissena rostriformis*. В описании Г.И. Попова [1967] этим осадкам соответствуют ательско-ахтубинские аллювиальные пески светлые, косослоистые, мощностью до 6 м и замещающие их по простиранию ательские суглинки (2–3 м), постепенно переходящие в гирканские глины. Смежные им аллювиальные пески лежат на гирканских отложениях с размывом.

По описанию В.П. Гричука [1954], гирканским отложениям в разрезе может соответствовать глина слоя d светло-серая, с прослоями песка и супеси. В песке содержится фауна, аналогичная хвалынской слоя e, что резко противоречит составу гирканской фауны, приводимому Г.И. Поповым. Глина залегает с резким контактом на супеси светло-серой (слой e), косослоистой, с прослоями многочисленной битой и целой хазарской ракушки: *Didacna pallasii*, *D. subovalis*, *D. subpyramidata*, *Monodacna caspia*, *Adacna plicata*, *Dreissena rostriformis*.

По долине в этом слое найдена многочисленная пресноводная фауна: *Viviparus viviparus*, *Valvata piscinalis*, *Micromelania sp.*, *M. caspia*.

Если по В.П. Гричуку отнести глины (слой d), содержащие типичную хвалынскую фауну, к нижнехвалынским отложениям, то за гирканские осадки должны приниматься нижележащие косослоистые супеси (слой 5) с обильной хазарской фауной, что делает предположение маловероятным.

В разрезе Копановка, по заключению Ю.М. Васильева [1961] (см. рис. 3), ниже хвалынских отложений, представленных шоколадной глиной, супесью и суглинком, с размывом лежит песок (слой 4) косослоистый, светло-серый с прослоями глины, с раковинами: *Didacna pallasii*, *D. subpyramidata*, *D. nalivkini*, *D. bogatschevi*, *Dreissena polymorpha*, *Dr. distincta*, *Dr. celecenica*, *Micromelania*, *Monodacna sp.*, *Adacna sp.*, *Paludina sp.*, *Corbicula fluminalis*. В нижней части песок замещается слоистыми глинами. По неровному контакту, с глубокими трещинами они перекрывают суглинок (слой 5)

мощностью 4 м коричневый и бурый, в кровле с кротовинами, по неровной границе лежащий на глине слоистой (слой 6 мощностью 3–4 м), с прослоями супеси и песка по простиранию переходящей в песок косослоистый, с галькой и гравием и фауной *Didacna subpyramidata*. Ниже с размывом лежит песок (слой 7) голубовато-зеленый и бурый с множеством раковин пресноводных моллюсков, мощностью 1 м.

В разрезе Ю.М. Васильевым [1961] (см. рис. 3) установлены две фаунистически охарактеризованные морские хазарские толщи (слой 4, hz<sub>2</sub> и слои 5–6, hz<sub>1</sub>). Судя по присутствию типичной хазарской фауны, их трудно отнести к гирканским отложениям. Если пренебречь составом ископаемых моллюсков, гирканскими могли быть слоистые глины слоя 6, подстилаемые песками с хазарскими *Didacna subpyramidata*, *D. pallasii* и др.

В описании копановского разреза (1,5 км выше поселка), выполненном П.В. Федоровым [1957] (см. рис. 3), под шоколадными глинами (слой 2, мощность 4 м) с *Didacna protracta*, *Monodacna sp.*, *Adacna sp.*, *Viviparus sp.*, *Corbicula fluminalis*, *Dreissena rostriformis*, *Planorbis* местами от размыва сохранились ательские отложения (низы слоя 2). Ниже отложения постепенно переходят в конгломерат (слои 3–4, мощностью до 3,5 м) со множеством гальки и ракушки, где установлены *Didacna subpyramidata*, *D. crassa*. Конгломерат с отчетливым перерывом лежит на глинах комковатых, красно-бурых, континентального облика (слой 5), постепенно переходящих в глину (слой 6, мощность 1 м) серую, в основании бурую, с прослоями песков и тонкостворчатými мелкими раковинами: *Adacna plicata* (мощностью 4,5 м). В описании П.В. Федорова гирканские отложения выделить весьма трудно. Судя по положению, это могли быть глины слоя 6, содержащие раковины *Monodacna sp.*, *Adacna sp.*, *Didacna pallasii*, отличающиеся от вышележащих более грубых осадков (слой 4) следами континентального перерыва, которые постепенно переходят в темно-серые глины, содержащие хазарскую фауну. С подстилающими темно-серыми глинами, содержащими хазарскую фауну, они имеют постепенный переход.

Строение разреза Копановка (1,75 км выше пристани), по А.И. Москвитину [1962], схоже с описанием Г.И. Попова [1949]. Здесь (см. рис. 3) ниже шоколадных глин (слой 2), залегает песок (слой 3) светло-желтый, тонкозернистый, со множеством раковин: *Dreissena distincta*, *Didacna protracta*, *D. ebersini*, *Monodacna caspia*. Его сменяет толща песка мощностью 5 м (слой 4), полого- и диагонально-слоистого с *Litoglyphus sp.* От нижележащего слоя ила его отделяют глубокие клинья (слой 5, hz<sub>1</sub>,

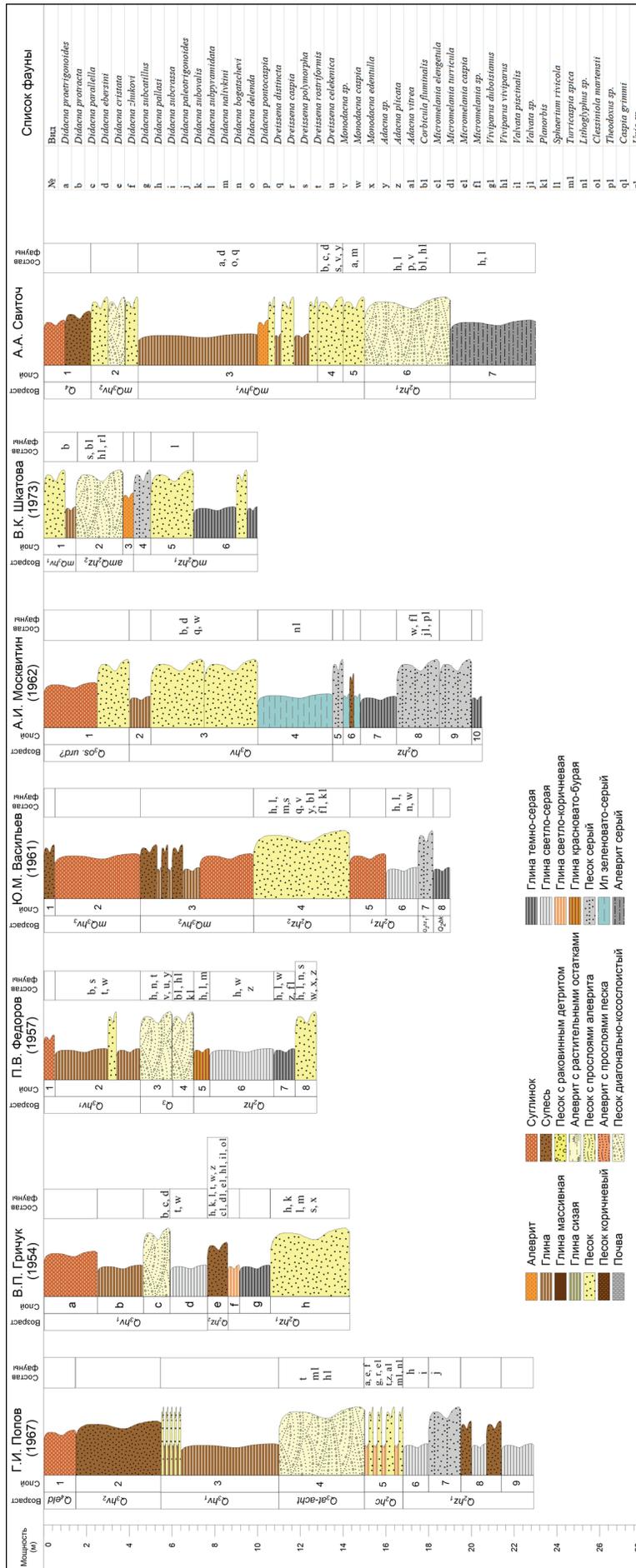


Рис. 3. Структурное разрезе Копановка  
Fig. 3. The structure of the Koranovka section

мощность 4 м) плотного, бурого и зеленовато-серого алевролита, местами с обильными мелкими раковинами *Adacna plicata* и *Monodacna caspia*. С резким контактом ниже залегает ил (слой 6) (мощность 0,7 м) с прослоями супеси, с фауной *Adacna* sp. и *Monodacna* sp., подстилаемый глиной (слой 7, мощность 1,7 м) серо-голубой. По Г.И. Попову [1967], в разрезе А.И. Москвитина гирканскими отложениями являются илы в слое 5–6, содержащие опресненную каспийскую фауну.

По данным В.К. Шкатовой [1973] (см. рис. 3), нижнехвалынские отложения (слой 1) подстилаются цаган-аманским мариноаллювием (слои 2–3), представленным грубыми косослоистыми песками с большим количеством переотложенных бакинских и раннехазарских солоноватоводных раковин. В этом же слое 2 обнаружены пресноводные раковины *Corbicula fluminalis*, *Viviparus viviparus*, *Unio* sp., *Dreissena polymorpha*. Ниже пески переходят в алевролиты (слой 3), в которых встречаются солоноватоводные раковины.

В нижней части разреза вскрываются толщи, относящиеся к копановскому маринию (раннехазарский этап). Копановский мариний представлен в слоях 4–6 и состоит из чередования песков и серых глин с фауной *Didacna subpyramidata*. По мнению В.К. Шкатовой [1973], выделяемые Г.И. Поповым гирканские отложения относятся к аллювиально-морским отложениям позднехазарского этапа (цаган-аманский мариноаллювий).

На основе проанализированного материала по литологическому и фаунистическому строению разреза Копановка выделить гирканские отложения затруднительно. Наиболее вероятно гирканские отложения были маломощными и были полностью размыты в последующие трансгрессивно-регрессивные циклы Каспийского моря. В то же время наличие гирканских отложений отмечено в близлежащем (в 10 км севернее разреза Копановка) разрезе Цаган-Аман [Лаврушин и др., 2014]. В данной работе предложена новая принципиальная схема строения разреза Цаган-Аман и всего этого стратотипического участка, вызывающая массу вопросов. По мнению авторов гирканские отложения отнесены к морским образованиям (палеохвалынская трансгрессия) и залегают между двумя горизонтами (палеоательским и ательским), сложенными субаэральными супесями и суглинками [Лаврушин и др., 2014]. Однако этому факту противоречит общее стратиграфическое положение верхнеплейстоценовых отложений Нижнего Поволжья [Zastrozhnov et al., 2016] и серия абсолютных дат для ательского этапа по ряду опорных объектов [Янина и др., 2017; Kurbanov et al., 2021; 2022; Taratunina et al., 2022]. Для доказательства выделения гирканских отложений необходим анализ ин-

ситной малакофауны, совершенно отсутствующий в работе. Данные, представленные в указанной работе, по большей части заимствованы из работы Г.И. Попова [1967], посвященной разрезу Копановка, и не отражают строение разреза Цаган-Аман. Отсутствие данных по изучению состава малакофауны – основы стратиграфического расчленения морского плейстоцена Каспия – не позволяет обоснованно говорить о возможности выделения осадков гирканской трансгрессии на месте хорошо установленных позднехазарских отложений.

Обратимся к представлениям о стратиграфическом расчленении разреза Цаган-Аман, подкрепленным достаточным количеством фактического материала, на примере работы В.К. Шкатовой [1973]. Так, в 1973 г. В.К. Шкатова отнесла отложения, выделенные Лаврушиным [2014] с соавторами как гирканские, к парастратотипу цаган-аманского мариноаллювия. По составу они представляют собой косослоистые пески и алевролиты, содержащие многочисленную фауну солоноватоводных и пресноводных моллюсков (*Didacna trigonoides*, *D. umbonata*, *D. subpallasi*, *D. delenda*, *Hypanis caspia*, *H. laeviscula*, *Sphaerium* sp., *Dreissena caspia*, *Dr. rostriformis*, *Dr. polymorpha*, *Unio* sp., *Viviparus* sp., *Lithoglyphus naticoides*), с обилием *Hypanis plicatus*, множеством *Corbicula fluminalis* и руководящей формой позднехазарского моря – *Didacna surachanica*, что позволяет отнести всю толщу цаган-аманского мариноаллювия к верхнему хазару. Отложения со следами мерзлотных деформаций перекрывают пойменную фацию волжского мариноаллювия (раннеательские по [Лаврушин и др., 2014]), к югу фациально переходящего в морские нижнехазарские отложения (копановская свита) [Шкатова, 1973].

Сравнительный анализ строения стратотипического разреза Копановка, выполненного Г.И. Поповым [1967] и другими исследователями, указывает на невозможность достоверного выделения в нем гирканских отложений. Решающим аргументом выступает состав ископаемых руководящих моллюсков. Ни в одном из приведенных описаний разрезов нет ни упоминаний, ни ссылок на гирканский комплекс моллюсков, отмеченный Г.И. Поповым [1967]: *Didacna praetrigonides*, *D. cristata*, *D. zhukovi*, *D. subcatillus*. В отложениях, которые по положению в разрезе можно было бы отнести к гирканским, не содержится их руководящих форм, а отмечаются лишь мелкие раковины *Adacna plicata* и *Monodacna caspia* в слое 5, а также *Monodacna caspia* и *Didacna pallasi* в слое 6 [Федоров, 1957].

По другим определениям, в этих отложениях присутствуют, наряду с различной пресноводной малакофауной, исключительно хазарские моллюски (*Didacna pallasi*, *D. subpyramidata*,

*D. paleotrigonoides* и др.). Всеми исследователями отмечается наличие в копановском разрезе двух разных по составу фаунистических комплексов – хазарского (раннего) и хвалынского (раннего).

Фациально разрез Копановка весьма пестрый, в нем также не удается достоверно проследить однотипное фациальное строение и простираение отмеченных гирканских слоев. Если пренебречь фаунистическими различиями разреза Копановка и выделять гирканские отложения по положению в разрезе – ниже ательских и выше хазарских образований, то среди них будут преобладать глины серых расцветок с прослоями песков. Реже они перекрыты глинами, в кровле разбитыми глубокими мерзлотными трещинами. Обычно они залегают под песками косослоистыми с прослоями глин и обилием разнообразной солоноватоводной и пресноводной фауны. Без резкого перерыва отложения часто перекрывают и близкие по строению серые слоистые глины [Москвитин, 1962; Попов, 1967; Свиточ, 2012] реже со следами размыва ниже залегают косослоистые пески [Васильев, 1961; Гричук, 1954].

Дискуссионным является и вопрос о возрасте гирканских отложений. В последнее время появились новые серии абсолютных датировок ( $C^{14}$ , ОСЛ), охватывающих практически весь поздний плейстоцен Каспия [Arslanov et al., 2016; Янина и др., 2017; Zastrozhnov et al., 2020; Kurbanov et al., 2021; 2022; Taratunina et al., 2022]. Результаты радиоуглеродного датирования гирканских отложений из северной акватории Каспийского моря в большинстве случаев попадают в предельные значения, существующие для данного метода – 50–55 кал. т. л. [Sorokin et al., 2018; Yanina et al., 2018]. Однако стратиграфический уровень и состав фауны отложений позволяют предположить, что гирканский трансгрессивный этап развивался в относительно теплых условиях в период изотопной стадии МИС 5 [Yanina et al., 2018]. В свою очередь, это подтверждается серией новых ОСЛ дат гирканских отложений Маныча, соответствующих возрасту порядка 119–107 т. л. [Kurbanov et al., 2018]. В то же время существует мнение об относительно молодом возрасте гирканской трансгрессии (первая половина МИС 3), основывающаяся на анализе данных радиоуглеродного датирования [Tudryn et al.,

2022]. По мнению авторов, гирканский трансгрессивный этап развивался между двумя ательскими стадиями в интервале 55,2 43,5 и 42,9 кал. тыс. л. н., а уровень бассейна достигал отметок 0–20 м абс. [Tudryn et al., 2022]. Однако «молодому» возрасту гирканских отложений, отвечающему начальной стадии МИС 3, противоречит целая группа абсолютных дат для ательского этапа, охватывающих интервал 25–80 т. л., полученных по отложениям Нижнего Поволжья и акватории Северного Каспия [Yanina et al., 2013; 2021; Taratunina et al., 2022; Kurbanov et al., 2021, 2022]. Ательский этап ознаменовался развитием глубокой регрессии Каспийского моря, в ходе которой уровень моря по разным оценкам опускался до –50 м абс. [Леонтьев и др., 1977], –140 м абс. [Лохин, Маев, 1990]. Для этого этапа было характерно накопление серий разногенетических типов отложений – лессов, почв, аллювиальных песков, озерных отложений на прилегающих к бассейну территориях [Федоров, 1957; Свиточ, Янина, 1997; Lebedeva et al., 2018; Kurbanov et al., 2021, 2022; Költringer et al., 2020, 2021; Taratunina et al., 2022]. Таким образом, приведенные данные по детальному комплексному анализу ательских отложений не подтверждают точку зрения о развитии гирканской трансгрессии в период МИС 3.

## ВЫВОДЫ

В разрезе Копановка выделяется группа верхне- и нижнехвалыньских и хазарских отложений, для которых характерны определенные малакофаунистические ассоциации, соотносящихся с основными позднеплейстоценовыми событиями Каспийского моря.

В разрезе Копановка не обнаружены ательские субэральные отложения. Вероятно они были эродированы последующей ранне- и позднехвалыньской трансгрессиями.

Состав малакофаунистических ассоциаций и строение отложений на данный момент не позволяют выделить гирканский этап в стратотипическом разрезе Нижнего Поволжья – Копановка.

Гирканские отложения, обнаруженные в ходе недавних исследований в долине Маныча и акватории Северного Каспия, позволяют соотнести этот этап с МИС 5.

**Благодарности.** Авторы выражают огромную благодарность рецензентам за важные комментарии и замечания. Научные исследования проведены в рамках проекта РНФ № 22-27-00164.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Безродных Ю.П., Делия С.В., Романюк Б.Ф. и др. Новые данные по стратиграфии верхнечетвертичных отложений Северного Каспия // Доклады Академии наук. 2015. № 462(1). С. 95–99.
- Васильев Ю.М. Антропоген Южного Заволжья. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 168 с.
- Горецкий Г.И. О палеогеографии Приазовья и Западного Приманычья в узунларо-гирканский и бур-

- тасские века // Вопросы географии. 1953. № 33. С. 190–221.
- Горецкий Г.И. О соотношении морских и континентальных осадков Приазовья, Приманьчья и Нижнего Придонья // Тр. Комиссии по изучению четвертичного периода. Т. XIII. 1957. С. 36–54.
- Гричук В.П. Материалы к палеоботанической характеристике четвертичных и плиоценовых отложений северо-западной части Прикаспийской низменности // Тр. ИГ АН СССР. 1954. Т. 61. № 11. С. 5–79.
- Курбанов Р.Н., Янина Т.А., Мюррей А. и др. Гирканский этап в позднплейстоценовой истории Маньчской депрессии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2018. № 3. С. 77–88.
- Лаврушин Ю.А., Спиридонова Е.А., Тудрин А. и др. Каспий: гидрологические события позднего кватера // Бюлл. Комиссии по изучению четвертичного периода. 2014. № 73. С. 19–50.
- Леонтьев О.К., Маев Е.Г., Рычагов Г.И. Геоморфология берегов и дна Каспийского моря. М.: МГУ, 1977. 210 с.
- Лохин М.Ю., Маев Е.Г. Позднплейстоценовые дельты на шельфе северной части Среднего Каспия // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 1990. № 3. С. 34–40.
- Макишев Р.Р., Ткач Н.Т. Хронология хвалынского этапа развития Каспия по данным радиоуглеродного датирования // Геоморфология и палеогеография. 2023. № 54(1). С. 37–54. DOI: 10.31857/S2949178923010103.
- Москвитин А.И. Плейстоцен Нижнего Поволжья // Тр. Геологического ин-та АН СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1962. Вып. 64. 264 с.
- Попов Г.И. Четвертичные отложения западной части Прикаспийской низменности и Маньчской долины. М.: Гидропроект, 1949. 75 с.
- Попов Г.И. Гирканская трансгрессия в Северном Прикаспии // Бюлл. Комиссии по изучению четвертичного периода. 1967. № 33. С. 77–86.
- Попов Г.И. Плейстоцен черноморско-каспийских проливов. М.: Наука, 1983. 216 с.
- Свиточ А.А. Материалы по стратотипам региональных и местных подразделений каспийского неоплейстоцена и голоцена // М.: Россельхозакадемия, 2012. Т. 2. С. 115–143.
- Свиточ А.А., Янина Т.А. Четвертичные отложения побережий Каспийского моря. М.: Россельхозакадемия, 1997. 267 с.
- Федоров П.В. Стратиграфия четвертичных отложений и история развития Каспийского моря // Тр. Геологического ин-та АН СССР. 1957. Вып. 10. С. 298.
- Шкатова В.К. О возрасте осадков хазарского комплекса на Нижней Волге // Хронология плейстоцена и климатическая стратиграфия. Л., 1973. С. 203–223.
- Янина Т.А. Гирканский этап в плейстоценовой истории Каспийского моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2014. № 3. С. 3–9.
- Янина Т.А. Неоплейстоцен Понто-Каспия: биостратиграфия, палеогеография, корреляция. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2012. 264 с.
- Янина Т.А., Свиточ А.А., Курбанов Р.Н. и др. Опыт датирования плейстоценовых отложений Нижнего Поволжья методом оптически стимулированной люминесценции // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2017. № 1. С. 20–28.
- Arslanov Kh.A., Yanina T.A., Chepalyga A.L. et al. On the age of the Khvalynian deposits of the Caspian Sea coasts according to  $^{14}\text{C}$  and  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  methods, *Quaternary International*, 2016, vol. 409, p. 81–87, DOI: 10.1016/j.quaint.2015.05.067.
- Költringer C., Brad'ak B., Stevens T. et al. Palaeoenvironmental implications from Lower Volga loess – joint magnetic fabric and multi-proxy analyses, *Quaternary Science Reviews*, 2021, vol. 267, 107057, DOI: 10.1016/j.quascirev.2021.107057.
- Költringer C., Stevens T., Brad'ak B. et al. Enviromagnetic study of Late Quaternary environmental evolution in Lower Volga loess sequences, Russia, *Quaternary Research*, 2020, vol. 103, p. 1–25, DOI: 10.1017/qua.2020.73.
- Krijgsman W., Tesakov A., Yanina T. et al. Quaternary time scales for the Pontocaspian domain: interbasinal connectivity and faunal evolution, *Earth Science Reviews*, 2019, vol. 188, p. 1–40.
- Kurbanov R.N., Buylaert J.-P., Stevens T. et al. A detailed luminescence chronology of the Lower Volga loess-palaeosol sequence at Leninsk, *Quaternary Geochronology*, 2022, vol. 73(11–12), 101376, DOI: 10.1016/j.quageo.2022.101376.
- Kurbanov R.N., Murray A.S., Yanina T.A. et al. First optically stimulated luminescence ages of the Early Khvalynian Caspian Sea transgression in the lower Volga, *Boreas*, 2021, vol. 50, no. 1, p. 134–146, DOI: 10.1111/bor.12478.
- Lebedeva M., Makeev A., Rusakov A. et al. Landscape dynamics in the caspian lowlands since the last deglaciation reconstructed from the pedosedimentary sequence of srednaya Akhtuba, southern Russia, *Geosciences*, 2018, vol. 8, p. 1–21.
- Sorokin V.M., Yanina T.A., Bezrodnykh Yu.P. et al. Identification and age of submarine Girkanian sediment beds (Upper Pleistocene) in the Caspian Sea, *Quaternary International*, 2018, vol. 465A, p. 152–157.
- Reimer P.J., Austin W.E.N., Bard E. et al. The IntCal20 northern hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP), *Radiocarbon*, 2020, vol. 62, p. 725–757.
- Taratunina N.A., Buylaert J.-P., Kurbanov R.N. et al. Late Quaternary evolution of lower reaches of the Volga River (Raygorod section) based on luminescence dating, *Quaternary Geochronology*, 2022, vol. 73, 101369, DOI: 10.1016/j.quageo.2022.101369.
- Tudryn A., Gibert-Brunet E., Tucholka P. et al. Chronology of the Late Pleistocene Caspian Sea hydrologic changes: A review of dates and proposed climate-induced driving mechanisms, *Quaternary Science Reviews*, 2022, vol. 293, 107672, DOI: 10.1016/j.quascirev.2022.107672.
- Tudryn A., Tucholka P., Chalif F. et al. Late Quaternary Caspian Sea environment: Late Khazarian and early Khvalynian transgressions from the lower reaches of the Volga River, *Quaternary International*, 2013, vol. 292, p. 193–204.
- Yanina T.A. The Ponto-Caspian region: environmental consequences of climate change during the late Pleistocene, *Quaternary International*, 2014, vol. 345, p. 88–99.
- Yanina T.A., Sorokin V., Bezrodnykh Yu. et al. Late Pleistocene climatic events reflected in the Caspian Sea geological history (based on drilling data), *Quaternary International*, 2018, vol. 465, p. 130–141, DOI: 10.1016/j.quaint.2017.08.003.
- Yanina T., Bolikhovskaya N., Sorokin V. et al. Paleogeography of the Atelian regression in the Caspian Sea (based on drilling data), *Quaternary International*, 2021, vol. 590(17), p. 73–74, DOI: 10.1016/j.quaint.2020.07.023.
- Yanina T.A. Biostratigraphy of the middle and upper Pleistocene of the Caspian region, *Quaternary International*, 2013, vol. 284, p. 85–97, DOI: 10.1016/j.quaint.2012.02.008.
- Zastrozhnov A., Danukalova G., Golovachev M. et al. Biostratigraphical investigations as a tool for palaeoenvironmental

ronmental reconstruction of the Neopleistocene (Middle-Upper Pleistocene) at Kosika, lower Volga, Russia, *Quaternary International*, 2013, vol. 540, p. 38–67, DOI: 10.1016/j.quaint.2018.11.036.

Электронный ресурс

CALIB Radiocarbon Calibration, URL: <http://calib.org/calib> (дата обращения 15.02.2021).

Поступила в редакцию 14.03.2023

После доработки 13.08.2023

Принята к публикации 24.04.2024

## ON THE HYRKANIAN SEDIMENTS OF THE LOWER VOLGA REGION

**A.A. Svitoch<sup>1</sup>, R.R. Makshaev<sup>2</sup>, T.S. Klyuvitkina<sup>3</sup>, A.A. Tkach<sup>4</sup>**

<sup>1–4</sup>*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,  
Laboratory of Recent Deposits and Pleistocene Paleogeography*

<sup>1</sup>*Chief Scientific Researcher, D.Sc. in Geography*

<sup>2</sup>*Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: radikm1986@mail.ru*

<sup>3</sup>*Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: t.klyuvitkina@mail.ru*

<sup>4</sup>*Junior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: alinaberdnikowa@yandex.ru*

Case study of the Kopanovka reference section made it possible to investigate the structure of Upper Pleistocene deposits to verify the Hyrkanian horizon in the Lower Volga region. At the moment the synthesis of data on stratigraphy and malacofauna analysis, obtained by comparing our own field materials and published data, doesn't allow identifying the Hyrkanian deposits in the Kopanovka section. Suggestions about the age of the Hyrkanian deposits in the area of the Tsagan-Aman section do not agree with numerous data on stratigraphy and the absolute chronology of the Upper Pleistocene deposits of the Lower Volga region. The Hyrkanian deposits were found only in the Manych River deposits and the northern part of the Caspian Sea; the age of their accumulation correlates with the MIS 5 stage.

**Keywords:** Late Pleistocene, the Caspian Sea, stratigraphy, malacofauna

**Acknowledgements.** The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-27-00164). The authors express their deep gratitude to reviewers for their important comments and remarks.

### REFERENCES

- Arslanov Kh.A., Yanina T.A., Chepalyga A.L. et al. On the age of the Khvalynian deposits of the Caspian Sea coasts according to <sup>14</sup>C and <sup>230</sup>Th/<sup>234</sup>U methods, *Quaternary International*, 2016, vol. 409, p. 81–87, DOI: 10.1016/j.quaint.2015.05.067.
- Bezrodnih Yu.P., Deliya S.V., Romanyuk B.F. et al. New data on the stratigraphy of the Upper Quaternary deposits of the Northern Caspian, *Doklady Earth Sciences*, 2015, vol. 462, no. 1, p. 479–483.
- Fedorov P.V. Stratigrafiya chetvertichnyh otlozheniy i istoriya razvitiya Kaspiyskogo morya [Stratigraphy of Quaternary deposits and history of the Caspian Sea evolution], *Trudy of the Geological Institute of the Academy of Science*, 1957, vol. 10, 308 p. (In Russian)
- Goretskiy G.I. O paleogeografii Priazov'ya i Zapadnogo Primanych'ya v uzunlaro-girkanskij i burtasskie veka [On the paleogeography of the Sea of Azov and Western Primanychie in the Uzunlarian-Girkanin and Burtas ages], *Voprosy geographii*, 1953, no. 33, p. 190–221. (In Russian)
- Goretskiy G.I. O sootnoshenii morskikh i kontinentalnyh osadkov Priazovya, Primanychya i Nizhnego Pridonya [On the relationship between marine and continental sediments in the Azov, Primanych and Lower Don regions], *Tr. Komissii po izuch. chetvertich. Perioda*, 1957, vol. XIII, p. 36–54. (In Russian)
- Grichuk V.P. Materialy k paleobotanicheskoy karakteristike chetvertichnyh i pliocenovnyh otlozhenij severo-zapadnoj chasti Prikaspijskoj nizmennosti [Materials to the paleobotany characteristic of the Quaternary and Pliocene deposits of the northern-western part of the Precaspian Lowland], *Proceedings of the Institute of Geography, Academy of Sciences of the USSR*, 1954, vol. 61, p. 5–79 (In Russian).
- Költringer C., Brad'ak B., Stevens T. et al. Palaeoenvironmental implications from Lower Volga loess – joint magnetic fabric and multi-proxy analyses, *Quaternary Science Reviews*, 2021, 267, 107057
- Költringer C., Stevens T., Brad'ak B. et al. Enviromagnetic study of Late Quaternary environmental evolution in Lower Volga loess sequences, Russia, *Quaternary Research*, 2020, 103, p. 1–25.
- Krijgsman W., Tesakov A., Yanina T. et al. Quaternary time scales for the Pontocaspian domain: interbasinal connectivity and faunal evolution, *Earth Science Reviews*, 2019, vol. 188, p. 1–40.
- Kurbanov R.N., Buylaert J.-P., Stevens T. et al. A detailed luminescence chronology of the Lower Volga loess-palaeosol sequence at Leninsk, *Quaternary Geochronology*, 2022, vol. 73(11–12), 101376, DOI: 10.1016/j.quageo.2022.101376.
- Kurbanov R.N., Murray A.S., Yanina T.A. et al. First optically stimulated luminescence ages of the Early Khvalynian

- Caspian Sea transgression in the lower Volga, *Boreas*, 2021, vol. 50, no. 1, p. 134–146, DOI: 10.1111/bor.12478.
- Kurbanov R.N., Yanina T.A., Murrey A.S. et al. Girkanskij etap v pozднеplejstocenovoj istorii Manychskoj depressii [Hyrkanian epoch in the Late Pleistocene history of the Manych depression], *Vestn. MGU, Ser. 5, Geogr.*, 2018, no. 3, p. 77–88. (In Russian)
- Lavrushin Yu.A., Spiridonova E.A., Tudrin A. et al. Kaspiy: gidrologicheskie sobytiya pozdnego kvartera [The Caspian Sea: hydrological events of the Late Quarter], *Byull. komiss. po izucheniyu chetvertichnogo perioda*, 2014, no. 73, p. 19–51. (In Russian)
- Lebedeva M., Makeev A., Rusakov A. et al. Landscape dynamics in the caspian lowlands since the last deglaciation reconstructed from the pedosedimentary sequence of srednaya Akhtuba, southern Russia, *Geosciences*, 2018, 8, p. 1–21.
- Leontiev O.K., Maev E.G., Rychagov G.I. *Geomorfologiya beregov i dna Kaspijskogo moraya* [Geomorphology of the shores and bottom of the Caspian Sea], Moscow, MGU Publ., 1977, 210 p. (In Russian)
- Lokhin M.Yu., Maev E.G. Pozднеplejstocenovye del'ty na shel'fe severnoj chasti Srednego Kaspiya [Late Pleistocene deltas on the shelf of the northern part of the Middle Caspian], *Vestn. MGU, Ser. 5, Geogr.*, 1990, no. 3, p. 34–40.
- Makshaev R.R., Tkach N.T. Khronologiya khvalynskogo etapa razvitiya Kaspiya po dannym radioeglerodnogo datirovaniya [Chronology of Khvalynian Stage of the Caspian Sea according to radiocarbon dating], *Geomorfologiya i Paleogeografiya*, 2023, 54(1), p. 37–54, DOI: 10.31857/S2949178923010103. (In Russian)
- Moskvitin A.I. *Pleistotsen Nizhnego Povolzh'ya* [Pleistocene of the Lower Volga region], *Trudy of the Geological Institute of the Academy of Science*, 1962, vol. 64, 263 p. (In Russian)
- Popov G.I. *Chetvertichnye otlozheniya zapadnoj chasti Prikaspijskoj nizmennosti i Manychskoj doliny* [Quaternary deposits of the western part of the Caspian lowland and the Manych valley], Moscow, Gidroproekt Publ., 1949, 75 p. (In Russian)
- Popov G.I. Girkanskaya transgressiya v Severnom Prikaspii [Hyrkanian transgression of the Northern Caspian Lowland], *Byull. Komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda*, 1967, no. 33, p. 77–86. (In Russian)
- Popov G.I. *Plejstocen Chernomorsko-Kaspijskih proливov* [Pleistocene of the Black Sea-Caspian straits], Moscow, Nauka Publ., 1983, 216 p. (In Russian)
- Reimer P.J., Austin W.E.N., Bard E. et al. The IntCal20 northern hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP), *Radiocarbon*, 2020, vol. 62, p. 725–757.
- Shkatova V.K. [About the age of the khazarian deposits in the Lower Volga Region], *Khronologiya Plejstotsena i klimaticheskaya stratigrafiya* [Chronology of the Pleistocene and climatic stratigraphy], Leningrad, 1973, p. 203–223. (In Russian)
- Sorokin V.M., Yanina T.A., Bezrodnikh Yu.P., Romanjuk B.F. Identification and age of submarine Girkanian sediment beds (Upper Pleistocene) in the Caspian Sea, *Quaternary International*, 2018, vol. 465A, p. 152–157.
- Svitoch A.A. *Materialy po stratotipam regional'nyh i mestnyh podrazdelenij kaspijskogo neoplejstocena i golocena* [Materials on stratotypes of regional and local divisions of the Neopleistocene and Holocene of the Caspian Sea], Moscow, Rosselchozakademiya Publ., 2012, vol. 2, p. 115–143. (In Russian)
- Svitoch A.A., Yanina T.A. *Chetvertichnye otlozheniya poberezhij Kaspijskogo morja* [Quaternary sediments of the Caspian Sea coasts], Moscow, Rosselchozakademiya Publ., 1997, 267 p. (In Russian)
- Taratunina N.A., Buylaert J.-P., Kurbanov R.N. et al. Late Quaternary evolution of lower reaches of the Volga River (Raygorod section) based on luminescence dating, *Quaternary Geochronology*, 2022, 73, 101369.
- Tudryn A., Gibert-Brunet E., Tucholka P. et al. Chronology of the Late Pleistocene Caspian Sea hydrologic changes: A review of dates and proposed climate-induced driving mechanisms, *Quaternary Science Reviews*, 2022, 293, 107672.
- Tudryn A., Tucholka P., Chalie F. et al. Late Quaternary Caspian Sea environment: Late Khazarian and early Khvalynian transgressions from the lower reaches of the Volga River, *Quaternary International*, 2013, 292, p. 193–204.
- Vasiliev Yu.M. *Antropogen Juzhnogo Zavolzh'ja* [Antropogene of the Southern Volga Region], Trudy of the Geological Institute of the Academy of Science. Publishing house of Academy of Sciences of the USSR, Moscow, Nauka Press, 1961, vol. 49, 128 p. (In Russian)
- Yanina T., Bolikhovskaya N., Sorokin V. et al. Paleogeography of the Atelian regression in the Caspian Sea (based on drilling data), *Quaternary International*, 2021, 590, p. 73–74.
- Yanina T.A. Biostratigraphy of the middle and upper Pleistocene of the Caspian region, *Quaternary International*, 2013, 284, p. 85–97.
- Yanina T.A. *Neoplejstocen Ponto-Kaspiya: biostratigrafiya, paleogeografiya, korrelyaciya* [Neopleistocene of the Ponto-Caspian Region: Biostratigraphy, Paleogeography, Correlation]. Lomonosov Moscow State University, Geographical faculty, 2012, 264 p. (In Russian)
- Yanina T.A. The Ponto-Caspian region: environmental consequences of climate change during the late Pleistocene, *Quaternary International*, 2014, 345, p. 88–99.
- Yanina T.A. Girkanskij etap v plejstocenovoj istorii Kaspijskogo moraya [Hyrkanian stage of the Pleistocene history of the Caspian Sea], *Vestn. MGU, Ser. 5, Geogr.*, 2014, no. 3, p. 3–9. (In Russian)
- Yanina T.A., Sorokin V., Bezrodnikh Yu., Romanjuk B. Late Pleistocene climatic events reflected in the Caspian Sea geological history (based on drilling data), *Quaternary International*, 2018, 465, p. 130–141.
- Yanina T.A., Svitoch A.A., Kurbanov R.N. et al. Opyt datirovaniya plejstocenovyh otlozhenij Nizhnego Povolzh'ya metodom opticheski stimulirovannoj lyuminescencii [Paleogeographic analysis of the results of optically stimulated luminescence dating of Pleistocene deposits of the Lower Volga area], *Vestn. MGU, Ser. 5, Geogr.*, 2017, no. 1, p. 21–29. (In Russian)
- Zastrozhnov A., Danukalova G., Golovachev M. et al. Biostratigraphical investigations as a tool for palaeoenvironmental reconstruction of the Neopleistocene (Middle-Upper Pleistocene) at Kosika, lower Volga, Russia, *Quaternary International*, 2013, 540, p. 38–67, DOI: 10.1016/j.quaint.2018.11.036.

Web source

CALIB Radiocarbon Calibration, URL: <http://calib.org/calib> (access date 15.02.2021).

Received 14.03.2023  
Revised 13.08.2023  
Accepted 24.04.2024

## УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ОСОБЕННОСТИ МОРФОДИНАМИКИ РАЗВЕТВЛЕННОГО РУСЛА СРЕДНЕГО ИРТЫША

Р.С. Чалов<sup>1</sup>, Г.Б. Голубцов<sup>2</sup>, А.С. Завадский<sup>3</sup>, А.А. Куракова<sup>4</sup>

<sup>1–4</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет

<sup>1</sup>Кафедра гидрологии суши, проф., д-р геогр. наук; e-mail: rschalov@mail.ru

<sup>2</sup>Лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, вед. инженер, канд. геогр. наук; e-mail: georgy1995golubcov@yandex.ru

<sup>3</sup>Лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: az200611@rambler.ru

<sup>4</sup>Лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, мл. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: a.a.kurakova@mail.ru

Впервые представлены результаты руслового анализа среднего Иртыша (от госграницы до г. Омска), который, несмотря на свое важное водохозяйственное и транспортное значение, до последнего времени оставался практически неизученной рекой в отношении русловых процессов. Особенностью русла Иртыша является несоответствие общепринятым представлениям о меандрировании средних и малых рек и преимущественном разветвлении на рукава больших и крупнейших рек. Было выявлено, что меандрирующее русло в пределах Казахстана сменяется разветвленным вплоть до г. Омска и ниже, а затем становясь уже крупнейшей рекой, Иртыш меандрирует, лишь осложняясь островами, возникающими на крыльях и в привершинных частях излучин. Определено, что на среднем Иртыше (госграница – г. Омск) смена геоморфологического типа русла по длине реки приводит к морфологическому усложнению разветвлений. Здесь широко распространены параллельно-рукавные разветвления, отличающиеся удлинённостью больших островов ( $L_o/B_o \gg 3-4$ ) и прямолинейностью рукавов. Расположение русла вдоль правого ведущего коренного берега приводит к образованию разветвлений ниже его выступов и неровностей, отклоняющих поток к противоположенному пойменному. Высокая антропогенная нагрузка на реке (регулирование стока и перехват наносов водохранилищами, разработка карьеров, строительство дамб) привела к врезанию русла, трансформации разветвлений, а также в одних случаях к отмиранию и обмелению маловодных рукавов, в других – развитию рукавов и рассредоточению стока. Вызванные изменения русла Иртыша приводят к ухудшению и усложнению эксплуатации водного пути и водохозяйственного освоения реки.

**Ключевые слова:** русловые процессы, разветвления, излучины, размывы берегов, антропогенное воздействие, критерий Карасева

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.10

### ВВЕДЕНИЕ

Общепринятым считается, что большие и крупнейшие реки, как правило, имеют разветвленное на рукава русло, средние и тем более малые – меандрируют. М.А. Великанов утверждал, что «чем больше река по своим размерам, тем больше вероятность возникновения в ней разветвления струй и образование не одной, а двух (а иногда и трех) динамических осей» [1958, с. 27], и «при возрастании ширины, поток имеет все большие и большие возможности для своего динамического раздвоения... в реках-гигантах... мы чаще встречаем разбитый, чем сосредоточенный поток» [1958, с. 29]. Эти представления подтверждаются критерием квазиоднородности потока И.Ф. Карасева [1975]:

$$\Theta = \frac{b_p}{h} \sqrt{\frac{2g}{C^2}},$$

где  $b_p$  и  $h$  – ширина и глубина реки,  $C$  – коэффициент Шези, зависящий от шероховатости русла, согласно которому при значениях  $\Theta > 9,5$  поток разделяется на две и более ветвей течения. По существу это вытекает из анализа условия развития русел в трудах Н.И. Маккавеева [1955], Н.А. Ржаницына [1985] Д.Л. Росгена [Rosgen, 1994], Л.Б. Леопольда и М.Г. Вольмана [Leopold, Wolman, 1957], С.А. Шумма [Schumm, 1977], А.Д. Книгтона [Nanson, Knighton, 1996].

В действительности при сохранении в общих чертах этой тенденции (чем больше река, шире русло и больше соотношение  $b_p/h$ , тем больше вероятность разветвления на рукава) наблюдается слож-

ная картина чередования по длине рек от верхнего течения к низовьям меандрирования, разветвлений и относительно прямолинейного неразветвленного русла. Об этом свидетельствуют многочисленные публикации по русловым процессам на больших и крупнейших реках [Водные пути..., 1995; Русловые процессы..., 2001, 2012]. К.М. Беркович [2004] показал, что критерий И.Ф. Карасева находится в обратной зависимости от устойчивости русла: чем больше число Лохтина – Л (более устойчиво русло), тем меньше величина  $\Theta$ .

Пример подобного несоответствия дает р. Иртыш, русло которого меандрирует в пределах Казахстана [Бурлибаев и др., 2014], затем, не принимая притоков и не увеличивая водность, от госграницы и до г. Омска (в г. Омске первый небольшой приток – р. Омь) разветвляется на рукава, а от устья р. Тары до слияния с Обью вновь меандрирует, лишь осложняясь островами, возникающими на крыльях и в привершинных частях излучин. При этом Иртыш, несмотря на свое большое водохозяйственное и транспортное значение, в отношении русловых процессов до последнего времени оставался практически неизученным, а почти 300-километровый участок разветвленного русла лишь вскользь упоминается в общих описаниях реки [Давыдов, 1955]. В существующих публикациях содержатся сведения о размывах берегов [Герасимова, 1959; Петров, 1979] и выправительных работах на водных путях [Дегтярев, 1987]. Приводятся некоторые гидроморфологические зависимости для излучин русла [Гендельман, 1988; Завадский, 2001], но вне связи с русловым режимом реки и касаются лишь русла ниже г. Омска, где река меандрирует, а разветвления русла выше города упоминаются только в статье [Диденко, Орлович-Грудков, 1969] в связи с разработкой русловых карьеров стройматериалов и их влияния на уровенный режим. Лишь в последние годы появились первые публикации, в которых дается характеристика условий и форм проявления русловых процессов на среднем (ниже г. Омска) и нижнем Иртыше [Чалов и др., 2023а].

Средний Иртыш в районе г. Омска подвержен интенсивным антропогенным воздействиям – от массовой разработки карьеров песчано-гравийных стройматериалов, начавшейся в 1960-е гг., до мостовых переходов, дамб, полузапруд и других гидротехнических объектов, городских набережных и т. д. Ежегодно на участке с разветвленным руслом выполняются дноуглубительные работы для обеспечения судоходства (до 300–400 тыс. м<sup>3</sup>/год). Все это на фоне регулирования стока каскадом из трех гидроузлов в казахстанской части, функционирующих с советских времен. Такой антропогенный пресс сказывается в морфологии и динамике русла,

его трансформациях, нередко имеющих негативные последствия для экологического состояния реки и использования ее ресурсов.

Задача статьи, во-первых, впервые дать анализ условий формирования русла и руслового режима среднего течения Иртыша в условиях интенсивной хозяйственной деятельности на реке; во-вторых, провести гидролого-морфологический анализ разветвленного русла. Его сопоставление с разветвлениями на других больших реках позволит подойти к выявлению условий формирования разветвлений русла в среднем течении и сменой их меандрированием вниз по реке с увеличением водоносности и морфометрических характеристик. Решение этой задачи имеет значение при разработке проектов водохозяйственного и транспортного использования реки.

**Объект исследования и его общая характеристика.** В среднем течении Иртыш выходит из Тургайского плато в пределы Западно-Сибирской равнины, пересекая западную окраину Барабинской степи. Широкопойменное русло сменяется адаптированным ( $B_n/b_p = 2-3$ , здесь  $B_n$  – ширина поймы,  $b_p$  – ширина русла) и врезанным, занимающим нижнюю часть участка ( $B_n < b_p$ ).

Среднегодовой расход воды по г. п. Омск – 893 м<sup>3</sup>/с, максимальный – 6340 м<sup>3</sup>/с, средняя величина максимальных расходов воды – 2770 м<sup>3</sup>/с. Минимальный наблюдаемый расход воды в безледный период – 344 м<sup>3</sup>/с, в зимний – 110 м<sup>3</sup>/с. Характерным для режима стока р. Иртыша являются высокое весеннее половодье (50–65% от годового стока), низкая летняя межень, прерываемая дождевыми паводками, и устойчивая продолжительная зимняя межень. Дождевые паводки кратковременны и невысоки. Ледоход проходит на подъеме уровней, максимальные уровни при ледоходе соответствуют максимально наблюдаемым.

В настоящее время естественный водный режим р. Иртыша искажен работой гидротехнических сооружений в верхнем течении (в Китае на р. Черный Иртыш – каскад из пяти водохранилищ, в Казахстане – три водохранилища, нижнее из которых – Шульбинское – было заполнено к 1988 г.). После сооружения гидроузлов осредненный за многолетие максимальный годовой уровень снизился в сравнении с естественным на 36% [Волковская, 2017]. В 2000-е гг. максимальный уровень воды в районе г. Омска не превышал 6,3 м над межennым, что недостаточно для полного затопления островов. Санитарные попуски Шульбинского гидроузла не обеспечивают затопление высокой поймы, которое при естественном гидрологическом режиме было регулярным (1 раз в 3–10 лет), уровни поднимались на 7,5–9 м, полностью затапливая пойму.

Ввод в эксплуатацию Иртышских гидроузлов привел к снижению годового стока воды и, главное, уровней. Причины последнего не только в отъеме части стока и изменении водности реки, но и во врезании реки в нижнем бьефе Шульбинского водохранилища. Анализ кривых связи расходов и уровней по г. п. Омск, казалось бы, подтверждает данное предположение – понижение кривых  $Q = f(H)$  с 1964 по 1984 г. свидетельствует об этом (рис. 1). Однако ввод в эксплуатацию гидроузлов совпал с началом массовой разработки карьеров в районе г. Омска, что являлось основным фактором понижения уровней воды [Диденко, Орлович-Грудков, 1969; Дегтярев, 1968]. Большое же расстояние от нижнего гидроузла до российской части реки не позволило проявиться здесь процессам врезания. Более того, продукты размыва русла ниже гидроузла аккумулируются ниже по течению, и волна аккумуляции наносов распространяется вниз по реке [Транспортное..., 1973]. Поэтому в 1984–2008 гг. врезание сначала замедлилось, а затем сменилось аккумуляцией наносов, подтверждением чего является стабилизация минимальных уровней воды в этот период. После 2008 г. понижение уровней возобновилось и имеет темп до 7 см/год, но это связано с активной добычей аллювия в реке, дноуглубительными работами для обеспечения судоходства и врезанием русла при его стеснении дамбами в черте города, где находится гидрологический пост, и выше по течению.

Русло среднего Иртыша почти на всем участке от госграницы до г. Омска разветвленное, причем разветвления осложняют свободные излуины в его начале и врезанные в нижней части. Неразветвленное прямолинейное русло встречается в виде коротких отрезков вдоль коренных берегов.

Массовая разработка карьеров (она сопровождается врезанием реки) явилась основной причиной понижения уклонов (до 0,02–0,03‰) и относительно высокой крупности руслообразующих наносов. Последние в основных рукавах и относительно прямолинейном неразветвленном русле представлены средне- и средне-крупнозернистыми песками с примесью гравия, причем прослеживается прямая связь положения динамической оси потока и крупности наносов (увеличение ее в стрежневых зонах). Наносы с большей крупностью характерны для основных рукавов одиночных разветвлений, в то время как в рукавах параллельно-рукавных и прибрежных разветвлений наибольшая их крупность присуща стрежневым зонам потока в узлах разветвлений. Укрупнение наносов в несудоходных рукавах связано с разработкой в них карьеров, обеспечивающих их развитие и увеличение водности. По длине участка наблюдается увеличение средней крупности, отражая все большую антропогенную нагрузку (разработку карьеров и перекрытие несудоходных рукавов дамбами) и смену широкопойменного русла врезанным (вплоть до преобладания гравия в черте г. Омска).

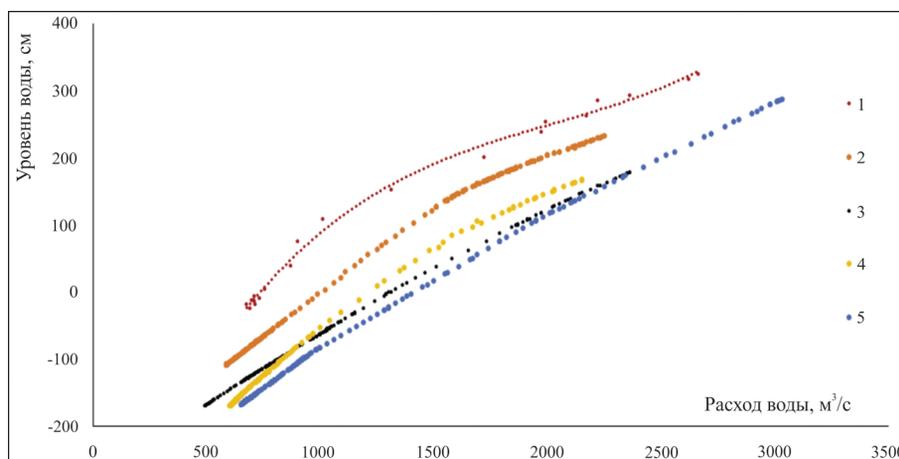


Рис. 1. Многолетние изменения уровней воды Иртыша по графикам  $Q = f(H)$  для г. п. Омск: 1 – 1964 г.; 2 – 1975 г.; 3 – 1984 г.; 4 – 2008 г.; 5 – 2020 г.

Fig. 1. Long-term changes in water levels on the Irtysh River according to combined communication graphs  $Q = f(H)$  for the Omsk urban settlement: 1 – 1964; 2 – 1975; 3 – 1984; 4 – 2008; 5 – 2020

Сравнительно небольшие уклоны при относительно высокой крупности песчаных с примесью гравия наносов обусловило высокие значения показателей устойчивости русла (числа Лохтина),

которое возрастает вниз по течению: 10,3–19,9 в верхней части участка (широкопойменное русло), 18,7–20,7 в средней (адаптированное русло) и 28,6–31,3 (врезанное), соответствуя в то же время

увеличению антропогенной нагрузки. Эти значения завышены относительно принятой классификации русел в 2,5–3 раза (по сопоставлению приведенных в ней данных об интенсивности русловых деформаций с полученными на Иртыше), т. к. основываются не на грунтовой съемке русла, а на единичных пробах донных отложений в стречневых зонах русла и основных рукавов. Учитывая это, русло среднего Иртыша относится к слабо- и относительно устойчивому.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основу анализа условий формирования русла и руслового режима среднего Иртыша составили данные обследования русла в июне 2023 г., карты русла (бывшие лоцманские), изданные в 1966, 1970, 1989, 2015 гг., зафиксировавшие состояние русла на соответствующие временные срезы, планы русла, составленные изыскательскими партиями Омского района водных путей в период 2018–2023 гг., а также космические снимки и другие картографические, литературные и фондовые материалы. Методика ретроспективного руслового анализа, методы натуральных русловых исследований и прогнозных оценок русловых деформаций с учетом антропогенного вмешательства в жизнь рек детально изложены во многих публикациях [Русловые процессы..., 2001, 2012; Чалов и др., 2023а, 2023б].

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По геолого-геоморфологическим условиям русло среднего Иртыша (от госграницы до г. Омска) делится на три части: верхнюю (97 км) – широкопойменное русло с преимущественно односторонней (левобережной) поймой и лишь на коротком участке с развитыми излучинами – двусторонней поймой при ее относительной ширине  $B_n/b_p = 3,1–7,0$ ; среднюю (64 км) – адаптированное русло с  $B_n/b_p = 1,7–2,0$  (пойма левобережная, кроме небольших правобережных фрагментов ниже изгибов правого коренного берега); нижнюю (57 км) – врезанное русло с узкой поймой ( $B_n/b_p = 0,5–1,0$ ) и только там, где в XX в. дамбы и полузапруды перекрыли рукава в односторонних разветвлениях, а острова причленились к береговой пойме,  $B_n/b_p$  составляет 1,1–1,3.

По всей реке преобладают разветвления, образованные различными по размерам, но преимущественно средними и большими островами. Прямолinéйнное неразветвленное русло, располагаясь вдоль правого коренного берега, образует морфологически однородный участок только на нижних 36 км широкопойменного русла, осложненный двумя одиночными малыми разветвлениями – большим о. Рытовским и двумя односторонними разветв-

лениями общей длиной 6,4 км (во врезанном русле – 10 км). На последнем прямолинейность русла создана перекрытием дамбами рукавов у о-вов Падинских. Разветвление у о. Верх. Черемушкинского искусственно поддерживается разработкой подхода к водозабору на правом коренном берегу. В основном оно образует короткие «вставки» между разветвлениями и врезанными излучинами, составляя в сумме 31% от длины участка (из 234 км). Самые короткие из них – 1,5–2 км, самые длинные – 8,5 км, осложненные осередковыми разветвлениями, и 7,5 км, но образованное перекрытием дамбами рукавов в бывших чередующихся односторонних разветвлениях. Всего в настоящее время на среднем Иртыше (от госграницы до г. Омска) выделяется 11 морфологически однородных участков: семь участков характеризуется абсолютным преобладанием разветвлений – одиночных, односторонних и чередующихся односторонних, прибрежных второстепенных и параллельно-рукавных (рис. 2А); один длиной 13,5 км представлен тремя свободными излучинами (см. рис. 2Б), один – вписанной и обтекающей излучинами (см. рис. 2В) с правым коренным берегом (широкопойменное русло) и один длиной 51 км – тремя большими врезанными излучинами (см. рис. 2Г), разделенными прямолинейными «вставками» длиной 6,2 км, осложненными одиночными и прибрежными разветвлениями на крыльях, в привершинных частях и на «вставках», и два – относительно прямолинейным неразветвленным руслом (табл. 1).

Анализ приведенных данных показывает, что для широкопойменного русла свойственны одиночные, односторонние и чередующиеся односторонние разветвления, образующие морфологически однородные участки или встречающиеся в виде единичных форм в прямолинейном неразветвленном русле, в верхних крыльях и привершинной части одной из свободных (Малоатмасской), вписанной и обтекающей излучин; свободные излучины, образующие морфологически однородный участок – крутые, вписанная, обтекающая и следующая за ними свободная и вынужденная – пологие (табл. 2).

Расположенное ниже по течению адаптированное русло представлено параллельно-рукавными разветвлениями, занимающими почти половину длины участка (31 км). В середине XX в. его протяженность была на 9 км больше, но из-за перекрытия дамбой левого рукава у о. Содомного оно стало односторонним (ниже по течению – одиночным). Наоборот, Змеиные разветвления ранее были односторонними, но вследствие разработки в левом рукаве карьеров сейчас составляют верхнее звено параллельно-рукавных разветвлений в нижерасположенном врезанном русле, образованных

цепочкой о-вов Тамбовских, Молоканским и Безымянным (17,5 км). В 1960–1970-е гг. таковым было ныне одностороннее разветвление, образованное о-вами Безымянным и Усть-Заостровским (прекратило свое существование из-за перекрытия левого рукава дамбами).

Большую часть врезанного русла (46 из 73,5 км) составляют три врезанные большие излучины. Их параметры: верхняя (Карбышевская) –  $r = 4200$  м,  $L = 8550$  м,  $l/L = 1,68$ ; средняя (Омская) –  $r = 6100$  м,

$L = 12850$  м,  $l/L = 1,49$ ; нижняя (Красногорская) –  $r = 5600$  м,  $L = 14300$  м,  $l/L = 1,39$ . Крылья смежных излучин разделены прямолинейными вставками по 5 и 3 км каждая. Все излучины на крыльях, в привершинных частях и на прямолинейных «вставках» осложнены односторонними и одиночными разветвлениями, многие из которых перекрыты дамбами и преобразованы в затоны, вследствие чего само русло, особенно на Омской излучине, утратило естественный облик.

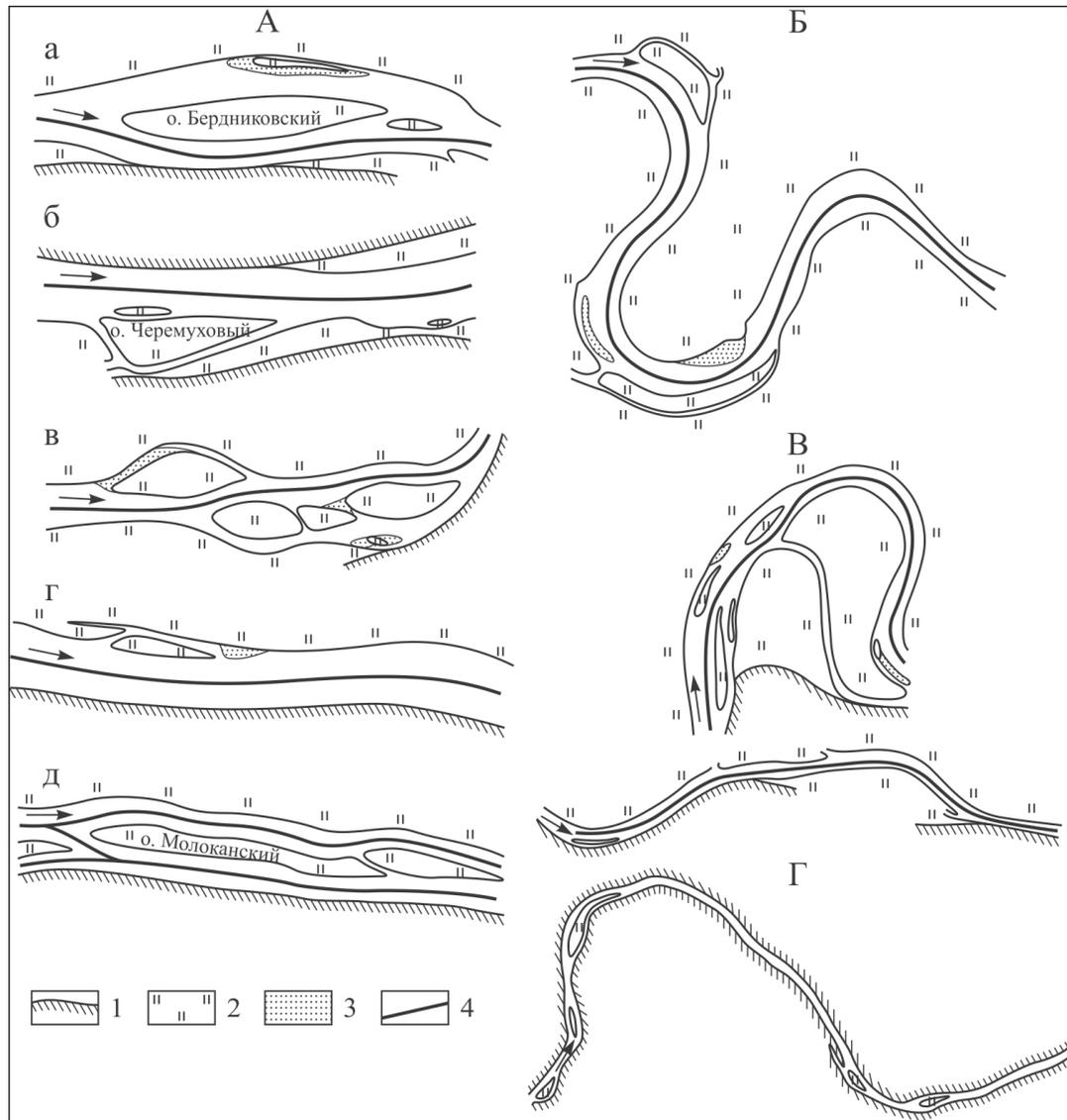


Рис. 2. Морфодинамические типы русла среднего Иртыша.

А – разветвления: а – одиночное (о. Бердниковский); б – одностороннее (о. Черемуховский); в – чередующиеся односторонние (Татарские – Булдыревские); г – прибрежное второстепенное (на 1977–1979 км); д – параллельно-рукавные (Тамбовские – Молоканское); Б – свободные излучины (Пальчуйевская, Щербекоевская); В – вписанная (Большеатмасская) и обтекающая (Черлакская) излучины; Г – врезанные (Карбышевская и Омская); 1 – коренной берег; 2 – пойма; 3 – прирусловые отмели; 4 – динамические оси потока

Fig. 2. Morphodynamic types of the middle Irtysh channel.

A – branches: a – single (Berdnikovskiy Island); б – one-sided (Cheremukhovskiy Island); в – alternating one-sided (Tatarsky-Buldyrevskiy); г – coastal secondary (at 1977–1979 km); д – parallel-branch (Tambov – Molokanskoe); Б – free meanders (Paltchevskaya, Scherbekovskaya); В – inscribed (Bolsheatmasskaya) and flowing around (Cherlakovskaya) meanders; Г – embedded (Karbyshevskaya and Omskaya); 1 – valley bank; 2 – floodplain; 3 – riverbed shallows; 4 – dynamic flow axes

Таблица 1

## Морфологически однородные участки русла среднего Иртыша (госграница – г. Омск)

№ п/п	Расстояние от устья, км	Тип русла	Кол-во форм русла (островов <sup>1</sup> , излучин <sup>2</sup> )	Устойчивость русла Л
<i>Широкопойменное русло (2048–1951 км)</i>				
1	2048–2019	Одиночные и чередующиеся односторонние разветвления	Острова – 11; прямолинейные «вставки» – 3	13,3–15,0
2	2019–2005,5	Свободные излучины (Малоатмасская – с прибрежными и одиночными разветвлениями, Пальчueвская, Щербековская)	Излучин – 3; островов – 4	14,0
3	2005,5–1987	Вписанная, обтекающая, пологие свободная и вынужденная излучины	Излучины – 4; острова – 4; прямолинейные «вставки» – 2	16,1
4	1987–1951	Прямолинейное неразветвленное с единичными односторонними и одиночными разветвлениями	Острова – 6	18,5–19,9
<i>Адаптированное русло (1951–1887 км)</i>				
5	1951–1935	Односторонние и одиночное разветвление (о. Бердниковский)	Острова – 6; прямолинейные «вставки» – 3	18,7
6	1935–1927	Параллельно-рукавные разветвления (Иртышское – Ильинское)	Острова – 2	24,5
7	1927–1909,5	Односторонние разветвления (о-ва Ниж. Покровский, Содомный и др.)	Острова – 5	18,5
8	1909,5–1887,5	Одностороннее (Бол. Содомное), одиночное и параллельно-рукавное (Бубновское – Змеиное) разветвления	Острова – 6; прямолинейные «вставки» – 2	17,8
<i>Врезанное русло (1887,5–1814 км)</i>				
9	1887,5–1870	Параллельно-рукавные (Тамбовские – Молоканские) и односторонние (Усть-Заостровские) разветвления	Острова – 8; прямолинейные «вставки» – 1	28,6–31,0
10	1870–1860	Прямолинейное неразветвленное русло с одиночным разветвлением (о. Верх. Черемушкинский)	Острова – 1	39
11	1860–1814	Пологие врезанные излучины, с одиночными и односторонними разветвлениями (антропогенно преобразованные)	Острова – 8; прямолинейные «вставки» – 2.	37,4–38

Примечания. <sup>1</sup>Указаны только острова, создающие разветвления русла без учета разветвлений второго порядка и прибрежных второстепенных разветвлений.

<sup>2</sup>Излучины только русла, определяющие его морфодинамический тип.

Таблица 2

## Параметры излучин широкопойменного русла среднего Иртыша

№ п/п	Излучина	Расстояние от устья, км	Параметры			
			$r$ , м	$L$ , м	$h_n$ , м	$l/L$
1	Малоатмасская	2019–2012	1600	2800	2350	1,87
2	Пальчueвская	2012–2007,5	770	1800	940	2,27
3	Щербековская	2007,5–2005,5	650	1490	700	1,89
4	Большеатмасская (вписанная)	1999,7–1996,7	1480	3400	1080	1,58
5	Верх. Черлакская (обтекающая)	1996,7–1994	860	2550	1000	1,1
6	Среднечерлакская	1991–1988,5	870	2600	980	1,19
7	Черлакская (вынужденная)	1988,5–1986,5	620	3150	780	1,16

Примечание:  $r$  – радиус кривизны,  $L$  – шаг,  $h_n$  – стрела прогиба,  $l/L$  – степень развитости.

Таким образом, переход от широкопойменного русла к адаптированному и врезанному сопровождается усложнением разветвлений, которые здесь становятся преимущественно параллельно-рукавными. В отличие от слабо- или неустойчивых широкопойменных русел верхней Оби, средней и нижней Лены, на которых русла этого типа образованы небольшими островами, составляющими вытянутые вдоль реки архипелаги [Водные пути..., 1995], параллельно-рукавные разветвления среднего Иртыша сформированы большими удлиненными островами с соотношением  $L_0/B_0 = 6,2-13,6$  ( $L_0$  и  $B_0$  – длина и ширина островов). Аналогичные параллельно-рукавные разветвления характерны для врезанных русел средней Лены (выше г. Покровска) на участке длиной 160 км [Водные пути..., 1995], были (до создания водохранилищ) на Ангаре [Чалов, Чалов, 2009], встречаются на нижней Сухоне [Рулева и др., 2010]. По-видимому, для врезанных относительно устойчивых русел больших и крупнейших рек, у которых критерий  $\Theta$  при большой ширине русла превышает критические значения ( $\Theta > 9,5$ ), поток разделяется на две ветви течения, между которыми формируются осередки, зарастающие и превращающиеся со временем в острова. Действительно, по данным измерения поля скоростей в разветвлениях среднего Иртыша, разделение потока на две стрежневые зоны начинается в 0,5–1 км выше узла разветвления русла (рис. 3А) и завершается намного ниже узла слияния рукавов (ухвостье островов), где критерий  $\Theta$  становится ниже критического  $\Theta < 9,5$  (табл. 3, № 1). Лишь в одностороннем разветвлении о. Ниж. Покровским (водность левого рукава всего 3,5%, в основном рукаве поток имеет две динамические оси  $\Theta < 17,6$ , между которыми сформировался длинный (более 3,5 км) подводный осередок (глубина на нем 0,8–1,4 м в низкую межень) (см. рис. 3Б, табл. 3, № 8). Выше по течению в прямолинейном русле  $\Theta$  остается выше критического (14,3), проявляясь в изменении глубин в поперечном сечении русла (в 2015–2023 гг. здесь возникло два осередка). Очевидно, это – свидетельство происходящего здесь формирования параллельно-рукавного разветвления вместо существующего одностороннего.

Экстраполируя эти данные на другие участки русла, используя планы русла по съемке 2023 г. и карту 2015 г., можно полагать, что в перспективе произойдет образование нескольких новых одиночных разветвлений широкопойменного русла или увеличение их размеров, а в адаптированном и в врезанном (выше врезанных излучин) – удлинение и объединение в единую систему существующих параллельно-рукавных разветвлений. В частности, это может произойти с Иртышско-Ильинскими раз-

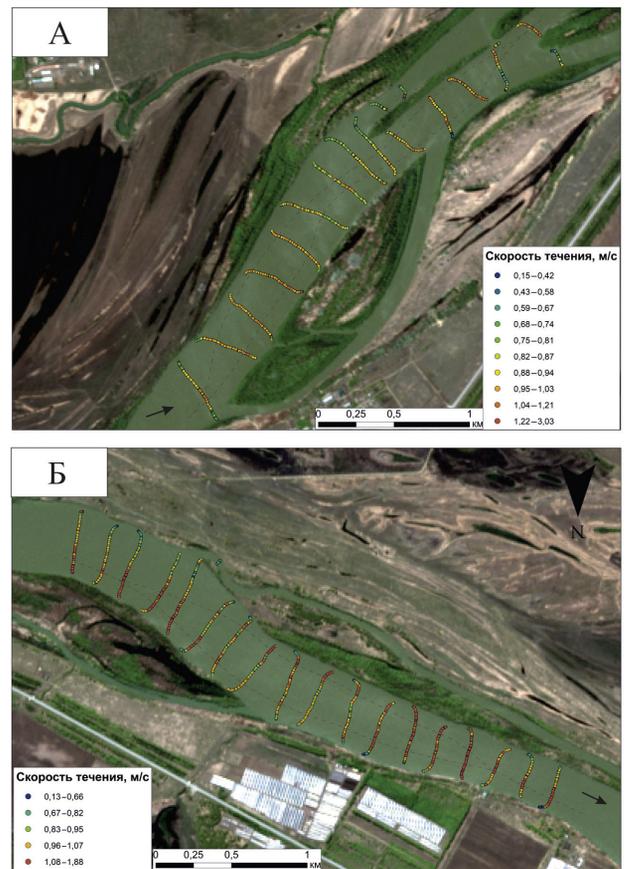


Рис. 3. Скоростные поля потока: А – в Булдыревском одностороннем разветвлении; Б – в правом рукаве Покровского одностороннего разветвления

Fig. 3. Velocity flow fields: А – in the Buldyrevskoe one-sided branching; Б – in the right branch of the Pokrovskiy one-sided branching

ветвлениями, звенья которых разделены 2-километровым прямолинейным неразветвленным руслом, в котором прослеживаются две ложбины вдоль левого и правого берегов с меньшими глубинами между ними (рис. 4). Новые параллельно-рукавные разветвления могут быть образованы в разделении потока на ветви течения в основном рукаве у о. Ниж. Покровского (см. рис. 3Б). Возможно объединение Змеинового и Тамбовского разветвлений, это, однако, длительный процесс, поскольку все отдели между ветвями течения – подводные даже в низкую межень.

Сопоставление разновременных карт реки 1966–1970 гг. и планов русла за последние пять лет показало, что в основном до 2015 г. (последняя карта реки) произошло существенное изменение морфологии русла, проявившееся в количестве островных и осередковых разветвлений. Число островов увеличилось почти в два раза к 2015 г. (с 56 до 101), но за последние годы уменьшилось более чем на 1/3 (до 74). Наоборот, количество обсыхающих в ме-

жень осередков уменьшилось почти в 2,5 раза (с 42 до 17), а на космоснимках и планах русла 2023 г. их вообще нет. Если 50 лет назад (1960–1970-е гг.) русло изобиловало обсыхающими в межень осередками и побочными, то сейчас таковых практически нет либо они остаются подводными даже при низких уровнях.

Происходящие изменения связаны с активным зарастанием осередков вследствие изменения режима стока гидроузлами и понижения («посадки») уровней из-за массовой разработки русловых карьеров. Только за 1975–1983 гг. оно составило 124 см [Беркович, 2005]. В.В. Дегтярев [1968] обратил внимание на этот процесс в первое десятилетие после заполнения водохранилищ, а к 2020-м гг. произошла повсеместная трансформация русла. На рис. 4 приведен типичный пример превращения цепочки осередков в прибрежные острова и осередковых разветвлений – в односторонние русловые. Этот же процесс способствовал развитию параллельно-рукавных разветвлений, определяющих морфологи-

ческий облик значительной части адаптированного и врезанного русла. Суммарная протяженность русла этого типа составляет в результате около 50 км. Но уже в 1980–2000-е гг. в Содомном и Усть-Заостровском разветвлениях левые рукава были частично перекрыты дамбами и превращены в односторонние (в 1970 г. эти разветвления имели длину 5,7 и 4,0 км и были единственными параллельно-рукавными разветвлениями на Иртыше).

Развитию параллельно-рукавных разветвлений способствовала разработка карьеров (в левых несудоходных рукавах, изначально бывших односторонними), благодаря чему их водность сравнялась или даже стала превышать таковую правых рукавов, проходящих вдоль коренного берега. Аналогичное воздействие карьеров привело к образованию ряда одиночных разветвлений с равнозначным распределением расходов воды вместо единичных односторонних (обычно водность левых, вдоль пойменного берега рукавов не превышает 10–15%).

Таблица 3

### Критерий И.Ф. Карасева (Θ) для разветвлений среднего Иртыша с измерениями скоростных полей

№ п/п	Расстояние от устья, км	Разветвления	В разветвлении				Выше разветвления			
			$B_p$ , м	$h$ , м	$V$ , м/с	Θ	$B_p$ , м	$h$ , м	$V$ , м/с	Θ
1	2029–2024	Татарско-Булдыревское	200	5,9	0,9	2,8	467	3,1	0,7	13,8
2	2018–2016	Одиночные в верхнем крыле Малоатмасской излучины	–	–	–	–	391	3	0,8	12,0
3	1994,5–1991	Черлакское осередковое	369	3,7	0,8	8,9	404	3,1	0,7	11,9
4	1916–1912	Ниж. Покровское одностороннее	430	2,8	0,8	14,3	463	2,5	0,9	17,6
5	1889–1886,5	Прямолинейное русло между Змеиным и Тамбовским параллельно-рукавными разветвлениями	283	2,9	0,7	9,0	474	2,5	0,9	18,0
6	1876–1870	Усть-Заостровское одностороннее (судоходный рукав)	274	3,4	0,7	7,3	397	2,7	0,6	13,8

Одновременно понижение уровней вследствие разработки карьеров и вызванное ими врезание русла сопровождалось причленением к берегам не менее 15 крупных островов, ранее образующих односторонние разветвления (на рис. 4 таковым является о. Тархов, существовавший в 1970 г.), а о. Черлакский – одиночное разветвление, в котором левый рукав в 1970 г. был судоходным, а сейчас – это обсыхающая уже в начале спада половодья, зарастающая протока. Также произошло объединение многих малых и средних островов посередине русла, превратившиеся в удлиненные ( $L_0/B_0 \gg 5-6$ ) острова, разделяющие рукава параллельно-рукавных и одиночных разветвлений. В Тамбовском разветвлении три отдельных острова длиной 460, 500 и 600 м со-

ставили единый остров длиной 1650 м и шириной 125 м ( $L_0/B_0 = 13,2$ ). Этот процесс активизировался в последние годы, что привело к сокращению количества островов.

Перехват водохранилищами стока наносов – еще одна причина сокращения или исчезновения осередков и побочных. Их зарастание и превращение в острова не компенсируется формированием новых. Вместе с тем дефицит наносов (он – следствие также аккумуляции наносов в карьерах) – причина продолжающихся размывов (их скорости невелики – в среднем 1,6 м/год в широкопойменном русле, 1,3 м/год в адаптированном), причем отступление берегов не сопровождается намывами противоположных, в результате чего увеличивается ширина

русла и основных рукавов. За 50 лет она выросла на 40–60 м, местами до 150 м (например, в правом рукаве в верхней части Содомского разветвления) при неизменности глубины потока. Это способствует увеличению  $\Theta$  и разделению потока на ветви течения (их динамические оси особенно отчетливо проявляются между звеньями параллельно-рукавных разветвлений, а также в основных рукавах односторонних, в которых произошло снижение водности прибрежных рукавов).

Образование удлиненных островов и параллельно-рукавных разветвлений на среднем Иртыше делает русло аналогичным врезанному с этим типом разветвлений на средней Лене. Это совпало по времени со снижением затопляемости поймы в адаптированном и врезанном русле и превращением его практически во врезанное беспойменное из-за регулирования стока водохранилищами и разработки карьеров, приведших к искусственному понижению отметок дна русла и его врезанию.

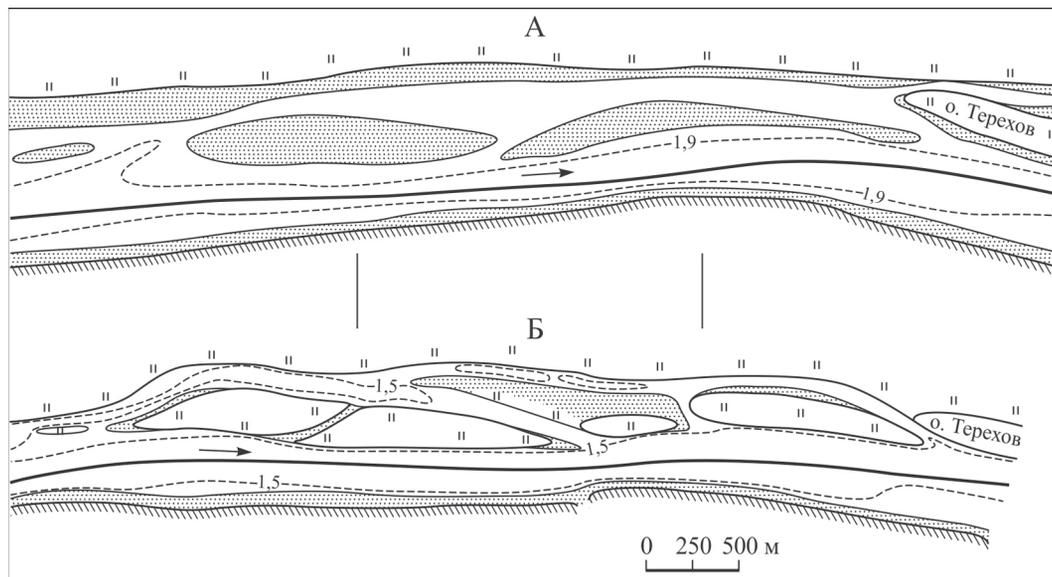


Рис. 4. Трансформация осередковых разветвлений (1970 г.) в односторонние островные (2015 г.) на 1951–1946 км

Fig. 4. Transformation of the midstream sandbank branches (channel plan 1970) into one-sided island branches (channel plans 2015) at 1951–1946 km

Особенностью рукавов разветвлений на среднем Иртыше является их относительная прямолинейность, что соответствует удлиненной форме островов, у которых соотношение  $L_0/B_0 \gg 3-4$ , очевидно превышающее гидравлически оптимальное [Baker, 1977; Комар, 1983]; лишь в отдельных одиночных разветвлениях один из рукавов образует пологую излучину ( $l/L = 1,15-1,2$ ). Развитые излучины встречаются в некоторых прибрежных рукавах односторонних разветвлений (например, Содомном).

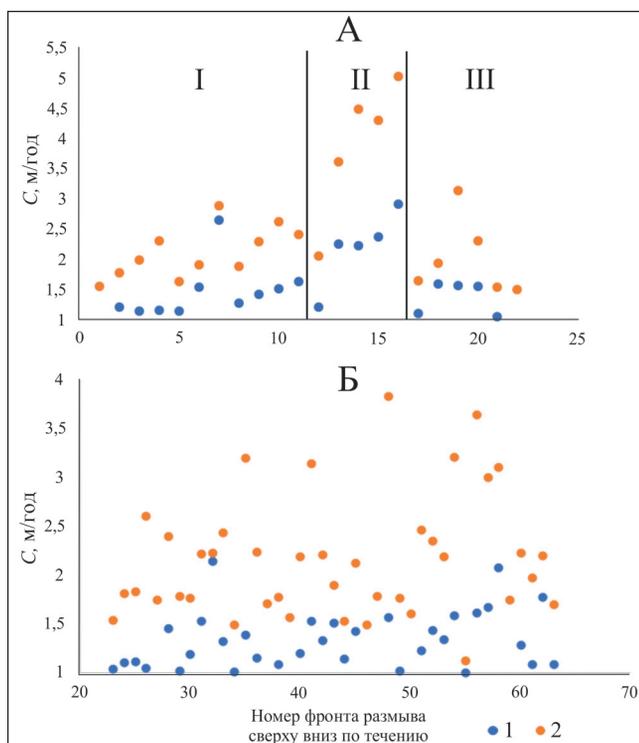
С относительной прямолинейностью рукавов разветвлений и расположением правых, как правило, основных по водности, вдоль коренного берега, связаны невысокие темпы размывов берегов и незначительная их общая протяженность – 70 км на 63 фронта размыва, длина каждого от 110 м до 2,6 км. По всему участку среднего Иртыша средняя скорость размыва пойменных берегов колеблется от 1,0 до 2,9 м/год, максимальная – до 5 м/год. На широкопойменном участке последовательная смена

типов русла находит свое отражение в изменении темпов отступления берегов по его длине (рис. 5А): в начале участка они не более 3 м/год, у свободных излучин – до 5 м/год; при подходе реки к коренному берегу интенсивность размыва пойменных берегов вновь снижается.

В адаптированном и врезанном русле расположение реки на неразветвленных участках и основных по водности рукавов вдоль правого коренного берега обуславливает снижение скоростей размыва берегов (не более 4 м/год) и отсутствие направленного тренда в их изменении (см. рис. 5Б); во врезанном русле фронты размыва берегов приурочены в основном к островам.

Прямолинейность неразветвленных участков русла и рукавов разветвлений, их положение возле ведущего правого коренного берега или под направляющим воздействием его неровностей обуславливают относительное постоянство форм русла и незначительность их изменений во времени. Про-

исходящие переформирования связаны с местными расширениями русла, образующимися из-за размыва пойменных берегов при отклонении потока неровностями правого коренного берега, формированием в расширениях двухстречневых систем потока, перераспределением стока между рукавами и, главное, в адаптированном и врезанном русле – разработкой карьеров в ранее маловодных рукавах и развитием параллельно-рукавных разветвлений. Наиболее существенные переформирования русла связаны с трансформациями осередковых разветвлений в островные (русловые) как следствие регулирования стока и разработки карьеров, естественным и антропогенно обусловленным объединением островов и их причленением к берегам, а на широкопойменном участке – с эволюцией излучин. Среди последних в первой половине XX в. дважды происходило спрямление сначала сложной петлеобразной излучины, а затем образование прорванной излучины, старые русла которых сейчас сохранились в виде старичной протоки (Щербековской) и ложбины на левобережной пойме. На средней крутой пальцеобразной Пальчueвской излучине в привершинной части из-за нарушения условия обтекания потоком берегов (правила Миловича –  $r < 3b_p$ ) произошло смещение стречня потока к выпуклому берегу, образование осередка, превратившегося в остров, и заполнение им вогнутости правого берега. Водность протоки вдоль него – 11,2%. Такое развитие крутых излучин типично для меандрирующего русла нижнего Иртыша [Чалов и др., 2023а].



Практически все разветвления сопровождаются расширениями русла разной протяженности (самые длинные – в параллельно-рукавных разветвлениях и некоторых односторонних, в 1,5–2 раза большие по сравнению со смежными неразветвленными участками). К расширениям русла и основных рукавов приурочены перекаты, которые занимают постоянное положение на реке, испытывая только местные деформации. Также относительно стабильными являются перекаты в узлах разветвления русла и слияния рукавов.

По длине реки от госграницы сначала постепенно, а затем по нарастающей, возрастает воздействие на русло антропогенного фактора. Сначала это единичные карьеры, а затем – их массовая разработка, приведшая к формированию параллельно-рукавных разветвлений и развитию рукавов за прибрежными островами (при естественном абсолютном преобладании рукавов вдоль правого коренного берега), что отразилось в состоянии водного пути и изменении положения судового хода. Антропогенно обусловленная трансформация разветвлений, особенно в урбанизированной части реки (в черте г. Омска), связаны с перекрытием дамбами большинства меньших по водности рукавов, причем Содомное и Усть-Заостровское разветвления изначально бывшие параллельно-рукавными стали из-за этого односторонними. Дноуглубительные работы на перекатах носят эксплуатационный характер и лишь в отдельных случаях были капитальными, обеспечивающими перевод судового хода в развивающиеся рукава. В одиночном разветвлении на врезанной излучине в г. Омске, благодаря им, искусственно поддерживается судоводный ход в правом рукаве, хотя его водность меньше, чем левого (соответственно 39 и 51%), поскольку в нем расположен заход в акваторию речного порта.

## ВЫВОДЫ

На среднем Иртыше от госграницы до г. Омска преобладают разветвления широкопойменного

Рис. 5. Изменение темпов размыва берегов  $C$ , м/год по фронтам размыва сверху вниз по течению среднего Иртыша: А – на широкопойменном участке 2048–1951 км; I–III – чередование прямолинейного русла и русловых разветвлений; II – свободные излучины; Б – в адаптированном и врезанном русле. Темпы размыва: 1 – средние  $C_{cp}$ , м/год, 2 – максимальные  $C_{max}$ , м/год

Fig. 5. Change in the rate of bank erosion ( $C$ , m/year) on the middle Irtysh along erosion fronts from upstream to downstream: А – on a wide floodplain section of 2048–1951 km; I–III – alternation of a straight channel and channel branches; II – free meanders; Б – in an adapted and incised channel. Erosion rates: 1 – average  $C_{av}$ , m/year; 2 – maximum  $C_{max}$ , m/year

( $B_n/b_p > 3$ ), адаптированного ( $B_n/b_p < 3$ ) и врезанного русла ( $B_n < b_p$ ), причем переход от одного типа к другому сопровождается усложнением морфологии и развитием параллельно-рукавных разветвлений. На нижнем Иртыше вплоть до слияния с Обью, где русло широкопойменное и водоносность возрастает более чем в два раза, река меандрирует. Излучины имеются также у широкопойменного русла в начале участка. Большие излучины врезанного русла осложнены односторонними и одиночными разветвлениями.

Основная причина разветвлений и формирования параллельно-рукавных разветвлений, отличающихся от широкопойменного русла с этим типом (средняя и нижняя Лена, верхняя Обь, Северная Двина) удлинённостью больших островов ( $L_o/B_o \gg 3-4$ ) и прямолинейностью рукавов, превышением критерия  $\Theta$  и разделением потока на две ветви течения, между которыми происходит аккумуляция наносов. Это связано с сосредоточением стока в русле (отсутствием или незначительностью разливов воды по пойме) и расширением последнего.

Важным условием формирования широкопойменного и адаптированного русла является его расположение вдоль правого ведущего коренного берега, вследствие чего излучины и разветвления образуются ниже его неровностей, отклоняющих поток к противоположному пойменному. Размыв последнего приводит к образованию местных расширений русла, которые заполняются островами.

В естественных условиях преобладали осередковые, единичные односторонние и одиночные разветвления и только во врезанном русле суще-

ствовало два коротких параллельно-рукавных разветвления. Регулирование стока и перехват наносов водохранилищами, массовая разработка русловых карьеров привели к зарастанию осередков, превращению их в острова и повсеместному развитию односторонних, параллельно-рукавных и одиночных разветвлений, а также прибрежных островов второго порядка в рукавах. Одновременно, несмотря на отсутствие обсыхающих в межень осередков, в прямолинейном русле и в широких рукавах проявляется разделение потока на две динамические оси с повышением отметок дна (подводными осередками) между ними – возможного в перспективе развития новых разветвлений.

Массовая разработка карьеров и сопровождающее их врезание реки привели к обмелению и отмиранию многих маловодных рукавов в односторонних разветвлениях, причленению к берегам и объединению островов, удлинению больших островов, развитию параллельно-рукавных разветвлений. Эти процессы, особенно в черте г. Омска, были усилены перекрытием рукавов дамбами для создания затонов, предотвращения размывов берегов и улучшения условий судоходства (сосредоточения стока в судоходном рукаве). В других разветвлениях разработка карьеров в несудоходных рукавах привела к их развитию, рассредоточению стока и, соответственно, осложнениям водного пути.

На основе проведенного руслового анализа и выявленных закономерностей развития русла были обоснованы рекомендации по учету русловых процессов при водохозяйственном и транспортном использовании реки.

**Благодарности.** Выполнено по планам НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши и научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева (№ 121051400038-1, 121051200166-4 – исходные данные, русловой анализ) при финансовой поддержке РФФ (проект № 23-17-00065 – натурные исследования, типизация разветвлений; № 23-77-01006 – анализ размывов берегов).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беркович К.М.* Русловые процессы и русловые карьеры. М.: Изд-во МГУ, 2005. 109 с.
- Беркович К.М.* Устойчивость и деформации русел равнинных рек // Геоморфология. 2004. № 1. С. 13–19.
- Бурлибаев М.Ж., Куц С.И., Фацевский Б.В. и др.* Затопление поймы Ертиса – главный фактор устойчивого развития речной экосистемы. Алматы: Каганат, 2014. 395 с.
- Великанов М.А.* Русловой процесс. М.: Госфизматиздат, 1958. 395 с.
- Водные пути бассейна Лены. М.: МИКИС, 1995. 600 с.
- Гендельман М.М.* Исследование свободного меандрирования речных русел // Геоморфология. 1988. № 3. С. 38–45.
- Герасимова А.С.* Характеристика современных геологических процессов, развитых в долинах нижнего течения рек Оби и Иртыша // Вест. Моск. ун-та. Сер. Биология, почвоведение, геология, география. 1959. № 2. С. 103–111.
- Давыдов Л.К.* Гидрография СССР. Т. II. Л.: Изд-во ЛГУ, 1955. 600 с.
- Дегтярев В.В.* Изменение гидрологического режима Иртыша. М.: Речной транспорт, 1968. № 12. С. 39–40.
- Дегтярев В.В.* Улучшение судоходных условий сибирских рек. М.: Транспорт, 1987. 176 с.
- Диденко Б., Орлович-Грудков К.* Влияние разработки русловых карьеров на режим свободной реки // Речной транспорт. 1969. № 9. С. 38–39.
- Завадский А.С.* Гидролого-морфологический анализ свободного меандрирования русел равнинных рек: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2001. 27 с.

- Карасев И.Ф. Руслловые процессы при переброске стока. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 288 с.
- Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 347 с.
- Петров И.Б. Обь-Иртышская пойма. Типизация и качественная оценка земель. Новосибирск: Наука, 1979. 136 с.
- Ржаницын Н.А. Руслоформирующие процессы рек. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 264 с.
- Рулева С.Н., Завадский А.С., Кичигин А.Н. и др. Условия формирования и морфология русла реки Сухоны // Эрозионные и руслловые процессы. Вып. 5. М.: МАКС-пресс, 2010. С. 421–439.
- Руслловые процессы и водные пути на реках бассейна Северной Двины. М.: Журнал «РТ», 2012. 492 с.
- Руслловые процессы и водные пути на реках Обского бассейна. Новосибирск: РИПЭЛплюс, 2001. 300 с.
- Транспортное использование водохранилищ. М.: Транспорт, 1972. 224 с.
- Чалов Р.С., Завадский А.С., Куракова А.А. и др. Морфология русла среднего и нижнего Иртыша (российский участок) // Тридцать восьмое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, руслловых и устьевых процессов. Пермь: ПГНИУ, 2023а. С. 51–63.
- Чалов Р.С., Голубцов Г.Б., Завадский А.С. и др. Морфология русла и рассредоточение стока среди островов сложных параллельно-рукавных разветвлений нижней Лены и их многолетняя изменчивость // Водные ресурсы. 2023б. Т. 50. № 3. С. 274–285.
- Чалов Р.С., Чалов С.Р. Морфология скального русла реки Ангара на участках Богучанского и Мотыгинского водохранилищ // География и природные ресурсы. 2009. № 1. С. 103–110.
- Baker V.R. Stream-channel response to floods with examples from central Texas, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1977, vol. 88, no. 8, p. 1057–1071.
- Komar P.D. Shape of streamlined island on Earth and Mars: Experiments and analyses of the minimum-drag form, *Geology*, 1983, no. 11, p. 651–654.
- Leopold L.B., Wolman M.G. River meanders, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1960, vol. 71, p. 769–794.
- Nanson A., Knighton D. Anabranching rivers: their cause, character and classification, *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, vol. 21(3), p. 217–239.
- Rosgen D.L. A classification of natural rivers, *Catena*, 1994, no. 22, p. 168–199.
- Schumm S.A. *The fluvial system*, 1977, 338 p.
- Электронный ресурс*  
Волковская Н.Л. Наводнения на реках Омской области // Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. 2017. № 1. С. 1–7. URL: <http://e-journal.omgau.ru/index.php/2017/1/35-statya-2017-1/741-00271> (дата обращения 10.02.2023).

Поступила в редакцию 15.02.2024

После доработки 16.03.2024

Принята к публикации 24.04.2024

## CONDITIONS RESPONSIBLE FOR THE FORMATION AND MORPHODYNAMICS FEATURES OF THE MIDDLE IRTYSH BRANCHED CHANNEL

R.S. Chalov<sup>1</sup>, G.B. Golubtsov<sup>2</sup>, A.S. Zavadskiy<sup>3</sup>, A.A. Kurakova<sup>4</sup>

<sup>1-4</sup> *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography*

<sup>1</sup> *Department of Land Hydrology, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: rachalov@mail.ru*

<sup>2</sup> *Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Leading Engineer, Ph.D. in Geography; e-mail: georgy1995golubcov@yandex.ru*

<sup>3</sup> *Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: az200611@rambler.ru*

<sup>4</sup> *Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Junior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: a.a.kurakova@mail.ru*

The results of channel analysis of the Middle Irtysh River (from the state border to the city of Omsk) are for the first time presented. Despite its water management and transport importance, until recently it remained a practically unstudied river in relation to channel processes. The Irtysh River channel doesn't comply with generally accepted ideas about the meandering of medium and small rivers and the predominant branching of large and largest rivers. It was revealed that the meandering channel within Kazakhstan is replaced by a branched one to the city of Omsk and downstream, and then, becoming a largest river, it meanders, only being complicated by islands that appear on the wings and in the top parts of the bends. It has been determined that the changing geomorphologic type of the channel along the length of the Middle Irtysh River (state border – Omsk) leads to the morphological complication of branches. Parallel-arm branches are widespread there, characterized by the elongation of large islands ( $L_0/B_0 \gg 3-4$ ) and the straightness of the arms. The location of the channel along the right leading bedrock bank leads to the formation of branches below its ledges and irregularities that deflect the flow to the opposite floodplain bank. High anthropogenic load on the river (regulation

of flow and interception of sediment by reservoirs, quarrying, and construction of dams) led to the incision of the riverbed, transformation of branches, as well as to the regression and shallowing of low-water branches, and, in other cases, to the emergence of branches and dispersal of runoff. The resulting changes in the Irtysh River bed lead to deterioration and complication of the waterway operation and water management of the river.

**Keywords:** channel processes, branching channels, meanders, bank erosion, anthropogenic impact, Karasev criterion

**Acknowledgments.** The paper is prepared according to the scientific research plans of the Department of Land Hydrology and the Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes of the Lomonosov Moscow State University (No. 121051400038-1, 121051200166-4 – initial data, channel analysis) and financially supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-17-00065 – field research, typification of branching forms; No. 23-77-01006 – analysis of bank erosion).

## REFERENCES

- Baker V.R. Stream-channel response to floods with examples from central Texas, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1977, vol. 88, no. 8, p. 1057–1071.
- Berkovich K.M. *Rusloviye protsessy i rysloviye karyery* [Riverbed processes and riverbed quarries], Moscow, MSU Publ., 2005, 109 p. (In Russian)
- Berkovich K.M. *Ustoychivost i deformatsii rusel ravninnykh rek* [Sustainability and deformations of widefloodplain riverbeds], *Geomorfologiya*, 2004, no. 1, p. 13–19. (In Russian)
- Burlibayev M.Zh., Kuts S.I., Fashcevsky B.V. et al. *Zatoplenie poymy Ertisa – glavniy faktor ustoychivoogo razvitiya rechnoy ekosistemy* [Flooding of the Irtysh floodplain is the main factor in the sustainable development of the river ecosystem], Almaty, Kaganat Publ., 2014, 395 p. (In Russian)
- Chalov R.S., Chalov S.R. *Morfologiya skalnogo rusla reki Angary na uchastkakh Boguchanskogo i Motyginskogo vodokhranilysch* [Morphology of the rocky bed of the Angara River in sections of the Boguchansky and Motyginsky water reservoirs], *Geografiya i prirodnye resursy*, 2009, no. 1, p. 103–110. (In Russian)
- Chalov R.S., Golubtsov G.B., Zavadskiy A.S. et al. Channel Morphology and Flow Distribution between Islands in Complex Parallel-Branch Bifurcation in the Lower Lena and Their Long-Term Variations, *Water Resources*, 2023, vol. 50, no. 3, p. 368–378.
- Chalov R.S., Zavadskiy A.S., Kurakova A.A., Kamyshev A.A. [Morphology of the middle and lower Irtysh channel (Russian section)], *Tritsat vosmoye plenar. mezhvuz. koordinats. sov. po probleme erozionnykh, ruslovykh i ustyevnykh protsessov* [38th plenary inter-school coordination meeting on the problem of erosion, channel and river mouth processes], Perm, PGNIU Publ., 2023, p. 51–63. (In Russian)
- Davydov L.K. *Gidrografiya SSSR* [Hydrography of the USSR], Leningrad, LSU Publ., 1955, vol. 2, 600 p. (In Russian)
- Degtyaryov V.V. *Izmeneniye gidrologicheskogo rezhyma Irtysha* [Changes in the hydrological regime of the Irtysh River], Moscow, Rechnoy Transport Publ., 1968, no. 12, p. 39–40. (In Russian)
- Degtyaryov V.V. *Uluchsheniye sudokhodnykh uslovii sibirskikh rek* [Improving navigable conditions of Siberian rivers], Moscow, Transport Publ., 1987, 176 p. (In Russian)
- Didenko B., Orlovich-Grudkov K. *Vliyaniye razrabotki ruslovykh karyerov na rezhym svobodnoy reki* [The influence of river-bed quarry development on the regime of a free river], *Rechnoy Transport*, 1969, no. 9, p. 38–39. (In Russian)
- Gendelman M.M. *Issledovaniye svobodnogo meandrirovaniya rechnykh rusel* [Study of free meandering of river channels], *Geomorfologiya*, 1988, no. 3, p. 38–45. (In Russian)
- Gerasimova A.S. *Kharakteristika sovremennykh geologicheskikh protsessov, razvitykh v dolinakh nyzhnego techeniya rek Obi i Irtysha* [Characteristics of modern geological processes developed in the valleys of the lower reaches of the Ob and Irtysh rivers], *Vest. Mosk. un-ta. Ser. biologiya, pochvoveneniye, geologiya, geografya*, 1959, no. 2, p. 103–111. (In Russian)
- Karasev I.F. *Rusloviye protsessy pri perebroske stoka*, [Channel processes during runoff diversion], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975, 288 p. (In Russian)
- Komar P.D. Shape of streamlined island on Earth and Mars: Experiments and analyses of the minimum-drag form, *Geology*, 1983, no. 11, p. 651–654.
- Leopold L.B., Wolman M.G. River meanders, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1960, vol. 71, p. 769–794.
- Makkaveev N.I. *Ruslo reki i eroziya v ee basseine* [River channel and erosion in its basin], Moscow, AS USSR Publ., 1955, 347 p. (In Russian)
- Nanson A., Knighton D. Anabranching rivers: their cause, character and classification, *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, no. 21(3), p. 217–239.
- Petrov I.B. *Ob-Irtyshskaya poima: tipizatsiya i kachestvennaya otsenka zemel* [Ob-Irtysh floodplain. Typification and qualitative assessment of lands], Novosibirsk, Nauka Publ., 1979, 136 p. (In Russian)
- Rosgen D.L. A classification of natural rivers, *Catena*, 1994, no. 22, p. 168–199.
- Rulyova S.N., Zavadskiy A.S., Kichigin A.N. et al. [Formation conditions and morphology of the Sukhona riverbed], *Eroziionniye i rusloviye protsessy* [Erosion and channel processes], iss. 5, Moscow, MAKS-press Publ., 2010, p. 421–439.
- Rusloviye protsessy i vodniye puti na rekakh basseina Severnoi Dviny* [Channel processes and waterways on the rivers of the Northern Dvina River basin], Moscow, Zhurnal RT Publ., 2012, 492 p. (In Russian)
- Rusloviye protsessy i vodniye puti na rekakh Obskogo Basseina* [Channel processes and waterways on the rivers of the Ob River basin], Novosibirsk, RIPEL Plus Publ., 2001, 300 p. (In Russian)

- Rzhanitsyn N.A. *Rusloformiruyushchie protsessy rek* [Processes of riverbed formation], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985, 264 p. (In Russian)
- Schumm S.A. *The fluvial system*, 1977, 338 p.
- Transportnoye ispolzovaniye vodokhranilyshch* [Transport use of water reservoirs], Moscow, Transport Publ., 1972, 224 p. (In Russian)
- Velykanov M.A. *Ruslovoy protsess* [Channel process], Moscow, Gosfizmatizdat Publ., 1958, 395 p. (In Russian)
- Vodniye puti basseina Leny* [Waterways of the Lena River basin], Moscow, MIKIS Publ., 1995, 600 p. (In Russian)
- Volkovskaya N.L. Navodneniya na rekakh Omskoi oblasti [Floods on the rivers of the Omsk region], *Elektronny Nauchno-metodicheskiy Zhurnal Omskogo GAU*, 2017, no. 1, p. 1–7. (In Russian)
- Zavadskiy A.S. *Gidrologo-morfologicheskiy analiz svobodnogo meandrirovaniya rusel ravninnykh rek* [Hydro-morphological analysis of free meandering of lowland river channels], Extended abstract of Ph.D. Thesis in Geography, Moscow, MSU Publ., 2001, 27 p. (In Russian)

Received 15.02.2024

Revised 16.03.2024

Accepted 24.04.2024

---

---

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

---

---

УДК 911.375

### ГЕОГРАФИЯ «ФАБРИК МЫСЛИ»

Ф.В. Блажевич<sup>1</sup>, Н.А. Слука<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра географии мирового хозяйства*

<sup>1</sup> *Студент; e-mail: fedor.blazhevich02@mail.ru*  
<sup>2</sup> *Проф., д-р геогр. наук; e-mail: sluka2011@yandex.ru*

Статья посвящена географическому изучению феномена «фабрик мысли» (ФМ), процесс создания и распространения которых по всему миру резко ускорился, начиная с последней четверти XX в. Пространственная неравномерность их роста привела к снижению макрорегиональных диспропорций в пользу глобального Юга, а также ротации в составе топ-10 стран при существенном снижении места США и увеличении азиатских стран, прежде всего Китая. ФМ с базовыми функциями становятся массово-повсеместным явлением и необходимым атрибутом крупного города. Элита ФМ, которую составляют крупные организации с международным признанием, способные оказывать влияние на решение самых сложных проблем и наделяющие избранные мегаполисы конкурентными преимуществами, весьма ограничена. 187 таких структур базируются в 88 городах 55 стран.  $\frac{2}{3}$  из них сосредоточены в мегаполисах Европы, по  $\frac{1}{4}$  – в Америке и Азии, менее  $\frac{1}{10}$  – в других регионах мира. Как показывают расчеты, их фактическое размещение не зависит от крупности демо-экономического потенциала города, его инвестиционной привлекательности, уровня глобальности и задается прежде всего фактором столичности. Согласно территориальной концентрации ведущих ФМ, выделены несколько категорий экспертно-аналитических центров мира: крупнейшие (более 15 ФМ, Вашингтон), крупные (10–15, Лондон, Нью-Дели), средние (5–10, Пекин, Брюссель), малые (2–5, 28 городов) и формирующиеся (53). При всей очевидности ресурса ФМ в наращивании международной значимости городов и авторитета страны Россия пока отстает и в мировом рейтинге экспертно-аналитических центров представлена лишь Москвой.

**Ключевые слова:** тенденции развития, факторы размещения, иерархия и география экспертно-аналитических центров мира

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.11

#### ВВЕДЕНИЕ

В условиях нарастания, с одной стороны, взаимозависимости и взаимозависимости стран и территорий в ходе процесса глобализации, с другой – турбулентности мирового развития, существенно повышается роль обеспечения принятия выверенных решений проблем во всех сферах деятельности и на всех уровнях власти – от локального до глобального. Во многом с этой целью в свое время возник и быстро совершенствуется феномен «фабрик мысли» (англ. – Think Tanks) (ФМ), часто именуемых аналитическими или «мозговыми» центрами и представляющих собой публичные институты, осуществляющие исследовательскую, прогнозную и консультационную деятельность, а также оценки возможных социально-экономических последствий политических реше-

ний [Диксон, 2004]. Наряду с транснациональными корпорациями (ТНК) и международными организациями они входят в состав наиболее влиятельных акторов «мягкой силы» [Слука и др., 2020] и некоторыми экспертами признаются в качестве так называемой пятой власти. В обширной политологической литературе достаточно подробно отражены история формирования феномена, особенности уже нескольких поколений ФМ, их назначение, функции, влияние на общественно-политические процессы; во многих трудах предложены принципы и варианты типологий, раскрыты основные подходы к изучению ФМ [Сунгуров, 1999; Балаян, Сунгуров, 2022]. В силу особой социальной значимости и имея пространственно-временную выраженность, явление, безусловно, заслуживает изучения силами обще-

ственной географии. Выявленные закономерности развития, принципы и приоритеты размещения, архитектура взаимодействий ФМ, адаптация методов работы и т. д. могут способствовать рационализации территориальной организации системы независимой экспертизы и повышению эффективности решения крупных внутренних и внешних проблем в большинстве стран мира, включая Россию.

Немалое значение раскрытие феномена ФМ имеет для геоурбанистики. Базируясь исключительно в городах и располагая разветвленной системой трансграничных связей, ФМ во многом определяют как совокупность командных и контрольных функций отдельных агломераций, их конкурентоспособность, устойчивость развития и международный престиж, так и конфигурацию общего каркаса центров «мягкой силы», действующих на мировой арене. При этом если симбиоз города с ТНК и международными организациями относительно хорошо изучен, в частности в рамках концепции мирового и глобального города [Слукa, Колясев, 2020; Taylor, 2004], то механизм его взаимодействия с ФМ пока не получил должного освещения в специальной литературе. Остаются открытыми вопросы географии ключевых «мозговых» центров мира, урбанистической структуры ФМ, особенностей моделей их локализации в агломерационном пространстве и многие другие. Исследование формирования, современной иерархии и очагов повышенной территориальной концентрации ФМ способно дополнить сложившиеся представления о современных нодальных точках глобально-городских структур. Цель данной работы – на основе анализа доступных статистических данных выявить особенности размещения ФМ в мировом урбанистическом сообществе.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование опирается на концептуальный базис общественной географии, теорию мирового и глобального города [Friedmann, 1986; Hall, 1966; Sassen, 1991], теоретический конструкт «мягкой силы» [Nye, 1991; 2011], труды отечественных и зарубежных политологов [Колосов, 2016; Лебедева, 2017; Чагры, 2019 и др.]; а также на ежегодники, аналитические доклады и рейтинги городов авторитетных международных организаций (ООН, Всемирного банка, McKinsey Global Institute и др.). В работе использована совокупность методов, в том числе историко-географический, сравнительно-географический и картографический. Главный источник фактического материала – данные докладов за 2008–2021 гг., подготовленных в рамках международной программы «Аналитические центры и гражданское общество» (The Think Tanks and Civil Societies Programm, TTCSP) на базе Пенсильванского университета путем опроса 1800 экспертных групп

из научных и политических кругов, государственных и частных структур, а также СМИ. Всего в 2020 г. в анализ было вовлечено 11 164 ФМ. В целях достижения максимально объективной оценки их ранжирование проводится по десяткам категорий. Самостоятельное значение имеет группировка ФМ по странам и макрорегионам мира (Северная Америка, Южная и Центральная Америка, Европа (Западная и Восточная, включая Россию), Азия (включая Ближний Восток), Африка, Австралия и Океания); по областям проводимых исследований<sup>1</sup> и «особым достижениям» (например, лучшие информационно-пропагандистские центры, коммерческие, правительственные, новые и др.); а также состав крупнейших или наиболее влиятельных ФМ. Последние выделяются с учетом четырех групп показателей: 1) ресурсы (включая, например, численность и состав персонала; уровень, качество и стабильность финансовой поддержки и т. д.); 2) результаты (количество и качество подготовленных предложений и идей, публикаций, проведенных интервью в новостях, организованных брифингов, конференций, семинаров и пр.); 3) использование результатов (количество и качество выступлений в СМИ, просмотров в Интернете, консультаций должностных лиц и др.); 4) воздействие (рекомендации, рассмотренные или принятые политиками и организациями гражданского общества; присужденные награды; цитирование публикаций в академических журналах и др.). При всей внушительности массива предоставляемой информации по мнению ряда специалистов методология расчета данного рейтинга ФМ не лишена недостатков [Андреев, 2020]. Исследование проводилось в два этапа. На первом этапе анализировалось распределение общей массы ФМ по странам и макрорегионам мира и характер пространственных сдвигов за период 2008–2020 гг.; на втором этапе изучался состав и города базирования крупнейших ФМ. Для предварительной оценки факторов их размещения и расчета корреляционной зависимости привлекалась информация по численности населения урбанистических ареалов, объему ВВП, числу дипломатических миссий, а также рассматривались позиции городов в рейтингах глобальных и «умных» мегаполисов, инвестиционной привлекательности мировых центров [Рейтинг..., 2023; Demographia..., 2022; GaWC, 2020; IESE Cities in Motion Index, 2020].

<sup>1</sup> Всего 14 направлений, включая оборону и национальную безопасность, внутреннюю экономическую политику, образовательную политику, энергетику и ресурсы, экологическую политику, внешнюю политику и международные отношения, внутреннюю политику в сфере здравоохранения, глобальную политику в сфере здравоохранения, международное развитие, международную экономическую политику, политику в области технологий, социальную политику, продовольственную безопасность, безопасность водных ресурсов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Первые ФМ в массовом порядке, по мнению специалистов, появились в начале XX в. в США в виде комплекса структур на базе «академических, университетских лабораторий, участвовавших в подготовке политических программ рекомендаций для правительств» [Савнева, 2009]. Однако, по оценкам,  $\frac{2}{3}$  существующих в мире ФМ возникли после 1970 г., причем более половины из них – после 1980 г. [Think Tanks..., 2000]. Именно начиная с последней четверти XX в. резко ускорился процесс создания и распространения ФМ по всему миру, чему способствовало завершение холодной войны, появление проблем, выходящих за границы и возможности государств, ускорение демократизации в разных частях мира, глобализация, технологические достижения, сложные процессы принятия решений [Чагры, 2019, с. 78]. В самом начале XXI в. в мире насчитывалось около 3 тыс. таких организаций, в 2008 г. – почти 5,5 тыс., а в 2020 г. – уже более 11 тыс. [McGann, 2008–2021]. По сути, их общее число растет по экспоненте, в геометрической прогрессии. Если в 2008 г. аналитические центры действовали в 173 странах, то ныне – уже в 182.

Практически на протяжении всего XX в. подавляющая часть из них располагалась в городах экономически развитых стран глобального Севера при противоборстве за лидерство двух полюсов геополитической силы – Европы и Северной Америки. Однако, начиная с конца XX в., пространственная неравномерность бума ФМ и активная диффузия явления привели к заметному снижению макрорегиональных диспропорций. К настоящему времени становится все более ощутимым место в мировой структуре аналитических центров глобального Юга. Сконцентрировав почти половину всего мирового прироста ФМ за период 2008–2021 гг., особенно быстро прогрессирует азиатский регион, который уже превзошел в макрорегиональной иерархии Северную Америку и Европу (табл. 1). Общий вектор перераспределения сил подчеркивает и изменение пропорций между ведущими неформальными межгосударственными объединениями, возглавляющими глобальный Север и Юг. Так, если по общему числу ФМ роль международного клуба «Большая семерка» неуклонно уменьшается – с 49,4% в 2008 г. до 19,7% в 2020 г., то БРИКС, напротив, устойчиво и существенно растет – с 7,7 до 22,0%.

Таблица 1

### Сдвиги в размещении ФМ по макрорегионам мира, 2008–2020 гг.

Регионы	Число ФМ, ед.		Доля региона %		Прирост, ед.	Индекс роста (2008 г. = 100)
	2008	2020	2008	2020		
Северная Америка, в т.ч.:	1925	2397	35,0	21,0	472	124,5
США	1777	2203	32,5	19,7	426	124,0
Канада	94	85	1,7	0,8	–9	90,4
Европа, в т.ч.:	1722	2891	31,5	25,9	1169	167,9
Великобритания	283	515	5,2	4,6	232	182,0
Германия	186	266	3,4	2,4	80	143,0
Франция	165	275	3,0	2,5	110	166,7
Россия	107	143	2,0	1,3	36	133,6
Азия, в т.ч.:	871	3953	15,9	35,4	3082	453,9
Китай	74	1413	1,4	12,7	1339	1909,5
Индия	121	612	2,2	5,5	491	505,8
Республика Корея	29	412	0,5	3,7	383	1420,7
Африка, в т.ч.:	425	682	7,8	6,1	257	160,5
ЮАР	78	102	1,4	0,9	24	130,8
Южная и Центральная Америка, в т.ч.:	484	1179	8,9	10,6	695	243,6
Аргентина	122	262	2,2	2,4	140	214,8
Бразилия	39	190	0,7	1,7	151	487,2
Австралия и Океания	38	62	0,7	0,6	24	163,2
Мир	5465	11 164	100,0	100,0	5699	204,3

Примечание. Составлено по [McGann, 2008–2021].

При этом, как и десятилетия назад, на топ-10 стран мира приходится более половины всех ФМ. Однако из-за разной динамики ее архитектура претерпевает значительные изменения. С 2008 г. в нее неизменно входят США, Великобритания, Франция, Германия, Аргентина, Индия; ее состав покинули Россия, Канада, Италия, ЮАР, а восполнили – Китай, Республика Корея, Бразилия и Вьетнам. За рассматриваемый период доля США в глобальной структуре ФМ даже при некотором увеличении их абсолютного числа сократилась с 32,5 до 19,7%. Напротив, мощный рывок, впрочем, как и во многих других сферах, совершил Китай, обойдя по общей массе ФМ все страны Европы и уверенно заняв второе место в мире (12,7%). Появились сотни новых экспертно-аналитических организаций в Индии, которая ныне оттеснила с третьего места в топ-10 Великобританию, и в Республике Корея (3,7%). Не последнюю роль в таких сдвигах играет как общий прогресс и актуализация проблем развития глобального Юга, международная миграция интеллектуальной элиты, расширение международной сети филиалов аналитических центров, так и быстрый ход процесса урбанизации в развивающихся странах, обеспечивший относительное выравнивание условий городской среды для пребывания и деятельности ФМ.

ФМ, выполняющие базовые функции (исследовательская, консультационная, коммуникативная), становятся массово-повсеместным явлением и необходимым атрибутом крупного города. Однако их элита, получившая международное признание и наделяющая избранные мегаполисы конкурентными преимуществами, весьма ограничена. В числе ФМ мирового уровня экспертами выделяется всего 1277 структур, а в качестве крупнейших признаются лишь 187. Это, как правило, авторитетные организации с большой историей, устойчивым финансированием и постоянным составом кадров, объединенные в глобальные сети, тесно сотрудничающие с международным научным сообществом, крупным бизнесом и властными структурами разного ранга, ведущие междисциплинарные исследования по самой широкой проблематике, часто привлекаемые для решения сложных глобальных проблем. Среди них традиционно значатся, например, американские: Рэнд корпорейшн (RAND Corporation) с более чем 2 тыс. штатных сотрудников и бюджетом, превышающим 400 млн долл., Брукингский институт (Brookings Institution) с 600 работниками и бюджетом 100 млн долл., Центр стратегических и международных исследований (Center for Strategic and International Studies) с 500 сотрудниками и бюджетом 45,5 млн долл. и др. [Маслов, 2020].

В силу особых возможностей и эффективности деятельности подобные ФМ регулярно занимают ведущие позиции в большинстве специализированных рейтингов и, согласно нашим данным, размещаются в 88 городах 55 стран. При этом 41,4% из них базируется в мегаполисах Европы (включая Россию), по ¼ – Америки и Азии, менее ¼ – прочих регионов мира, а национальные модели «урбанистического расселения» весьма специфичны: 27 таких организаций США находятся в восьми городах, 15 организаций Великобритании – в трех, 13 Индии – в четырех, 12 Германии – в пяти, 10 Китая – в трех центрах. В России<sup>2</sup>, замыкающей топ-10 стран на 2021 г., все четыре элитные ФМ сосредоточены в Москве (включая Московский центр Карнеги<sup>3</sup>, ИМЭМО РАН, Совет по внешней и оборонной политике, МГИМО) [Андреев, 2020].

Авангард ФМ присутствует в городах самого разного класса. Это и города-гиганты (например, Токио, Нью-Йорк), и крупные геополитические центры (Брюссель, Гаага), и чисто университетские города (Кембридж, Стэнфорд), и города-курорты (Давос), и «новые» города (южнокорейский Седжонг). Расчеты и сравнительный анализ показывают практически полное отсутствие чувствительности их размещения к крупности демо-экономического потенциала мегаполиса, его позициям среди глобальных, «умных» и инновационно привлекательных центров, а также качеству городской среды, которое везде относительно близко, соответствуя высоким международным стандартам. Существенно большую роль получает статус города, выполняемые им функции, место в сфере политического взаимодействия и влияния, состояние научно-образовательной сферы и особенно – уровень концентрации штабов принятия политических и деловых решений (министерства, ведомства, партии, международные организации, ТНК и пр.) (табл. 2). В наибольшей мере этим условиям удовлетворяют столицы государств. В них ныне сосредоточено 72% всех крупнейших ФМ мира.

Оценка территориальной концентрации наиболее престижных ФМ позволяет составить общее представление о современной иерархии ведущих экспертно-аналитических центров мира и развести их на несколько условных категорий: крупнейшие

<sup>2</sup> Согласно справочнику «Атлас аналитических центров ЕАЭС», в России насчитывается 100 ФМ, из которых 82 находятся в Москве, 7 – в Санкт-Петербурге, по одной – в Ростове-на-Дону, Нижнем Новгороде, Томске и Новосибирске [Атлас аналитических центров..., 2021].

<sup>3</sup> Отметим, что в 2022 г. представительство Фонда Карнеги за международный мир в России исключено из реестра филиалов и представительств международных организаций и иностранных некоммерческих неправительственных организаций.

(более 15), крупные (10–15), средние (5–10), малые (2–5) и формирующиеся. Ее с солидным отрывом возглавляет Вашингтон (19 ФМ, включая Брукингский институт, Фонд Карнеги за международный мир, Центр стратегических и международных исследований, Фонд «Наследие», Институт Катона, Центр Вильсона и др.), второй эшелон составляют Лондон (13, Королевский институт международ-

ных отношений) и Нью-Дели (10, Центр азиатских стратегических исследований), третий (по 8) – Пекин (Академия общественных наук КНР) и Брюссель (Международная кризисная группа и BRUEGEL), четвертый – 28 центров (76 ФМ) из разных развитых и развивающихся стран, а пятый, наиболее многочисленный и с самым широким пространственным охватом, – 53 центра (рис.).

Таблица 2

### Основные характеристики мировых центров ведущих «фабрик мысли»

Город	Страна	Число ФМ	Население агломерации, млн чел.	ВВП, млрд долл.	Число дипломатических миссий	Место в рейтинге*		
						1	2	3
Вашингтон	США	19	7,9	0,578	172	14	15	13
Лондон	Великобритания	13	10,8	1,064	151	2	1	1
Нью-Дели	Индия	10	31,2	0,594	154	66	162	77
Пекин	Китай	8	18,9	0,950	160	6	84	4
Брюссель	Бельгия	8	2,2	0,210	173	16	41	45
Токио	Япония	4	37,8	2,205	146	4	4	3
Москва	Россия	4	17,9	1,004	145	18	87	10
Берлин	Германия	4	4,3	0,243	152	13	7	12
Сеул	Республика Корея	3	23,2	1,125	95	17	19	9
Мехико	Мексика	3	21,9	0,547	100	31	130	72
Сингапур	Сингапур	3	5,9	0,600	77	9	9	22
Найроби	Кения	3	6,9	0,014	94	89	154	-
Сидней	Австралия	3	4,8	0,398	51	15	17	20
Мадрид	Испания	3	6,8	0,376	114	19	25	19
Буэнос-Айрес	Аргентина	3	15,7	0,381	85	32	90	42
Париж	Франция	3	11,1	1,036	150	3	3	5
Милан	Италия	3	5,5	0,405	61	44	42	24
Коэффициент корреляции			-0,017	0,042	0,625	-0,132	-0,075	-0,152

*Примечание.* \* Рейтинги: 1 – глобальных городов; 2 – «умных» городов; 3 – инновационной привлекательности мировых городов. Составлено авторами по [McGann, 2021], данным международной статистики и рейтингов городов.

### ВЫВОДЫ

За последние десятилетия феномен ФМ преодолел ряд стадий развития и окончательно оформился в глобальную, реально действующую и динамичную систему или международное экспертно-аналитическое сообщество. Бум ФМ во многом знаменует укрупнение потенциала и расширение возможностей в решении международных проблем и достижении политических целей с позиций не столько «жесткой», сколько «мягкой силы», что весьма значимо в условиях нарастания турбулентности мирового развития и неизбежного перехода к полицентричному миру.

Использование географического подхода позволяет не только наиболее полно раскрыть простран-

ственно-временные особенности формирования международного экспертно-аналитического сообщества, но и выявить основные современные черты и параметры его пространственной структуры, количественно оценить интенсивность территориальных сдвигов в начале XXI в. и общую направленность в развитии по пути к полицентризму за счет возникновения все новых «полюсов роста».

Современная архитектура международного экспертно-аналитического сообщества складывается из двух качественных и разновеликих слоев: ФМ с базовыми функциями и мировой элиты – крупнейших ФМ, различающихся влиятельностью, пространственной организацией и динамикой развития. Интенсивный прирост первых означает

достройку глобальной системы, расширение географии и активную перегруппировку сил в пользу глобального Юга при особой роли азиатского региона во главе с Китаем. Состав вторых весьма ограничен и консервативен, соответствует в географическом плане исторически сложившимся центрам геополитической силы с приоритетом глобального Севера при лидерстве европейского региона.

Размещение крупнейших ФМ опосредуется большой совокупностью факторов и характеризуется явным тяготением к мощным международным центрам, прежде всего столицам государств, что отчасти объяснимо сосредоточением в них главных источников спроса на экспертно-аналитические услуги. Сеть столичных городов можно рассматривать в качестве несущего каркаса международного экспертно-аналитического сообщества.

Несмотря на авторитет и большие возможности, Россия в международном экспертно-аналитическом сообществе пока занимает весьма скромное место. Реализация имеющегося потенциала, «реконцептуализация» и опережающее развитие сферы с учетом опыта и всех слагаемых успеха Китая [Маслов, 2021], представляется важным ресурсом для обеспечения высокопрофессионального решения многих внутренних и внешних проблем страны особенно в условиях санкционного давления Запада, а также для повышения ее международного престижа.

Дальнейший анализ особенностей развития, состава, выполняемых функций и факторов размещения ФМ, наряду с другими транснациональными акторами «мягкой силы», представляется перспективным направлением в географическом изучении мирового урбанистического сообщества в рамках новой проблемной области – геополитической урбанистики.

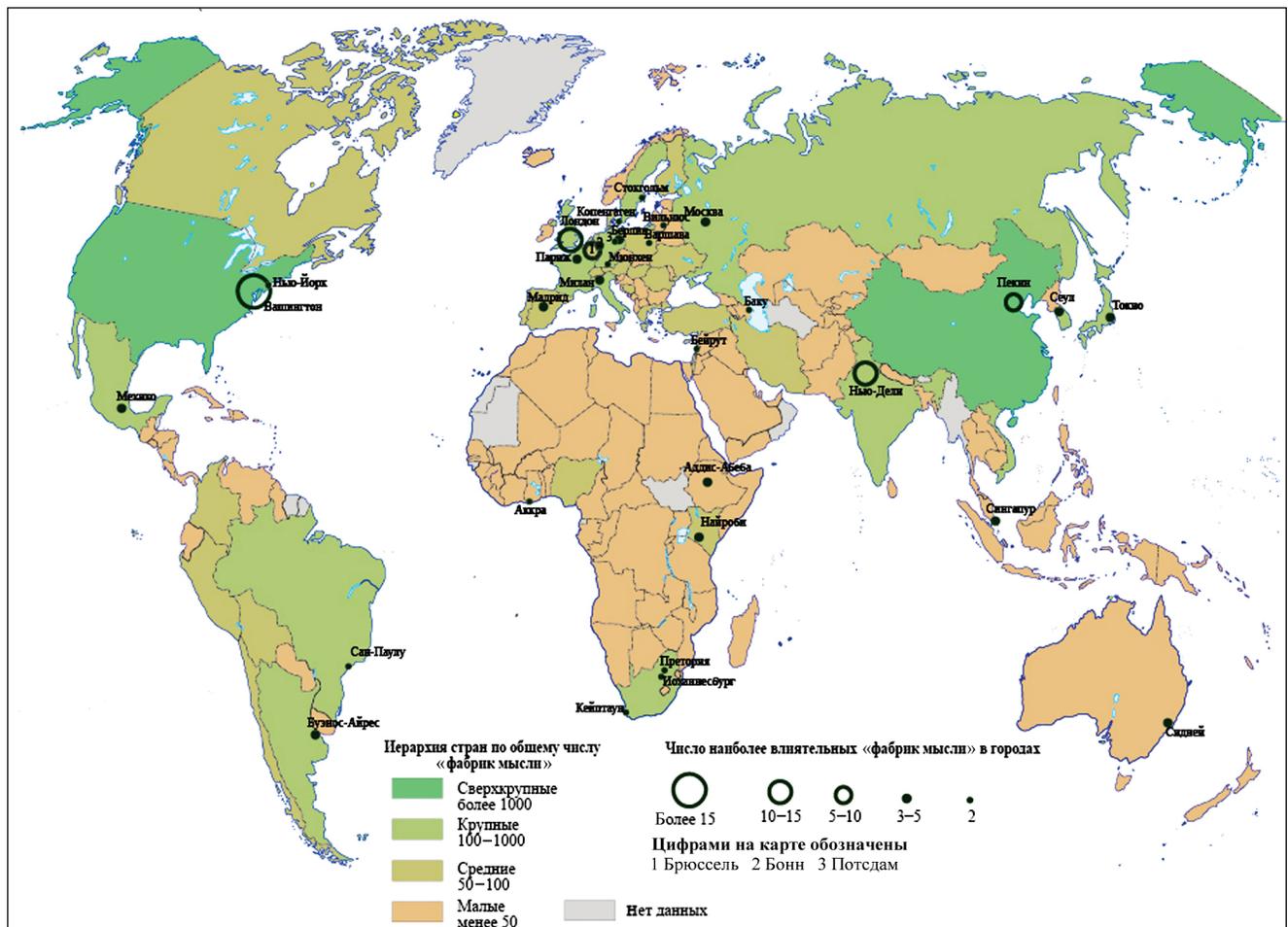


Рис. География ведущих экспертно-аналитических центров мира. Показаны центры с двумя и более крупнейших ФМ. Составлено авторами при участии Н.В. Рябовой по [McGann, 2021]

Fig. Geography of the world's leading expert and analytical centers. Centers with two or more largest TTs are shown. Compiled by the authors with the participation of N.V. Ryabova according to [McGann, 2021]

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас аналитических центров ЕАЭС. М.: ИНИОН РАН, 2021. 206 с.
- Балаян А.А., Сунгуров А.Ю. Фабрики мысли в условиях глобальных трансформаций. СПб.: Алетейя, 2022. 372 с.
- Диксон П. Фабрики мысли / пер. с англ. М.: АСТ, 2004. 512 с.
- Колосов В.А. Геополитика и мировое хозяйство: традиции и новые междисциплинарные направления исследований // География мирового хозяйства: традиции, современность, перспективы. М.; Смоленск: Ойкумена, 2016. С. 81–94.
- Лебедева М.М. «Мягкая сила»: понятие и подходы // Вестник МГИМО-Университета. 2017. № 3(54). С. 212–223. DOI: 10.24833/2071-8160-2017-3-54-212-223.
- Маслов А.А. Трансформация аналитических центров как элемента «мягкой силы» Китая в 2010–2020 гг. // Контуры глобальных трансформаций: политика, экономика, право. 2021. Т. 14. № 4. С. 6–22. DOI: 10.23932/2542-0240-2021-14-4-1.
- Рейтинг инновационной привлекательности мировых городов: 2023. М.: НИУ ВШЭ, 2023. 316 с.
- Савнева Е.Ю. Генезис фабрик мысли: сб. работ 66-й научной конференции студентов и аспирантов Белгосуниверситета: в 3 ч. Минск, 2009. Ч. 3. С. 286–289.
- Слука Н.А., Карякин В.В., Колясев Е.Ф. Глобальные города как хабы новых транснациональных акторов // Контуры глобальных трансформаций: политика, экономика, право. 2020. Т. 13. № 1. С. 203–226. DOI: 10.23932/2542-0240-2020-13-1-11.
- Слука Н.А., Колясев Е.Ф. География центров международных организаций // Вест. моск. ун-та. Сер. 5. География. 2020. № 5. С. 114–119.
- Сунгуров А.Ю. Организации-посредники в структуре гражданского общества. Некоторые проблемы политической модернизации России // Полис. 1999. № 6. С. 34–48.
- Чагры А. «Мозговые центры» и политический процесс: роль и значимость в принятии решений // Вестник Забайкальского государственного университета. 2019. Т. 25. № 4. С. 75–85. DOI: 10.21209/2227924520192547585.
- Friedmann J. The World City Hypothesis, *Development and Change*, 1986, vol. 4, p. 69–83.
- Hall P. *The World Cities*, London, Weidenfeld & Nicholson, 1966, 256 p.
- Nye J. *Bound To Lead: The Changing Nature Of American Power*, NY, Basic Books, 1991, 336 p.
- Nye J. *The Future of Power*, NY, Public Affairs, 2011, 320 p.
- Sassen S. *The Global City: New York, London, Tokyo*, Princeton, New Jersey, 1991, 480 p.
- Taylor P.J. The New Geography of Global Civil Society: NGOs in the World City Network, *Globalizations*, 2004, no. 1(2), p. 265–277.
- Think Tanks and Civil Societies. Catalyst for ideas and action*, J.G. McGann and R.K. Weaver (eds.), NY, Routledge, 2000, 617 p.
- Электронные ресурсы*
- Андреев С. Рейтинг фабрик мысли: проблемы методологии // РСМД, 2020. URL: <https://russiancouncil.ru/analytics-and-comments/analytics/reiting-fabrik-mysli-problemy-metodologii/> (дата обращения 17.09.2023).
- Маслов В. Фабрики мысли как неотъемлемая часть западного сверхобщества // AFTERSHOCK. 2020. URL: <https://aftershock.news/?q=node/938638&full> (дата обращения 10.06.2023).
- Demographia World Urban Areas, URL: <http://www.demographia.com/db-worldua.pdf> (дата обращения 30.07.2023).
- GaWC, Globalization and world cities, 2020, URL: <https://www.lboro.ac.uk/gawc/> (дата обращения 08.07.2023).
- IESE Cities in Motion Index, 2020, URL: <https://www.iese.edu/indicecim/> (дата обращения 30.02.2022).
- McGann J. Global Go To Think Tank Index Report, TTCSP, 2008–2021, URL: [https://repository.upenn.edu/think\\_tanks/18](https://repository.upenn.edu/think_tanks/18) (дата обращения 30.03.2023).

Поступила в редакцию 27.12.2023

После доработки 03.02.2024

Принята к публикации 24.04.2024

## GEOGRAPHY OF “THINK TANKS”

F.V. Blazhevich<sup>1</sup>, N.A. Sluka<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geography of World Economy*

<sup>1</sup> *Student; e-mail: fedor.blazhevich02@mail.ru*

<sup>2</sup> *Professor; D.Sc. in Geography; e-mail: sluka2011@yandex.ru*

The article deals with the geographical study of a think tanks (TTs) phenomenon. Since the last quarter of the 20<sup>th</sup> century their creation and distribution has accelerated dramatically around the world. The spatial unevenness of their growth has reduced the macro-regional imbalances in favor of the global South, as well as rotated the top 10 countries lowering the United States position and rising those of the Asian countries, primarily that of China. TTs with basic functions are becoming a widespread phenomenon and a necessary attribute of a large city. The TT<sup>7</sup> elite, consisting of large internationally recognized organizations, which are capable to influence the solution of the most difficult problems and endow selected megacities with competitive advan-

tages, is very limited. 174 such structures are based in 89 cities of 55 countries.  $\frac{2}{3}$  of them are concentrated in megacities of Europe,  $\frac{1}{4}$  each in megacities of America and Asia, and less than  $\frac{1}{10}$  in other regions of the world. As calculations show, their actual placement does not depend on a city's demographic and economic potential, its investment attractiveness, or the level of globality and is primarily determined by the factor of being a capital city. According to the territorial concentration of the leading TTs, several categories of expert analytical centers of the world are distinguished: the largest (more than 15 TTs, Washington), large (10–15, London, New Delhi), medium (5–10, Beijing, Brussels), small (2–5, 28 cities) and emerging (53 cities). Despite the evident role of TT resource in increasing the international importance of cities and the country's authority, Russia is still lagging behind and is represented in the world ranking of expert analytical centers by Moscow only.

**Keywords:** development trends, placement factors, hierarchy and geography of expert analytical centers of the world

## REFERENCES

- Atlas analiticheskikh centrov EAES* [Atlas of Analytical Centers of the Eurasian Economic Union], Moscow, INION RAN Publ., 2021, 206 p. (In Russian)
- Balayan A.A., Sungurov A.Yu. *Fabriki mysli v usloviyah global'nyh transformacij* [Think tanks under the global transformations], St. Petersburg, Aleteya Publ., 2022, 372 p. (In Russian)
- Chagry A. "Mozgovye centry" i politicheskij process: rol' i znachimost' v prinyatii reshenij ["Think Tanks" and the Political Process: the Role and Significance in Decision-making], *Vest. Zabajkal'skogo gosudarstvennogo un-ta*, 2019, vol. 25, no. 4, p. 75–85, DOI: 10.21209/2227924520192547585. (In Russian)
- Dickson P. *Think Tanks*, NY, Ballantine Books, 1972.
- Friedmann J. The World City Hypothesis. *Development and Change*, 1986, vol. 4, p. 69–83.
- Hall P. *The World Cities*. London: Weidenfeld & Nicholson, 1966, 256 p.
- Kolosov V.A. [Geopolitics and the World Economy: Traditions and New Interdisciplinary Research Directions], *Geografiya mirovogo khozyajstva: traditsii, sovremennost, perspektivy* [Geography of the World Economy: Traditions, Modernity, Prospects], Moscow, Smolensk, Oikumena Publ., 2016, p. 81–94. (In Russian)
- Lebedeva M.M. "Myagkaya sila": ponyatie i podhody ["Soft Power": Concept and Approaches], *Bulletin of MGIMO University*, 2017, no. 3, p. 212–223, DOI: 10.24833/2071-8160-2017-3-54-212-223. (In Russian)
- Maslov A.A. Transformaciya analiticheskikh centrov kak elementa "myagkoj sily" Kitaya v 2010–2020 gg. [The Transformation of Analytical Centers as an Element of Chinese "Soft Power" in the 2010–2020], *Outlines of Global Transformations: Politics, Economics, Law*, 2021, vol. 14, no. 4, p. 6–22, DOI: 10.23932/2542-0240-2021-14-4-1. (In Russian)
- Nye J. *Bound To Lead: The Changing Nature Of American Power*, NY, Basic Books, 1991, 336 p.
- Nye J. *The Future of Power*, NY, Public Affairs, 2011, 320 p.
- Rejting innovacionnoj privilekatel'nosti mirovyh gorodov: 2023* [Global Cities Innovation Index: 2023], Moscow, HSE Publ., 2023, 316 p. (In Russian)
- Sassen S. *The Global City: New York, London, Tokyo*, Princeton, New Jersey, 1991, 480 p.
- Savneva E.Yu. [The genesis of Think Tanks], *Sbornik rabot 66-j nauchnoj konferencii studentov i aspirantov Belgo-suniversiteta* [Collection of Papers of the 66th Scientific Conference of Students and Postgraduates of the Belgorod State University], Minsk, 2009, vol. 3, p. 286–289. (In Russian)
- Sluka N.A., Karyakin V.V., Kolyasev E.F. Global'nye goroda kak habyy novykh transnacional'nyh aktorov [Global Cities as Hubs of New Transnational Actors], *Kontury global'nyh transformacij: politika, ekonomika, pravo*, 2020, vol. 13, no. 1, p. 203–226, DOI: 10.23932/2542-0240-2020-13-1-11. (In Russian)
- Sluka N.A., Kolyasev E.F. Geografiya centrov mezhdunarodnyh organizacij [Geography of the Centers of International Organizations], *Vest. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2020, no. 5, p. 114–119. (In Russian)
- Sungurov A.Yu. Organizacii-posredniki v strukture grazhdanskogo obshchestva. Nekotorye problemy politicheskoy modernizacii Rossii [Intermediary Organizations in the Structure of Civil Society. Some Problems of Russia's Political Modernization], *Polis*, 1999, no. 6, p. 34–48. (In Russian)
- Taylor P.J. The New Geography of Global Civil Society: NGOs in the World City Network, *Globalizations*, 2004, no. 1(2), p. 265–277.
- Think Tanks and Civil Societies. Catalyst for Ideas and Action*, ed. by J.G. McGann and R.K. Weaver, NY, Routledge, 2000, 617 p.
- Web sources*
- Andreev S. Rejting fabrik mysli: problemy metodologii [Rating of Think Tanks: Problems of Methodology], *RSMD*, 2020, URL: <https://russiancouncil.ru/analytics-and-comments/analytics/rejting-fabrik-mysli-problemy-metodologii/> (access date 17.09.2023).
- Demographia World Urban Areas, URL: <http://www.demographia.com/db-worldua.pdf> (access date 30.07.2023).
- GaWC, Globalization and World Cities, 2020, URL: <https://www.lboro.ac.uk/gawc/> (access date 08.07.2023).
- IESE Cities in Motion Index, 2020, URL: [www.iese.edu/indicecim/](https://www.iese.edu/indicecim/) (access date 30.02.2022).
- McGann J. Global Go To Think Tank Index Report, TTCSP, 2008–2021, URL: [https://repository.upenn.edu/think\\_tanks/18](https://repository.upenn.edu/think_tanks/18) (access date 30.03.2023).

Received 27.12.2023

Revised 03.02.2024

Accepted 24.04.2024

## ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ СТАТЕЙ К ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. СЕРИЯ 5. ГЕОГРАФИЯ»

### Общие требования к статье

Журнал «Вестник Московского университета. Серия 5. География» публикует результаты оригинальных исследований в различных областях географической науки, теоретические, методические и обзорные статьи, представляющие интерес для мирового научного сообщества. Представленные к публикации материалы должны соответствовать формальным требованиям журнала, пройти процедуру слепого рецензирования и получить рекомендацию к публикации на заседании редколлегии журнала. Решение о публикации принимается на основе научной значимости и актуальности представленных материалов. Статьи, отклоненные редакционной коллегией, повторно не принимаются и не рассматриваются.

Объем статьи (текст, таблицы, список литературы, рисунки, перевод на английский) не должен превышать 1 а. л. (40 тыс. печатных знаков, включая пробелы, 5 рисунков), не более 50 тыс. знаков для обзорных статей. Объем кратких сообщений составляет 0,25 а. л. Рекомендуемый список литературы – до 30 наиболее актуальных работ по рассматриваемому вопросу. В обзорных статьях список литературы не должен превышать 60 источников. Для кратких сообщений список литературы может быть до 10 источников. Самоцитирований в списке литературы не должно быть более 10% от общего числа использованных источников.

Статья должна быть четко структурирована и включать рубрики: введение; материалы и методы исследований; результаты исследований и их обсуждение; выводы; список литературы.

Все материалы статьи komponуются **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 их номерам (например: рис.1.tiff, рис.2.jpg), в графическом формате (eps, tif, jpg) разрешением не менее 300 dpi для полутоновых и 600 dpi для черно-белых изображений и графиков. Для графиков, выполненных в Excel, дополнительно прилагаются соответствующие файлы Excel. Картинки должны быть полностью готовы к изданию. Представление рисунков в виде схем Word или набранного текста с добавлением графических элементов, наложенных сверху, **не допускается**.

*Ссылка на источник* в тексте документа указывается в квадратных скобках. В тексте ссылки через запятую указывается фамилия автора и год издания. Если ссылок несколько – они отделяются друг от друга точкой с запятой. Ссылка на источник на иностранном языке указывается на языке оригинала. Список русскоязычной литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1–2003, 7.82–2001 и 7.0.5–2008. DOI (при наличии) указывается в конце ссылки. Ссылка на источник на английском языке оформляется единообразно и в русскоязычном, и в переведенном на английский язык списке литературы. **При наличии у русскоязычного издания, которое фигурирует в списке литературы, оригинальной или переводной англоязычной версии в ссылке должна быть указана именно она, а не русскоязычный вариант.**

Более подробные инструкции по подготовке статей для авторов можно найти на сайте журнала <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/index>. Статьи, оформленные не по правилам, будут возвращаться автору на переработку.

Статьи принимаются на географическом факультете в редакции, через сайт журнала и по электронной почте.

Редакция: комната 2108а, тел. +7(495)9392923. Сайт журнала <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/index>. Электронная почта: [vestnik\\_geography@mail.ru](mailto:vestnik_geography@mail.ru).

*Плата за публикацию не взимается*

## **У Ч Р Е Д И Т Е Л И :**

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;  
географический факультет МГУ

## **РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ :**

**С.А. ДОБРОЛЮБОВ**, доктор географических наук, профессор, академик РАН (главный редактор)  
**В.С. ТИКУНОВ**, доктор географических наук, профессор (зам. главного редактора)  
**Е.А. ЕРЕМЕНКО**, кандидат географических наук (ответственный секретарь)  
**А.И. АЛЕКСЕЕВ**, доктор географических наук, профессор  
**С.И. БОЛЫСОВ**, доктор географических наук, профессор  
**А.Н. ГЕННАДИЕВ**, доктор географических наук, профессор  
**К.Н. ДЬЯКОНОВ**, доктор географических наук, профессор, член-корреспондент РАН  
**С.С. ЗИЛИТИНКЕВИЧ**, доктор географических наук, профессор (Метеорологический институт Финляндии)  
**О.Г. ЗОЛИНА**, профессор (Университет Ж. Фурье, г. Гренобль, Франция)  
**В.Ю. ИВАНОВ**, профессор (Мичиганский университет, США)  
**Н.С. КАСИМОВ**, доктор географических наук, профессор, академик РАН  
**А.В. КИСЛОВ**, доктор географических наук, профессор  
**В.А. КОЛОСОВ**, доктор географических наук, профессор  
**К.П. КОЛТЕРМАНН**, профессор  
**М. КОНЕЧНЫ**, профессор (Университет г. Брно, Чешская Республика)  
**С.Б. КРООНЕНБЕРГ**, профессор (Технологический университет г. Делфт, Нидерланды)  
**С.М. МАЛХАЗОВА**, доктор географических наук, профессор  
**Г. МОУРИ**, профессор (Университет г. Токио, Япония)  
**С.А. СОКРАТОВ**, кандидат географических наук, PhD  
**П.Е. ТАРАСОВ**, доктор наук, профессор (Берлинский Свободный университет, Германия)  
**Н.Л. ФРОЛОВА**, доктор географических наук, профессор  
**В.Е. ШУВАЛОВ**, кандидат географических наук, доцент  
**Т.А. ЯНИНА**, доктор географических наук, профессор  
**В.В. ЯНКО-ХОМБАХ**, доктор геолого-минералогических наук, профессор (Институт прикладных исследований Авалон, г. Виннипег, Канада)

## **EDITORIAL BOARD :**

**S.A. DOBROLUBOV**, doctor of science, Academician of the Russian Academy of Sciences, professor (Editor-in-chief)  
**V.S. TIKUNOV**, doctor of science, professor (Deputy Editor-in-chief)  
**E.A. EREMENKO**, candidate of science (Secretary-General)  
**A.I. ALEKSEEV**, doctor of science, professor  
**S.I. BOLYSOV**, doctor of science, professor  
**A.N. GENNADIYEV**, doctor of science, professor  
**K.N. D'YAKONOV**, doctor of science, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, professor  
**S.S. ZILITINKEVICH**, doctor of science, professor (Finnish Meteorological Institute, Finland)  
**O.G. ZOLINA**, professor (Fourier University, Grenoble, France)  
**V.YU. IVANOV**, professor (Michigan University, USA)  
**N.S. KASIMOV**, doctor of science, academician of the Russian Academy of Sciences, professor  
**A.V. KISLOV**, doctor of science, professor  
**V.A. KOLOSOV**, doctor of science, professor  
**K.P. KOLTERMANN**, professor  
**M. KONECNY**, professor (Masaryk University, Faculty of Science, Czech Republic)  
**S.B. KROONENBERG**, professor (Delft University of Technology, Department of Applied Earth Sciences, Netherlands)  
**S.M. MALKHAZOVA**, doctor of science, professor  
**G. MOURI**, professor (University of Tokyo, Japan)  
**S.A. SOKRATOV**, candidate of science, PhD  
**P.E. TARASOV**, professor (Free Berlin University, Germany)  
**N.L. FROLOVA**, doctor of science, professor  
**V.E. SHUVALOV**, candidate of science, associate professor  
**T.A. YANINA**, doctor of science, professor  
**V.V. YANKO-KHOMBACH**, doctor of science, professor (Avalon Institute of Applied Sciences, Winnipeg, Canada)

*Номер подготовили члены редколлегии*

**С.А. СОКРАТОВ, В.Е. ШУВАЛОВ**

Редактор **Е.С. Повалишникова**

*Адрес редколлегии:*

119992, Москва, Ленинские горы, МГУ,  
географический факультет, комн. 2108а. Тел. 7(495) 939-29-23

Журнал зарегистрирован в Министерстве печати и информации РФ.  
Свидетельство о регистрации № 1552 от 14 февраля 1991 г.

Подписано в печать 00.00.2016. Формат 60×90/8.  
Гарнитура Times New Roman. Бумага офсет. № 1. Офсетная печать. Усл. печ. л.  
Уч.-изд. л. 00. Тираж экз. Изд. № 00000. Заказ №

---

Типография МГУ.  
119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 15.