

ISSN 0869-6071

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
РУССКОЕ ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО



ИЗВЕСТИЯ РУССКОГО ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА

июль–декабрь

Том 155. Вып. 3–4

2023



СОДЕРЖАНИЕ

Том 155, номер 3–4, 2023

Вдольбереговое перемещение наносов в Ладожском озере по данным анализа тяжелой фракции песков в прибрежных отложениях

В. М. Анохин, О. М. Виноградова, И. М. Пятов, Д. С. Дудакова 3

Уточнение региональной методики расчета потенциального смыва почв от талых вод для северной лесостепи Средней Сибири

И. А. Голубев 17

Комплексная оценка эколого-геоморфологической опасности земель байкальской природной территории, нарушенных при горнопромышленном освоении

*Е. А. Еременко, Ю. Р. Беляев, С. И. Болысов,
А. В. Бредихин, В. Р. Битюкова* 30

Сезонная и межгодовая изменчивость температуры воды в Петрозаводской губе Онежского озера

*Г. Э. Здоровеннова, Р. Э. Здоровеннов,
Н. И. Пальшин, Т. В. Ефремова* 47

Влияние современных лесозаготовок на нарушение почвы, состояние живого напочвенного покрова и последующее возобновление деревьев в бореальных лесах России

А. С. Ильинцев 62

Региональная динамика промышленности, сельского хозяйства и населения в России в 1990–2020 гг.: геоэкологическая интерпретация

Н. Н. Ключев 74

Ландшафтно-экологический анализ территории сургутского района Хмао-Югры

Э. А. Кузнецова, М. А. Кичикова 89

Морфодинамика русла р. Коса как отражение направленности русловых процессов в долинах развития озерно-ледниковых террас (бассейн Верхней Камы)

Н. Н. Назаров, В. И. Петрова, И. В. Фролова 100

Карст Стерлитамакских (Башкирских) шиханов и их окрестностей в Южном Предуралье

А. И. Смирнов 113

Современная динамика растительности полярных и приполярных районов Западной Сибири по данным дистанционного зондирования Земли

А. В. Фахретдинов 136

Разветвления речных русел, их морфологические проявления и типизация

Р. С. Чалов, Г. Б. Голубцов, А. А. Куракова 145

ВДОЛЬБЕРЕГОВОЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ НАНОСОВ В ЛАДОЖСКОМ ОЗЕРЕ ПО ДАННЫМ АНАЛИЗА ТЯЖЕЛОЙ ФРАКЦИИ ПЕСКОВ В ПРИБРЕЖНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ

© 2023 г. В. М. Анохин^{a, b, *}, О. М. Виноградова^{a, **},
И. М. Пятов^{b, ***}, Д. С. Дудакова^{a, ****}

^aИнститут озероведения Российской академии наук — обособленное структурное подразделение
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
“Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук”,
Санкт-Петербург, Россия

^bРоссийский Государственный педагогический университет имени А.И. Герцена, Санкт-Петербург,
Россия

*E-mail: vladanokhin@yandex.ru

**E-mail: vinrozv@yandex.ru

***E-mail: vvvvv1a@mail.ru

****E-mail: judina-d@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.09.2023 г.

После доработки 28.09.2023 г.

Принята к публикации 22.11.2023 г.

С целью выявления направлений перемещения прибрежных отложений Ладожского озера был проведен отбор проб песка на всех типах его берегов и выделение тяжелой фракции методом шлиховой промывки. В ходе анализа шлихов под микроскопом оценивались минеральный состав, крупность и окатанность частиц шлиха — признаки, характеризующие степень переработки прибрежных осадков. К полученным цифровым данным применены два вида статистического анализа — кластерный и факторный. Выделено 4 кластера со сходными степенями переработки исходного материала, которые на основании результатов факторного анализа ранжированы по относительной дальности переноса от незначительной до весьма значительной. Максимальное количество шлихов с малыми дальностями переноса тяготеет к северным берегам озера, что объясняется расположением здесь коренных берегов — основных источников обломочного материала в озере. Шлихи с максимальными дальностями переноса относительно равномерно распределены по всем берегам озера. Анализ результатов показал, что на всех участках побережья существует перенос тяжелой фракции донных отложений в определенном направлении: на южном берегу — на запад, на западном — на север, на северном — на восток и на восточном — на юго-восток. Это позволяет сделать вывод о существовании долговременной тенденции переноса прибрежных отложений вдоль берегов Ладожского озера в направлении по часовой стрелке.

Ключевые слова: береговая зона, Ладожское озеро, прибрежные отложения, тяжелая фракция, кластерный анализ, факторный анализ, направление переноса

DOI: 10.31857/S0869607123030023, **EDN:** YJCHYO

ВВЕДЕНИЕ

Береговая зона озер охватывает, с одной стороны, часть акватории водоема, в которой на дно активно воздействуют прибрежные гидродинамические процессы, и, с

другой стороны, часть прибрежной суши, где в формах рельефа и отложениях прослеживается влияние озерных процессов (обычно это граница максимального штормового заплеска).

Исследования гидродинамических процессов и тесно связанных с ними литологических характеристик и процессов береговой зоны исключительно важны для оценки и мониторинга состояния, в частности, прибрежных экосистем.

Ладожское озеро и его береговая зона являются предметом изучения ряда научных организаций. На протяжении многих десятилетий проводились, в частности, исследования береговых отложений озера [1, 8–10]. В частности, ученые ВНИИ Океангеология в 1995 г. опубликовали результаты своих исследований донных отложений Ладожского озера, в том числе его береговой зоны, в сборнике “Геоэкология Ладожского озера” [8], где были даны общие характеристики распространения донных отложений в прибрежной зоне и проведена предварительная общая типизация берегов. Довольно подробно описана геоморфология и происхождение береговой зоны Ладоги в монографии “Ладога” [9], содержащей результаты многолетних исследований сотрудников института Озероведения РАН. Эта же организация в следующей публикации [10] продолжила обобщение результатов изучения морфологии и донных отложений Ладожского озера, в том числе его берегов. А.В. Амантов подробно рассмотрел историю образования и развития котловины Ладожского озера, включая его границы, т.е. береговую зону [1].

В то же время исследований конкретно береговой зоны и ее отложений авторы не обнаружили. Состав и свойства песчаных частиц тяжелой фракции в береговых отложениях Ладоги изучались весьма отрывочно и не охватывали всего периметра береговой области.

В полевые сезоны 2015–2019 гг. сотрудниками Института озероведения РАН были проведены исследования береговой зоны Ладожского озера, которые включали, в частности, отбор проб для выделения тяжелой фракции прибрежных осадков [2, 4, 5, 12, 13].

В 2020–2021 гг. были опубликованы предварительные результаты данного исследования, по 18-ти точкам опробования, распределенным по всем берегам озера [3, 6, 11]. В данной публикации обобщены данные уже по 38-и точкам.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА

Береговая зона Ладожского озера имеет ряд характерных особенностей, среди которых следует отметить следующие.

На северном побережье, сложенном коренными породами, преобладают берега фиардово-шхерного типа. Западное побережье, сложенное в основном псефитовыми отложениями, характеризуется господством абразионно-аккумулятивного типа берегов. Южный берег озера в значительной степени является пляжем, весьма существенно заросшим крупными растениями – макрофитами, заросли которых в основном и определяют его облик, что подтверждается космическими данными и данными воздушной съемки с беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) [4, 12]. На восточном берегу при движении с юго-востока на северо-запад прослеживается последовательная смена типов берегов: песчаные пляжи сменяются валунными абразионно-аккумулятивными и далее фиардово-шхерными берегами [4, 12].

Исследовались рыхлые отложения на всех этих типах берегов.

Методика отбора шлиховых проб соответствовала традиционным методам [7] и сводилась к промывке рыхлых отложений промывочным лотком с выделением тяжелой песчаной фракции (шлиха). Проба начальным весом около 20 кг отбиралась из прибрежных песков до 1 м от уреза воды. Шлих сознательно не домывался для сниже-

ния потерь частиц, способных дать информацию (что привело к значительному содержанию кварца в шлихе).

Минеральный состав, крупность, окатанность частиц шлихов изучались под микроскопом при 80–100 кратном увеличении. Обработка и анализ проб тяжелой фракции прибрежных осадков проводились по 38 точкам, распределенным по всей береговой линии Ладожского озера.

Первичная обработка результатов микроскопического исследования проводилась с помощью пакета EXCEL. Были составлены диаграммы с информацией о составе, крупности и окатанности частиц тяжелой фракции. Эти диаграммы были вынесены на схему Ладожского озера с привязкой каждой диаграммы к точке отбора соответствующей пробы (рис. 1).

Для анализа данных по пробам тяжелой фракции прибрежных осадков Ладожского озера также был использован аппарат многомерной статистики (кластерный и факторный анализы пакета STATISTICA).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Состав шлиховых проб береговой зоны Ладожского озера представлен следующими минералами: кварц, магнетит, гранат, реже — полевой шпат, слюда, сульфиды (пирит и халькопирит) и частицами пород: обломки гранитоидов и частицы глин в разных комбинациях и пропорциях.

Самыми распространенными минералами в исследуемых шлихах являются кварц, магнетит и гранат. Средние величины их содержания в пробах составляют, соответственно, 49, 27 и 14%. В 21 пробе содержание кварца, магнетита и граната суммарно превышает 95%.

Кварц обнаружен на всех станциях. На 27 станциях (56% от общего числа станций) кварц является преобладающим над каждым из остальных минералов. Магнетит присутствует на всех станциях, кроме ЮЛ15-1. Диапазон изменения содержания магнетита довольно велик. На 4 станциях содержание магнетита превышает 50% и он преобладает над кварцем. Зерна граната отмечены в шлихах всех исследуемых станций в значительно меньших количествах, чем кварц и магнетит.

Пирит и халькопирит обнаружены на 6 станциях, их содержание не превышает 3%. Обычно они наблюдаются в пробах вместе. Слюда встречается в 14 пробах, ее количество составляет первые проценты (максимум — 10%). Полевой шпат присутствует в составе почти трети из отобранных шлихов, максимальное его содержание (10%) отмечено на 4 точках восточной — юго-восточной части озера. Голубая глина представлена в шлихе в единственной точке ЮЛ15-1, ее содержание составляет 60%. Гранитоиды определены в 10 шлихах в количестве 4–30%.

Станция ЮЛ15-1 резко отличается от прочих. При минимальном из всех остальных проб содержании главного компонента шлиха — кварца (10%), полном отсутствии магнетита (единственная станция), максимальном содержании полевого шпата (10%), и значительном содержании гранитоидов (15%), глина составляет 60%. На других станциях глинистые частицы не наблюдались. Следует отметить, что крупность всех компонентов шлиха данной станции выше, чем на других станциях.

Крупность отдельных зерен минералов в пробах варьирует в довольно широких пределах. Однако 80% исследуемых шлихов имеет среднее значение крупности пробы менее 1 мм. Экстремальные значения средней крупности проб составляют, соответственно, 0,32 и 2,1 мм. Окатанность минеральных зерен в шлихах может быть плохой, средней и хорошей.

Исключительные размеры Ладожского озера обуславливают большое разнообразие типов строения берегов, которые объединяются в районы по типологическому сходству (см. раздел “Объект и методика”)

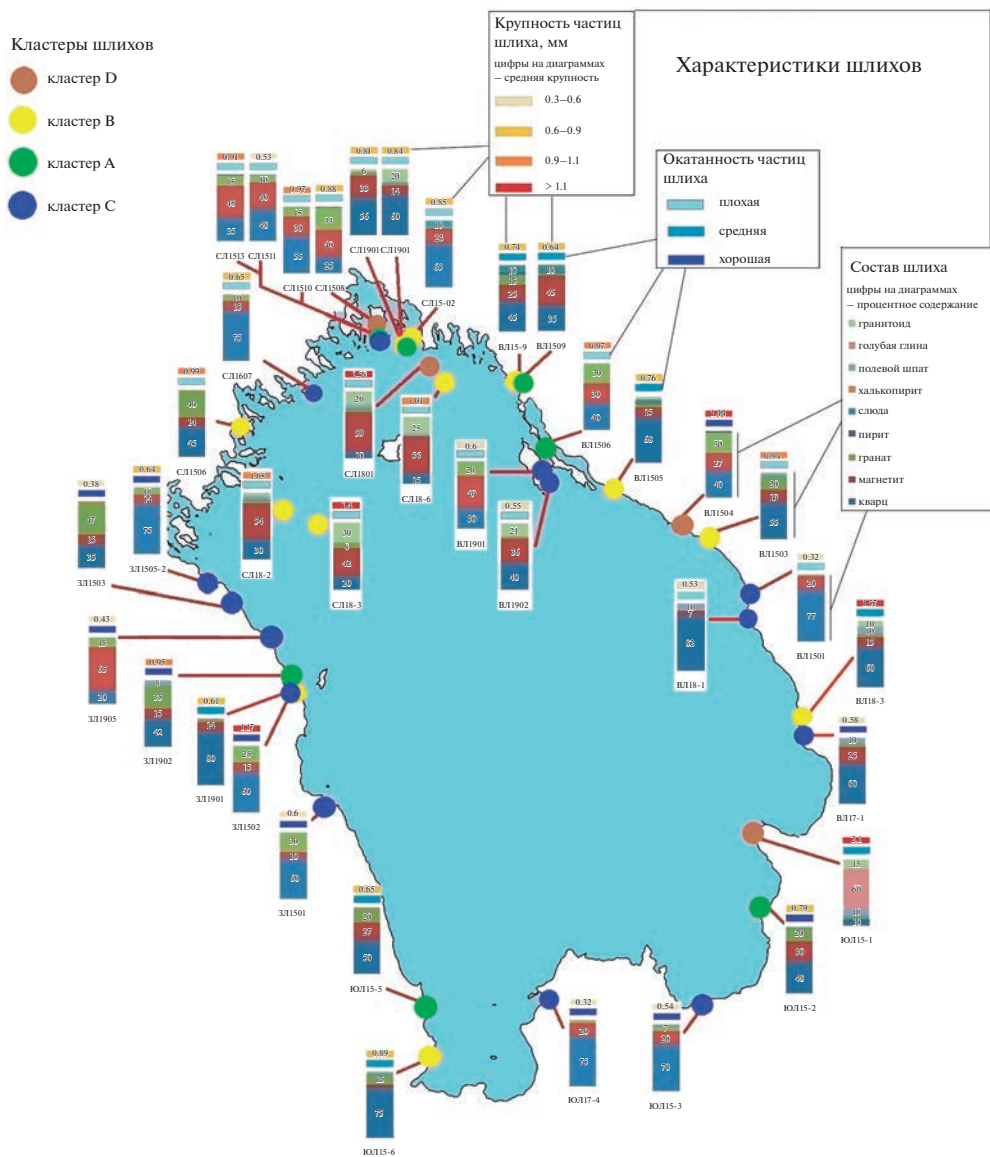


Рис. 1. Характеристики тяжелой минеральной фракции песчаных отложений на берегах Ладожского озера. В каждой колонке: верхний прямоугольник — крупность частиц шлиха, мм; ниже — окатанность; ниже — состав шлиха; ниже — номер станции. Процентное содержание указано для компонентов шлиха, значение которых более 5%.

Fig. 1. Characteristics of the heavy mineral fraction of sands on the shores of Lake Ladoga. In each column: the upper rectangle is the particle size of heavy minerals, mm; below — particle roundness; below — the composition of the heavy mineral fraction; below is the station number. Percentage is given for components with a value greater than 5%.

В табл. 1 представлены средние характеристики шлиховых проб по четырем структурно-геоморфологическим районам береговой зоны Ладожского озера.

Таблица 1. Средние характеристики шлиховых проб по районам береговой зоны Ладожского озера
Table 1. Average characteristics of concentrates in the regions of the coastal zone of Lake Ladoga

	район береговой зоны			
	северный	восточный	южный	западный
Содержания, %				
Кварц	43	62	64	55
Магнетит	33	19	23	22
Гранат	14	11	11	21
Пирит	0	1	0	0
Слюда	2	0	1	0
Халькопирит	0	0	0	0
Полевой шпат	1	6	0	2
Голубая глина	0	0	1	0
Гранитоид	6	2	0	0
Средняя крупность	0.84	0.9	0.94	0.76
Средняя окатанность	2.17	2.24	2.56	2.58

Южный и восточный районы имеют схожие характеристики содержания основных компонентов шлихов (кварц, магнетит, гранат), но для восточного района характерно также присутствие в пробах полевого шпата. Северное побережье имеет самый большой диапазон изменчивости минералогического состава шлихов от станции к станции. В шлихах данного района содержание кварца снижено по сравнению с остальными районами, но отмечается высокое содержание магнетита и присутствие значительного количества частиц гранитоида в шлихах. Шлихи западного побережья практически полностью состоят из зерен кварца, магнетита и граната. Количество кварца в пробах чуть больше половины, а содержание граната и магнетита практически одинаково. В шлихах присутствует полевой шпат в малом количестве.

Для анализа исходных данных были применены два метода кластерного анализ: иерархический метод Уорда с использованием Евклидовой метрики и метод К-средних.

Разбиение на кластеры, полученное методом Уорда, представлено в виде дендрограммы (рис. 2). В результате анализа полученной дендрограммы в качестве оптимального был выбран вариант разбиения на 4 кластера (linkage distance <6).

Следует отметить, что выделенные кластеры хорошо дифференцированы. Это указывает на существенные различия между ними. В качестве исходных признаков при проведении кластерного анализа шлиховых проб использовались суммарные значения процентного содержания в пробе стойких к истиранию минералов (кварца, магнетита и граната), средние значения крупности и окатанности проб. Указанные исходные признаки характеризуют степень переработки прибрежных осадков. Следовательно, можно утверждать, что станции внутри отдельных кластеров имеют сходную степень переработки исходного материала, которая существенно отличается от аналогичного параметра, характерного для станций других кластеров. На рис. 1. цвет точки станции указывает на ее принадлежность к тому или другому кластеру.

Результаты применения кластерного анализа методом К-средних для проб тяжелой фракции отложений береговой зоны Ладожского озера приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, результаты кластерного анализа, выполненного обоими методами, согласуются между собой. Исключение составляют две станции (ЗЛ1502 и СЛ15-02), отнесенные методом Уорда к кластеру 2.

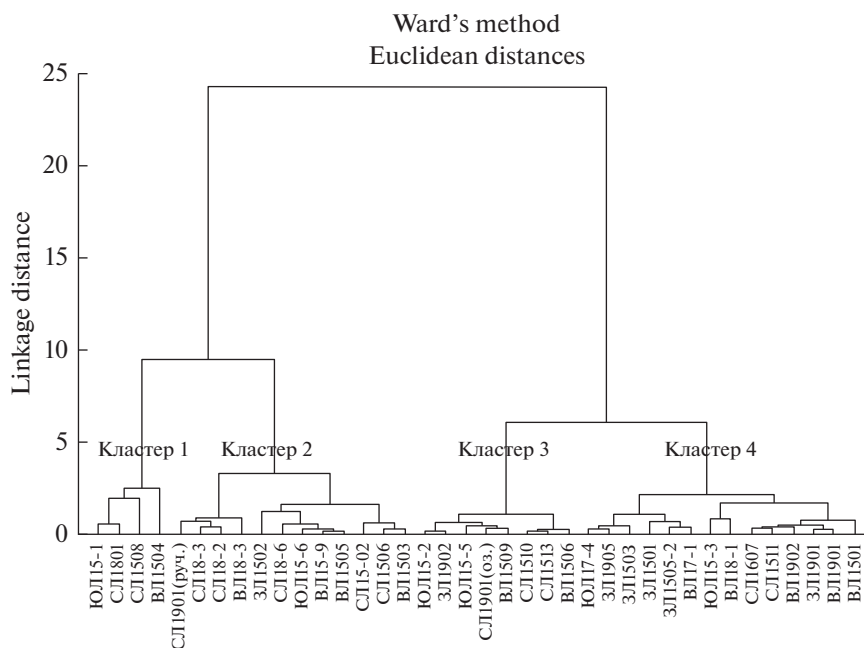


Рис. 2. Дендрограмма кластерного распределения станций отбора проб.

Fig. 2. Dendrogram of the cluster distribution of sampling stations.

Соответствие кластеров, полученных различными методами кластерного анализа приводятся в табл. 3.

Таблица 2. Состав кластеров по результатам кластерного анализа методом К-средних
Table 2. Composition of clusters based on the results of cluster analysis using the K-means method

Кластер А	Кластер В	Кластер С	Кластер D
ВЛ1506	ВЛ1503	ВЛ1501	ВЛ1504
ВЛ1509	ВЛ1505	ВЛ17-1	СЛ1508
ЗЛ1502	ВЛ15-9	ВЛ18-1	СЛ1801
ЗЛ1902	ВЛ18-3	ВЛ1901	ЮЛ15-1
СЛ1513	СЛ1506	ВЛ1902	
СЛ15-02	СЛ18-2	ЗЛ1501	
СЛ1510	СЛ18-3	ЗЛ1503	
СЛ1901(оз.)	СЛ18-6	ЗЛ1505-2	
ЮЛ15-2	СЛ1901(руч.)	ЗЛ1901	
ЮЛ15-5	ЮЛ15-6	ЗЛ1905	
		СЛ1511	
		СЛ1607	
		ЮЛ15-3	
		ЮЛ17-4	

Основываясь на результатах факторного анализа можно сделать вывод, что наибольшая степень переработки материала характерна для шлиховых проб станций кластера С. Пробы станций, отнесенных к этому кластеру, имеют высокое процентное содержание стойких к истиранию минералов, малую крупностью и высокую окатанность частиц. Пробы станции из кластера А имеют схожие характеристики (за исключением меньшей степени окатанности). Можно сделать вывод о невысокой степени переработки материала шлиховых проб кластеров В и особенно D. Отложения станций, входящих в кластер D, подверглись незначительной переработке, и, следовательно, находятся в непосредственной близости от источника поступления обломочного материала в береговую зону.

Итак, по характеристикам вещественного состава, крупности и окатанности шлихи распределяются по 4-м кластерам, каждый из которых связан с относительной дальностью переноса тяжелой фракции из данного шлиха.

При этом кластер D связан с наименьшей дальностью переноса, В — с несколько большей дальностью переноса, А — с довольно большой дальностью переноса, С — с максимальной дальностью переноса.

Необходимо отметить, что кластеры С и А достаточно однородны, а диапазон характеристик станций кластеров В и D весьма значителен.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты изучения минералогического состава, крупности и окатанности частиц тяжелой фракции (включая результаты статистического анализа) прибрежных отложений Ладожского озера указывают на весьма высокую вероятность существования долговременного вдольберегового переноса этих отложений, направленного по часовой стрелке. Распространение кластеров тяжелой фракции береговых отложений Ладожского озера показывает следующее (рис. 4).

1. Максимальное количество шлихов с малыми дальностями переноса (кластеры D и В) тяготеет к северным берегам озера, что и не удивительно, т.к. основными источниками обломочного материала в озере являются коренные берега в его северной части. Единичные случаи расположения шлихов кластера D в других частях береговой зоны явно связаны с локальными источниками сноса, представляющими собой моренные гряды, выступающие над поверхностью воды — в районе мыса Стороженский (станция ЮЛ 15-1), в бухте Петрокрепость (станция ЮЛ 15-6), и на восточном берегу озера (станция ВЛ 15-04). Разумеется, реальное количество локальных источников сноса на берегах Ладоги должно быть значительно больше, но существующие данные пока указывают на эти три.

2. Шлихи с максимальными дальностями переноса (кластеры А и С) более или менее равномерно распределены по всем берегам озера. Это может указывать на существование как а) собственно дальнего переноса от источников сноса в северной части озера в сторону южной его части, так и б) столь же длительного, но по фактическому расстоянию недалекого переноса, вызванного сложной системой долгоживущих придонных течений у фиардово-шхерных северных берегов, имеющих высокую степень изрезанности.

Некоторое тяготение шлихов кластера С к западному берегу южнее Приозерска может быть вызвано подпиткой тяжелой фракции переносом с востока на запад по локальной линии берегового переноса от многочисленных источников обломочного материала на северном побережье озера.

Динамика кластеров на отдельных участках берега, связанных с локальными источниками сноса, выявляет следующие местные тенденции переноса тяжелой фракции.

1. От мыса Стороженского (станция ЮЛ 15-1, ближайший перенос) на ЮЗ прослеживается последовательная цепочка с увеличением дальности переноса: от кластера D

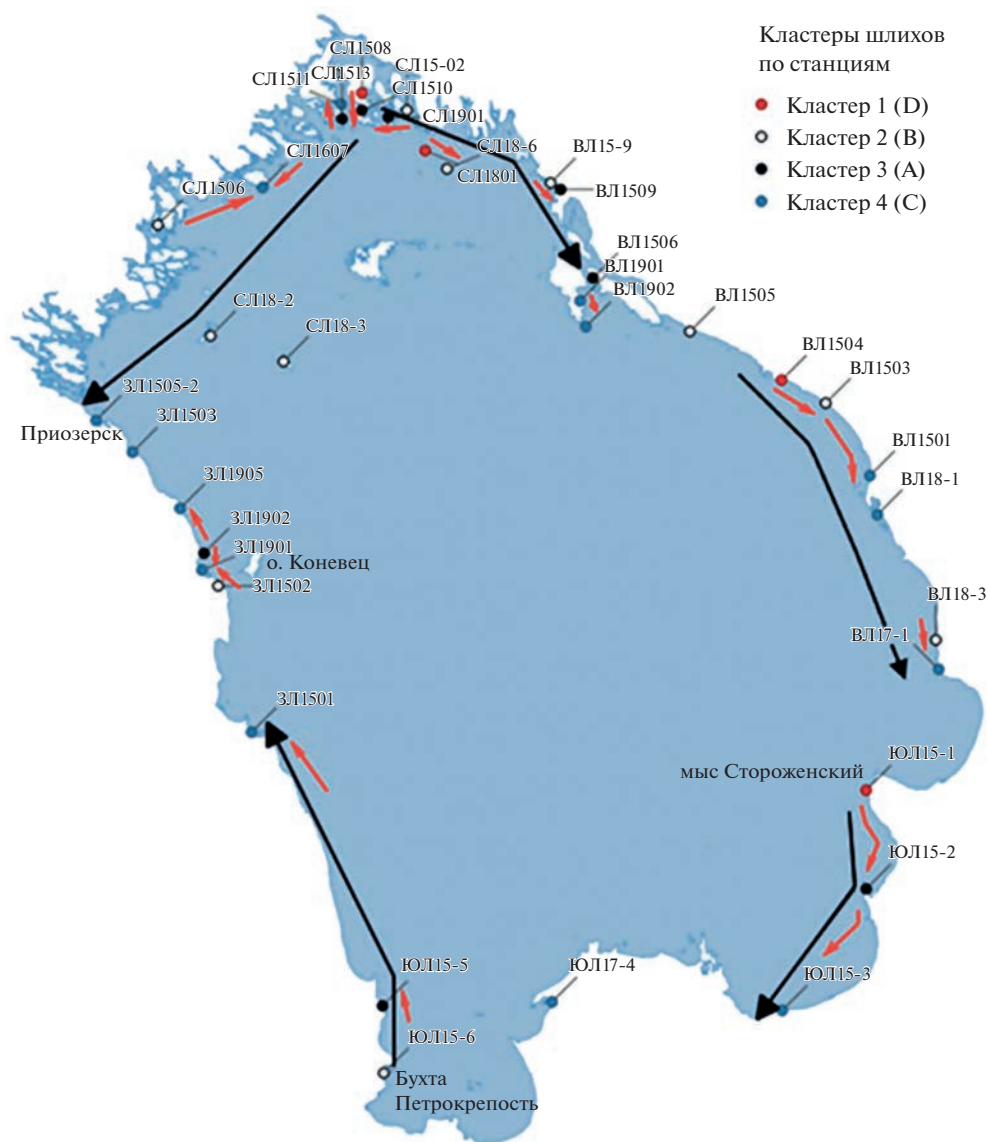


Рис. 4. Тенденции переноса тяжелой фракции вдоль берегов Ладожского озера. Красные стрелки – на основании результатов минералогического и гранулометрического анализа шлихов, черные стрелки – на основании результатов кластерного анализа.

Fig. 4. Trends in heavy fraction transport along the shores of Lake Ladoga. Red arrows – those based on the results of mineralogical and grain size analysis of concentrates, black arrows – based on the results of cluster analysis.

на самом мысу к кластеру А на станции ЮЛ 15-2 и далее к кластеру С на станциях ЮЛ 15-3 и ЮЛ 17-4. Все сказанное указывает на тенденцию к переносу тяжелой фракции вдоль берега на ЮЗ вплоть до восточного берега бухты Петрокрепость.

2. Далее, на западном берегу бухты Петрокрепость, имеются 2 станции, показывающие тенденцию к увеличению дальности переноса тяжелой фракции с юга на север — ЮЛ 15-6, кластер В и ЮЛ 15-5, кластер А. Следующая ЗЛ 1501 продолжает эту тенденцию своей принадлежностью к кластеру С. Далее вплоть до Приозерска (станция ЗЛ 1505-2) имеем группу станций с максимальным переносом, но у о. Коневец две близко расположенные станции ЗЛ 1901 и ЗЛ 1902 дают нам ту же последовательность увеличения дальности переноса с юга на север от локального источника сноса. Суммируя изложенное, авторы сочли себя вправе признать существование тенденции к увеличению дальности переноса тяжелой фракции на север вдоль всего западного берега Ладожского озера с наложением прямого переноса от главного северного источника обломочного материала через глубоководную часть к северному участку западного берега.

3. Северное побережье Ладоги очень сильно изрезано, что характерно для фиардово-шхерных берегов. Состав шлихов говорит о разных направлениях берегового переноса. Отмечается преобладание кластеров ближнего переноса — D и особенно В. Присутствующие в подчиненном количестве кластеры А и С могут указывать на устойчивую хаотичность придонных течений в условиях сильной изрезанности берегов.

4. На восточном берегу Ладожского озера имеется несколько групп близко расположенных станций (ВЛ 15-9—ВЛ 1509; ВЛ 1504—ВЛ 1503—ВЛ 1501; ВЛ 18-3—ВЛ 17-1), распределение тяжелой фракции в которых дает основание предполагать тенденцию к переносу донных отложений с СЗ на ЮВ вдоль всего восточного берега.

5. Данные кластерного анализа дают основания предполагать наличие устойчивого переноса обломочного материала вдоль всего северного побережья на восток и на запад (рис. 4). Эти данные указывают также на последовательную смену кластеров (от наименьшей степени переработки материала к наибольшей) вдоль восточного берега с севера на юг и юго-восточного с востока на юго-запад. Также последовательная смена кластеров происходит на западном берегу — с юга на север.

Таким образом, на всех 4-х участках побережья Ладожского озера обнаружены вероятные тенденции к устойчивому переносу тяжелой фракции донных отложений в определенном направлении: на южном берегу — на запад, на западном — на север, на северном — на восток и на восточном — на юго-восток.

Вместе расположение этих цепочек показывает общую тенденцию к вдольбереговому устойчивому переносу донных отложений по часовой стрелке.

Направления течений в Ладожском озере изучаются много десятилетий, в частности, специалистами института Озероведения РАН. В результате этих исследований вырисовывается весьма сложная картина динамики перемещения водных масс в озере [9, 10]. Направления и скорости течений зависят от направления ветров, течений впадающих в озеро рек, плотности воды, рельефа дна и других факторов. В соответствии с этим выделяются несколько разновидностей течений в Ладожском озере: ветровые, инерциальные, циклонические. В основном направления и скорости течений меняются в зависимости от сезона [10].

Обнаруженная авторами тенденция к вдольбереговому устойчивому переносу донных отложений Ладоги по часовой стрелке разумеется есть лишь одно из многочисленных литодинамических следствий весьма сложного комплекса гидродинамических процессов, происходящих в Ладожском озере.

В мировой практике шливовой метод применялся и применяется для поисков россыпных месторождений [17]. Однако для литодинамических исследований он применялся крайне мало. А вот статистические методы довольно широко используются в исследованиях пространственного распределения тех или иных геологических параметров. В частности, кластерный анализ используется для поиска месторождений полезных ископаемых, геохимических аномалий [14–16], для оценки воздействия на состояние окружающей среды. Так что использование кластерного и факторного анализа для выделения групп донных отложений по составу тяжелой фракции не представляет из себя что-то необычное.

При интерпретации результатов анализа распространения тяжелой фракции необходимо помнить, что условия отбора шлиховых проб отличаются друг от друга по геоморфологическим, лито- и гидродинамическим характеристикам. Это вносит некото-

рый элемент неопределенности во все сделанные выводы. Эту неопределенность можно существенно снизить в дальнейшем увеличением количества проб, отбираемых как можно более равномерно по всем берегам озера.

Насколько известно авторам, шлиховой метод, широко используемый для поисков россыпных месторождений, мало применяется для литодинамических построений в замкнутых водоемах. Полученный и представленный в настоящей статье значимый результат может инициировать дальнейшее применение этого метода для широкого спектра исследований литодинамических процессов. Использование статистического анализа для более качественной интерпретации результатов изучения тяжелой фракции также представляется перспективным направлением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Распространение тяжелой фракции рыхлых прибрежных отложений Ладожского озера по ряду признаков (минеральный состав, крупность и окатанность) показывает долговременные тенденции перемещения береговых отложений.

Выделенные методами кластерного анализа 4 класса шлихов показывают различные степени дальности переноса частиц прибрежных отложений (по их степени переработки), что подтверждается результатами факторного анализа.

Обнаруженные частные тенденции направленности долговременного вдольберегового переноса на локальных участках берега в сумме показывают общую тенденцию к перемещению отложений вдоль берегов Ладоги по часовой стрелке.

Эта же тенденция была обнаружена ранее авторами на основе изучения шлихов на 18-ти прибрежных станциях Ладожского озера, и так же была подтверждена результатами кластерного и факторного анализа.

Для более уверенного утверждения о существовании долговременного переноса осадков вдоль берегов Ладожского озера необходимо продолжать наращивать количество шлиховых опробований с более равномерным их распределением по линии берега.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Гостемы ИНОЗ РАН № 0154-2019-0001 “Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов” № госрегистрации АААА-А19-119031890106-5, а также Гостемы СПбНЦ РАН 82.1 ФНИ “Разработка теории трансформации научно-инновационного пространства Санкт-Петербурга в контексте развития российской экономики с учетом теоретико-методологических основ устойчивого технологического развития региона на основе инновационно-инвестиционной деятельности и воспроизводства и формирования научно-образовательного потенциала Санкт-Петербурга”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амантов А.В., Амантова М.Г. Развитие котловины Ладожского озера с позиций ледниковой теории // Региональная геология и металлогения. № 59. 2014. С. 5–14.
2. Анохин В.М., Науменко М.А., Субетто Д.А., Нестеров Н.А., Рыбакин В.Н. Особенности геоморфологического строения дна Ладожского озера // География: развитие науки и образования. Коллективная монография по материалам Международной научно-практической конференции LXXI Герценовские чтения. Т. 1. Санкт-Петербург, 2018. С. 442–448.
3. Анохин В.М., Томилин В.И., Батанов Ф.И., Дудакова Д.С., Уличев В.И. Особенности распространения тяжелой фракции в береговых отложениях Ладожского озера // География: развитие науки и образования. Коллективная монография по материалам Международной научно-практической конференции LXXI Герценовские чтения. Т. 1. Санкт-Петербург, 2018. С. 448–453.
4. Анохин В.М., Дудакова Д.С., Дудаков М.О. Геоморфология и типизация берегов Ладожского озера по данным съемки беспилотного летательного аппарата // Геоморфология. 2019. № 1. С. 25–38.

5. Анохин В.М., Дудакова Д.С., Дудаков М.О., Рыбакин В.Н. Результаты геолого-геоморфологических исследований дна и берегов Ладожского озера в 2015–2019 гг. // Материалы Международной конференции (Школы) морской геологии. М.: ИОРАН, 2019.
6. Анохин В.М., Дудакова Д.С. Распространение песков тяжелой фракции в прибрежных отложениях Ладожского озера // Озера Евразии: проблемы и пути их решения Материалы 2-й международной конференции 19–24 мая 2019. Часть 1. Казань, 2019. С. 224–229.
7. Бакулина Л.П. Шлиховое опробование и анализ шлиховых проб: учеб. Пособие / Л.П. Бакулина. 2-е изд., перераб. Ухта : УГТУ, 2014. 126 с.
8. Геоэкология Ладожского озера / Ред. В.Л. Иванов, В.И. Гуревич. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1995. 209 с.
9. Ладога / Ред. В.А. Румянцев, С.А. Кондратьев. СПб.: Нестор-История, 2013. 468 с.
10. Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас / В.А. Румянцев, А.И. Соколин, Н.А. Нестеров. СПб.: Нестор-История, 2015. 199 с.
11. Пятков И.М., Анохин В.М. Использование методов кластерного анализа для изучения закономерностей распространения тяжелой фракции в отложениях береговой зоны Ладожского озера. География: развитие науки и образования. Сборник статей по материалам Международной научно-практической конференции LXXIV Герценовские чтения. Т. 1. Санкт-Петербург, 2021. С. 148–153.
12. Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / Ред. С.А. Кондратьев, Ш.Р. Поздняков, В.А. Румянцев. М., 2021. 637 с.
13. Anokhin V., Dudakova D., Dudakov M., Rybakin V., Naumenko M., Ulitchev V. The results of geological and geomorphological studies of the bottom and shores of Lake Ladoga 2015–18 years // Geophysical Research Abstracts Vol. 21, EGU 2019-2198-1, 2019 EGU General Assembly 2019 © Author(s) 2018. CC Attribution 4.0 license.
14. Hystad G., Downs, R.T., Edward E.S., Hazen R.M. Statistical analysis of mineral diversity and distribution: Earth's mineralogy is unique. Earth and Planetary Science Letters. 2015. V. 426. P. 154–157.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.06.028>
15. Joaquín A. Cortés, Palma José Luis, Wilson Marjorie. Deciphering magma mixing: The application of cluster analysis to the mineral chemistry of crystal populations // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2007. V. 165. Iss. 3–4. 163–188.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.05.018>
16. Rocha F., Vidinha J.M., Sa Caetano P., Gomes C. Statistical analysis of mineralogical parameters used as lithostratigraphic markers. . 2000. V. 44. P. 141–144.
17. Placer Gold Mining Methods URL: <https://www.911metallurgist.com/blog/placer-gold-mining-methods> (дата обращения 08.09.2022).

Longshore Sediment Transport in Lake Ladoga Based on Analyses of the Heavy Mineral Fraction of Sand in Coastal Sediments

V. M. Anokhin¹ *, O. M. Vinogradova¹ **, I. M. Pyatov² ***, and D. S. Dudakova¹ ****

¹*Institute of Lake Science of the Russian Academy of Sciences is a separate structural subdivision of the Federal State Budgetary Institution of Science “St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences”, St. Petersburg, Russia*

²*Herzen Russian State Pedagogical University, St. Petersburg, Russia*

*E-mail: vladanokhin@yandex.ru

**E-mail: vinrozy@yandex.ru

***E-mail: vvvvv1a@mail.ru

****E-mail: judina-d@yandex.ru

Abstract—In order to identify the directions of transport of coastal sediments of Lake Ladoga, heavy mineral fraction was extracted from sand samples collected on all types of its shores. The mineral composition, size and roundness of particles — features characterising the degree of reworking of coastal sediments — were assessed under a microscopic analysis. We identified 4 clusters with similar degrees of reworking of the source material, which, based on the results of the factor analysis, were ranked by relative transport distance from insignificant to very significant. The maximum number of samples with small transport distances was found on the northern shores of the lake, which can be explained by the location

of bedrock shores – the main sources of clastic material in the lake. Samples with maximum transport distances are relatively evenly distributed along all shores of the lake. The analysis of the results showed that on all shore reaches there is a transport of heavy fraction of bottom sediments in a certain direction: on the southern shore – to the west, on the western shore – to the north, on the northern shore – to the east and on the eastern shore – to the south-east. This allows us to conclude that there is a long-term trend of coastal sediment transport along the shores of Lake Ladoga in a clockwise direction.

Keywords: coastal zone, Lake Ladoga, coastal sediments, heavy fraction, cluster analysis, factor analysis, transport direction

REFERENCES

1. Amantov A.V., Amantova M.G. Razvitie kotloviny Ladozhskogo ozera s pozicij lednikovoj teorii // Regional'naja geologija i metallogeniya. № 59. 2014. S. 5–14.
2. Anohin V.M., Naumenko M.A., Subetto D.A., Nesterov N.A., Rybakin V.N. Osobennosti geomorfologicheskogo stroenija dna Ladozhskogo ozera // Geografija: razvitie nauki i obrazovanija. Kollektivnaja monografija po materialam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii LXXI Gercenovskie chtenija. T. 1. Sankt-Peterburg, 2018. S. 442–448.
3. Anohin V.M., Tomilin V.I., Batanov F.I., Dudakova D.S., Ulichev V.I. Osobennosti rasprostraneniya tjazheloj frakcii v beregovyh otlozhenijah Ladozhskogo ozera // Geografija: razvitie nauki i obrazovanija. Kollektivnaja monografija po materialam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii LXXI Gercenovskie chtenija. T. 1. Sankt-Peterburg, 2018. S. 448–453.
4. Anohin V.M., Dudakova D.S., Dudakov M.O. Geomorfologija i tipizacija beregov Ladozhskogo ozera po dannym s#emki bespilotnogo letatel'nogo apparata // Geomorfologija. 2019. № 1. S. 25–38.
5. Anohin V.M., Dudakova D.S., Dudakov M.O., Rybakin V.N. Rezul'taty geologo-geomorfologicheskikh issledovanij dna i beregov Ladozhskogo ozera v 2015–2019 gg. // Materialy Mezhdunarodnoj konferencii (Shkoly) morskoy geologii. M., IORAN, 2019.
6. Anohin V.M., Dudakova D.S. Rasprostranenie peskov tjazheloj frakcii v pribrezhnyh otlozhenijah Ladozhskogo ozera // Ozera Evrazii: problemy i puti ih reshenija Materialy 2-j mezhdunarodnoj konferencii 19–24 maja 2019. Chast' 1. Kazan', 2019. S. 224–229.
7. Bakulina L.P. Shlihovoe oprobovanie i analiz shlihovyh prob: ucheb. Posobie / L.P. Bakulina. 2-e izd., pererab. Uhta: UGTU, 2014. 126 s.
8. Geojekologija Ladozhskogo ozera / Red. V.L. Ivanov, V.I. Gurevich. SPb.: VNIIOkeangeologija, 1995. 209 s.
9. Ladoga / Red. V.A. Rumjancev, S.A. Kondrat'ev. SPb.: Nestor-Istorija, 2013. 468 s.
10. Ladozhskoe ozero i dostoprimechatel'nosti ego poberezh'ja. Atlas / V.A. Rumjancev, A.I. Sorokin, N.A. Nesterov. SPb.: Nestor-Istorija, 2015. 199 s.
11. Pjatov I.M., Anohin V.M. Ispol'zovanie metodov klasternogo analiza dlja izuchenija zakonomenostej rasprostraneniya tjazheloj frakcii v otlozhenij beregovoj zony Ladozhskogo ozera. Geografija: razvitie nauki i obrazovanija. Sbornik statej po materialam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii LXXIV Gercenovskie chtenija. T. 1. Sankt-Peterburg, 2021. S. 148–153.
12. Sovremennoe sostojanie i problemy antropogennoj transformacii jekosistemy Ladozhskogo ozera v uslovijah izmenijushhegosja klimata / Red. S.A. Kondrat'ev, Sh.R. Pozdnjakov, V.A. Rumjancev. M.: 2021. 637 s.
13. Anokhin V., Dudakova Dina., Dudakov M., Rybakin V., Naumenko M., Ulitchev V. The results of geological and geomorphological studies of the bottom and shores of Lake Ladoga 2015–2018 years // Geophysical Research Abstracts Vol. 21. EGU 2019-2198-1. 2019 EGU General Assembly 2019 © Author(s) 2018. CC Attribution 4.0 license.
14. Hystad G., Downs, R.T., Edward E.S., Hazen R.M. Statistical analysis of mineral diversity and distribution: Earth's mineralogy is unique. Earth and Planetary Science Letters. 2015. V. 426. P. 154–157.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.06.028>
15. Joaquín A. Cortés, José Luis Palma, Marjorie Wilson. Deciphering magma mixing: The application of cluster analysis to the mineral chemistry of crystal populations // Journal of Volcanology and

Geothermal Research, 2007 Vol. 165, Iss. 3–4. 163–188.

<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.05.018>

16. Rocha F., Vidinha J.M., Sa Caetano P., Gomes C. Statistical analysis of mineralogical parameters used as lithostratigraphic markers. . 2000. V. 44. P. 141–144.
17. Placer Gold Mining Methods URL: <https://www.911metallurgist.com/blog/placer-gold-mining-methods> (data obrashhenija 08.09.2022).

УТОЧНЕНИЕ РЕГИОНАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПОТЕНЦИАЛЬНОГО СМЫВА ПОЧВ ОТ ТАЛЫХ ВОД ДЛЯ СЕВЕРНОЙ ЛЕСОСТЕПИ СРЕДНЕЙ СИБИРИ

© 2023 г. И. А. Голубев^{a, b, *}

^aФилиал ПАО «Россети Сибирь» – «Красноярскэнерго», Красноярск, Россия

^bКрасноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия

*E-mail: igorgol1984@bk.ru

Поступила в редакцию 17.10.2023 г.

После доработки 16.11.2023 г.

Принята к публикации 22.11.2023 г.

Необходимость проверки, модернизации и уточнения существующих моделей расчета потенциального смыва почв от воздействия талых вод обуславливается малым количеством исследований данного вида эрозии в лесостепной зоне Средней Сибири и, как следствие, невозможностью достоверно определить, насколько точны расчетные методики в существующем виде в данных условиях. Для сельскохозяйственной зоны Красноярского края разработана Региональная модель расчета потенциального смыва почв на основе Универсального уравнения и формулы Указаний. В данной работе представлены результаты ее проверки, выполненной с использованием результатов авторских полевых измерений смыва почв от талых вод методом обмера конусов выноса на сельскохозяйственных землях северной лесостепи Средней Сибири (Красноярская лесостепь). Предложен уточненный вариант Региональной методики, адаптированный к местным гидрометеорологическим условиям и представляющий собой формулу данной модели с добавленным корректирующим коэффициентом K , суммарно учитывающим влияние предшествующего осеннего увлажнения почв и интенсивности поступления воды на поверхность почвы в период снеготаяния. Уточнение и адаптация методики позволили в среднем в три раза увеличить точность результатов ее применения по сравнению с исходным видом модели, средняя ошибка уменьшилась с 0.3 до 0.11. Уточненный вариант Региональной методики апробирован в процессе авторских исследований снеготалой эрозии почв в Красноярской лесостепи.

Ключевые слова: смыв, аккумуляция, склоны, талые воды, поверхностный сток, снегонакопление, интенсивность снеготаяния, осеннее увлажнение почв

DOI: 10.31857/S0869607123030060, **EDN:** HPLJEL

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время детально описана география распространения водной эрозии почв и ее закономерности, разработаны методики борьбы со смывом на пахотных угодьях, в том числе и в Сибири [4, 12, 13, 15]. Широко известны расчетные модели талого смыва, такие как методика Государственного гидрологического института, методика, предложенная в методических указаниях по проектированию противоэрозионной организации территории и др. [1, 10, 12, 14, 22].

Однако на территории северной лесостепи Средней Сибири (Красноярская лесостепь) экспериментальных данных о плоскостной эрозии почв очень мало, исследова-

ния производились в основном по овражной эрозии [11, 21]. Расчетные методики применяются редко, систематическое их использование на постоянной основе отсутствует, что не дает возможность сделать однозначный вывод о том, насколько они адаптированы к местным природно-климатическим условиям и точны в определении как среднесуточных значений потенциального смыва, так и величин эрозии на обрабатываемых землях за конкретные годы.

Интенсивность эрозионно-аккумулятивных процессов определяется как особенностями подстилающей поверхности (рельеф, растительность, и почвенный покров, а также хозяйственное использование земель), так и совокупностью воздействия гидрометеорологических факторов. В суровых условиях Приенисейской Сибири важную роль играют группы метеорологических факторов, прямо или опосредованно влияющих на распределение величин смыва и аккумуляции почв на исследуемой территории, а также на варьирование величин снеготалой эрозии по годам. К ним относятся величина и неравномерность распределения снега, глубина промерзания, величина предшествующего увлажнения почв, дружность снеготаяния и местная циркуляция ветра. Учет данных гидрометеорологических факторов в расчетных моделях имеет большое значение для точного определения величин потенциального смыва.

Для обрабатываемых земель Средней Сибири (земледельческая зона Красноярского края) Д.А. Бураковым на основе Универсального уравнения и формулы Указаний была предложена Региональная методика расчета потенциального смыва [3]. Она разрабатывалась с использованием отечественных нормативов, региональных особенностей и рекомендаций определения смываемости почв, эрозионного потенциала талых вод, параметров рельефа (эрозионный потенциал и форма склона). Однако, как и в случае с другими расчетными методиками, регулярного систематического использования предложенной Региональной модели на практике не производилось. В связи с этим, возникает необходимость ее проверки и уточнения.

Целью настоящей работы является уточнение Региональной методики Д.А. Буракова для природно-климатических условий Средней Сибири. Задачами работы являются: анализ эмпирических данных по смыву в районе исследований; расчет величин потенциального смыва почв с помощью Региональной модели Д.А. Буракова; анализ факторов, влияющих на интенсивность снеготалой эрозии; определение величин поправочного коэффициента в формулу Региональной методики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В 2009–2017 гг. проведены полевые исследования величин плоскостного смыва и аккумуляции почв от талых вод на пашне северной лесостепной зоны Средней Сибири (Красноярская лесостепь). Натурные наблюдения выполнялись в северной и центральной части Красноярской лесостепи [5, 7, 8].

Одновременно с этим, выполнен расчет величин потенциального смыва для опытных участков центральной части, на которых выполнялись полевые измерения смыва и аккумуляции почв. Для выполнения вычислений, по крупномасштабным топографическим планам на склонах опытных участков-микроводосборов были выделены 2–3 линии тока талых вод от водораздела до низины склонов (зона аккумуляции наносов). Далее рассчитаны их длина, крутизна, определены форма и экспозиция исследуемых склонов микроводосборов. По данным ближайшей метеорологической станции Сухобузимское, расположенной примерно в 20 км от опытных участков, и на основании авторских снегомерных съемок, были определены величины максимальных снегозапасов и выпавших осадков перед снеготаянием ($S + X$).

Приведем более подробное описание Региональной методики Д.А. Буракова [3]. Отметим, что данная модель была предложена до выполнения авторских полевых измерений эрозии почв. Уравнение методики имеет следующий вид:

Таблица 1. Рекомендации по определению величин смываемости почвы (П) [14]
Table 1. Recommendations for determining the values of soil washability (П) [14]

Эрозионный потенциал талых вод K_m	Смываемость почвы (П)
5	0.02
10	0.04
15	0.06
20	0.09
25	0.10
30	0.11
40	0.12
50	0.125
60	0.13
70	0.135
80	0.14
90	0.145
100	0.15
110	0.15
120	0.15

$$\Theta_m = 4K_m \Pi \Pi_0 P F, \quad (1)$$

где Θ_m — потенциальный смыв от талых вод, т/га в год; K_m — эрозионный потенциал (индекс) талых вод; Π — величина смываемости для стандартной почвы (чернозем выщелоченный, развитый на лессовидных суглинках и лессах, сильно эродированный), Π_0 — коэффициент относительной смываемости почв, P — эрозионный потенциал рельефа; F — коэффициент формы склона.

Эрозионный индекс K_m определяется следующим образом:

$$K_m = S a, \quad (2)$$

где S — максимальный запас воды в снеге, мм; a — интенсивность снеготаяния в часы пик. Данная величина приблизительно оценивается в диапазоне 0.20–0.30 мм/мин. В лесных районах, центральной и северной лесостепи величина a принимается равной 0.20 мм/мин, в южных лесостепных районах — 0.25 мм/мин [3]. Величины снегозапаса различной вероятности превышения (обеспеченность 1, 25, 50%) можно определять по данным ближайших гидрометеорологических станций. В процессе исследований в Красноярской лесостепи использовались данные ближайшей метеостанции Сухобузимское и авторских снегомерных съемок [8].

Величина Π определяется согласно Методическим указаниям [14]. Она представляет собой отношение среднего многолетнего смыва в условиях чистого пара к эрозионному индексу талых вод и определяется для условий стандартной почвы — чернозема выщелоченного на лессах и лессовидных суглинках. Определение величины Π производится зависимости от интенсивности снеготаяния (табл. 1).

Кроме того, для определения величины Π может быть использована формула, выведенная Д.А. Бураковым [3] на основе табл. 1:

$$\Pi = 0.043 \ln(K_m) - 0.0472. \quad (3)$$

Коэффициент относительной смываемости почв Π_0 зависит от типа и подтипа почв, механического состава, содержания гумуса и степени смытости. Информацию,

необходимую для определения P_0 , можно найти в почвенных очерках; кроме того, в Методических указаниях приведена таблица для определения данного показателя [14]. Для почвы-эталоны, за который принимается сильно эродированный выщелоченный чернозем на лессах и лессовидных суглинках, занятый чистым паром, P_0 принимается равным 1.0 [3, 14].

Расчет эрозионного потенциала рельефа P производится в соответствии с Методическими указаниями, формула имеет следующий вид:

$$P = \left(\frac{L}{25}\right)^m \left[n^{1+m} - (n-1)^{1+m}\right] \left(\frac{i_n}{10}\right)^{1.45}, \quad (4)$$

где P – эрозионный потенциал рельефа, L – длина отрезка на линии, принимаемый 100 м; n – количество отрезков; i_n – уклон последнего отрезка, %, m – параметр. Для стандартной площадки шириной 25 м и длиной 100 м приведенная формула дает величину $P = 1.0$.

Для данной формулы принимаются значения параметра m , предложенные американскими исследователями Уишмайером и Смитом [3, 12, 22]:

- $m = 0.5$ при крутизне склона $\geq 5\%$;
- $m = 0.4$ при крутизне склона < 5 и $\geq 3.5\%$;
- $m = 0.3$ при крутизне склона < 3.5 и $\geq 1\%$;
- $m = 0.2$ при крутизне склона $< 1\%$.

Коэффициент F , учитывающий форму склона, определяется по следующей формуле:

$$F = 1.0 + 0.3 \ln \left(\frac{i_j}{i_{j-1}} \right), \quad (5)$$

где i_j и i_{j-1} означают уклоны j -го и $(j-1)$ -го участков данного склона, %.

В уравнении Региональной модели также присутствует коэффициент соответствия, равный 4. Он учитывает различные соотношения между параметрами в формулах Указаний и Универсальном уравнении, на которых, как было указано выше, основана Региональная методика.

Для определения величин отклонения расчетных величин смыва от измеренных, которые принимаем за истинные значения, были рассчитаны значения средних ошибок (ME) по формуле:

$$ME = \frac{\sum_{i=0}^n (\Theta_{\text{факт.}i} - \Theta_{\text{расч.}i})}{n}, \quad (6)$$

где $\Theta_{\text{факт.}i}$ – фактические величины смыва, за которые приняты данные, полученные в результате полевых наблюдений; $\Theta_{\text{расч.}i}$ – величины потенциального смыва, полученные с помощью расчетных методик; n – количество вычисленных значений.

После выполненных измерений и расчетов, произведено сопоставление полученных величин потенциального смыва почв с использованием Региональной модели Д.А. Буракова с результатами непосредственных полевых измерений смыва от воздействия талых вод, полученных методом обмера конусов выноса [5, 8] (табл. 2).

По данным табл. 2 видно, что величины потенциального смыва, полученные с помощью Региональной модели, существенно ниже измеренных величин, которые принимаем за истинные значения. Закономерно, что наибольшая разница зафиксирована на тех участках пашни, где обработка выполнялась вдоль склона. Это происходит вследствие резкого увеличения реальных значений эрозии в данных условиях.

Таблица 2. Потенциальный и измеренный смыв на опытных микроводосборах пашни центральной части Красноярской лесостепи, 2009–2011 г.**Table 2.** Potential and measured flushing on experimental micro-catchments of arable land in the central part of the Krasnoyarsk forest-steppe, 2009–2011

№ участков	№ линий тока	2009 г.			2010 г.			2011 г.		
		Потенциальный смыв Эр, мм	Величина смыва по конусам выноса, мм	Направление обработки почв	Потенциальный смыв Эр, мм	Величина смыва по конусам выноса, мм	Направление обработки почв	Потенциальный смыв Эр, мм	Величина смыва по конусам выноса, мм	Направление обработки почв
1	1	0.1	2.5	Вдоль склона	0.13	0.1	Поперек склона	0.09	0.7	Поперек склона
	2	0.03			0.04			0.03		
2	1	0.2	0.5	Поперек склона	0.25	—	—	0.17	5.5	Вдоль склона
	2	0.12			0.15			0.1		
3	1	0.31	6.1	Вдоль склона	0.39	3.2	Вдоль склона	0.26	4.2	Вдоль склона
	2	0.29			0.36			0.25		
	3	0.08			0.1			0.07		
4	1	0.18	3.2	Вдоль склона	0.22	3.0	Вдоль склона	0.15	2.9	Вдоль склона
	2	0.39			0.48			0.33		
5	1	0.07	0.3	Поперек склона	0.08	—	—	0.06	—	—
	2	0.13			0.16			0.11		
6	1	0.11	0.4	Поперек склона	0.13	—	—	0.09	1.2	Поперек склона
	2	0.14			0.17			0.12		
	3	0.14			0.17			0.11		

Был произведен анализ полученных величин смыва в результате применения Региональной расчетной методики. Как было указано выше, данная модель учитывает следующие параметры:

- параметры, характеризующие рельеф и состояние подстилающей поверхности: тип, механический состав почв и степень их смытости, а также форма, длина и крутизна склонов;
- параметры, характеризующие влияние гидрометеорологических факторов: запас воды в снеге и максимальную интенсивность снеготаяния в часы пик.

Авторскими исследованиями установлено, что помимо вышеуказанных факторов, на интенсивность эрозии от талых вод в районе исследований заметное влияние оказывает величина предшествующего осеннего увлажнения почв (рис. 1), определяющая степень закупорки почвенных пор частицами льда (льдищность) и, соответственно, водопроницаемость грунтов и потерь талого стока на впитывание; а также количество поступающей воды на поверхность почвы при снеготаянии [6, 9, 18]. Значение коэффициента корреляции r величин среднего смыва и осеннего увлажнения (для центральной и северной части Красноярской лесостепи) составляет 0.58.

Из вышеприведенных данных и структуры расчетной формулы Региональной методики видно, что данная модель не учитывает влияние величин осеннего увлажнения и поступления воды на поверхность почвы. Это подтверждается сравнением динамики

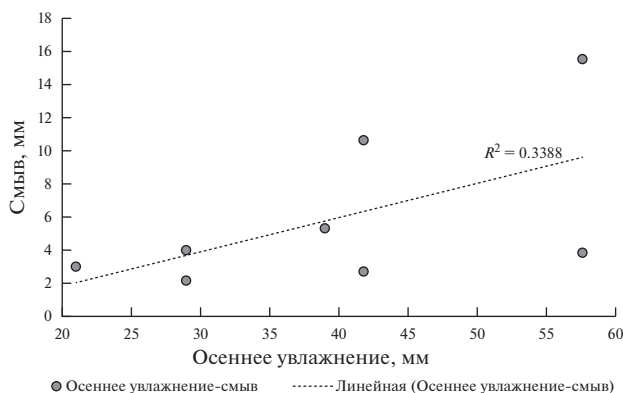


Рис. 1. График связи показателя осеннего увлажнения и смыва почв (Красноярская лесостепь, 2009–2011, 2013, 2017 гг.).

Fig. 1. Graph of the relationship between the indicator of autumn moisture and soil flushing (Krasnoyarsk forest-steppe, 2009–2011, 2013, 2017).

количественных характеристик гидрометеорологических факторов с расчетными величинами смыва по годам (табл. 3).

По данным табл. 3 заметно, что вычисленные значения потенциального смыва коррелируют с учетными параметрами (снегозапас и осадки), но с осенним увлажнением и интенсивностью поступления воды корреляция отсутствует. Расчет потенциаль-

Таблица 3. Потенциальный смыв почв и гидрометеорологические данные, центральная часть Красноярской лесостепи

Table 3. Potential soil washout and hydrometeorological data, central part of the Krasnoyarsk forest-steppe

№ участка 2009 год	Средний потенциалный смыв Эр, мм*	Среднее суточное поступление воды на поверхность почвы, мм	Средний запас воды в снеге и осадки ($S + X$), мм (ст. Сухобузимское)	Слой поверхностного стока весеннего половодья (Y) р. Бузим–с. Ма- линовка, мм	Расчетный показатель предшествующего осеннего увлажнения, мм
2009 год					
1	0.07	12.3	123.40	37.50	57.60
3	0.23				
4	0.29				
2010 год					
1	0.09	4.6	154.90	64.10	28.90
3	0.28				
4	0.35				
2011 год					
1	0.06	7.6	105.30	32.10	41.80
3	0.19				
4	0.24				

* Приведены средние величины для каждого участка

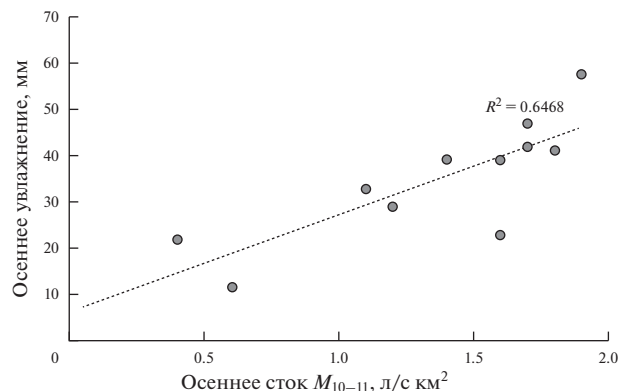


Рис. 2. График связи осеннего стока р. Бузим и расчетного показателя осеннего увлажнения почв (Красноярская лесостепь, 1999–2018 гг.).

Fig. 2. Graph of the relationship between the autumn runoff of the Buzim River and the calculated indicator of autumn soil moisture (Krasnoyarsk forest-steppe, 1999–2018).

ного смыва по Региональной методике для Красноярской лесостепи дает результаты, наиболее близкие к измеренным величинам в годы с низким предшествующим осенним увлажнением почв (2010 г.), что также подтверждает значение данного показателя и необходимость его учета в рассматриваемой модели.

В процессе исследований определены величины модуля осеннего стока суммарно за октябрь–ноябрь (M_{10+11}) ближайшей к опытным участкам реки Бузим (гидрологический пост в с. Малиновка). Для этих целей использованы данные по среднемесячным расходам воды за период 1999–2018 гг. Выполнен анализ и сопоставление полученных величин M_{10+11} с расчетным показателем осеннего увлажнения почв за период 1999–2018 гг. В результате выявлена прямая линейная зависимость между данными характеристиками: с возрастанием осеннего стока увеличивается показатель осеннего увлажнения (рис. 2). Установлена высокая степень корреляции между ними, $r = 0.87$. Следует отметить, что опытные участки в центральной части Красноярской лесостепи полностью располагаются в пределах водосбора р. Бузим, что также объясняет столь тесную корреляцию.

Следует отметить, что для корректной оценки влияния гидрометеорологических характеристик на величины смыва, анализ данных производился только для пахотных участков без нарушений условий агротехники (обработка поперек склона). Кроме того, для этих целей выбраны годы наблюдений с минимальными и максимальными значениями предшествующего осеннего увлажнения, наиболее близкими условиями снегонакопления (2009 и 2010 гг.). С помощью коэффициентов агрофона для микроводосборов пашни, занятых стерней и озимыми, измеренные значения смыва были приведены к величинам смыва в условиях чистого пара. Данные действия связаны с необходимостью минимизировать влияние сторонних факторов [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ УТОЧНЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

Для получения близких к измеренным расчетных величин смыва при использовании Региональной методики, предлагается произвести ее уточнение путем добавления корректирующего коэффициента (сомножителя K), который суммарно учитывает влияние интенсивности поступления воды и предшествующего осеннего увлажнения

Таблица 4. Определение приблизительных значений сомножителя K
Table 4. Determination of approximate values of the K factor

№ участ- тков	№ линии стока	Эр		Средний потенциальный смыв ($\Theta_{\text{ср}}$), мм		Измеренный смысв учетом агрофона ($\Theta_{\text{изм}}$), мм		$\Delta\Theta = \Theta_{\text{изм}}/\Theta_{\text{ср}}$		Корректирующий сомножитель K ($\Delta\Theta_{\text{средн}}$)	
		2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
1	1	—	0.13	—	0.09	—	0.2	—	2.4	3.1	2.4
	2	—	0.04	—	—	—	—	—	—		
2	1	0.20	—	0.16	—	0.5	—	3.1	—	3.1	2.4
	2	0.12	—	—	—	—	—	—	—		
5	1	0.07	—	0.1	—	0.3	—	3.0	—	3.1	2.4
	2	0.13	—	—	—	—	—	—	—		
6	1	0.11	—	0.13	—	0.4	—	3.1	—	3.1	2.4
	2	0.14	—	—	—	—	—	—	—		
	3	0.14	—	—	—	—	—	—	—		

почв. С помощью вышеперечисленных мероприятий по отбору и коррекции данных, направленных на минимизацию влияния сторонних факторов, расчет коэффициента выполнен для максимально близких гидрометеорологических условий ($S + X$) и одинакового состояния подстилающей поверхности (табл. 4). Основным влияющим фактором остается осеннее увлажнение почв.

Из табл. 4 видно, что приблизительные (первоначальные) значения K составляют в годы с высоким осенним увлажнением 3.1, низким — 2.4. Соответственно, в годы со средними значениями данного фактора $K = 2.8$. Таким образом, с учетом предлагаемого коэффициента Региональная модель Д.А. Буракова приобретает следующий вид:

$$\Theta_m = 4K_m \Pi \Pi_0 PFK, \quad (7)$$

где K — коэффициент, суммарно учитывающий влияние предшествующего осеннего увлажнения почв и величину поступления воды из снежного покрова в период снеготаяния, остальные значения прежние, в соответствии с формулой (1). Значения коэффициента K предлагается определять исходя из следующих диапазонов величин осеннего увлажнения почв: $K = 2.4$ при величине увлажнения до 30 мм; $K = 2.8$ при осеннем увлажнении от 30 до 45 мм; $K = 3.1$ при величине осеннего увлажнения свыше 45 мм [8].

Предложенное уточнение данной модели, основанное на результатах непосредственных натурных наблюдений за эрозионно-аккумулятивными процессами, анализе влияния факторов подстилающей поверхности и гидрометеорологических характеристик позволяет получить расчетные величины смыва почв от талых вод, близкие к измеренным (табл. 5).

Расчет величин предшествующего осеннего увлажнения почв [2, 16, 17], определяющих значения K в Региональной методике, сопряжен с некоторыми трудностями, связанными со значительными временными и трудозатратами. С целью оптимизации и упрощения процесса определения значений K , предлагается внести изменения в алгоритм его определения. Они заключаются в следующем.

Выявленная высокая степень корреляции осеннего стока и расчетного показателя осеннего увлажнения дает возможность определять значения коэффициента K , заменив для этого показатель осеннего увлажнения на величину модуля осеннего стока ближайших рек. Таким образом, с учетом данных изменений, для района авторских исследований K представляется возможным определять исходя из следующих градиций осеннего стока M_{10+11} :

Таблица 5. Сравнение результатов применения Региональной методики (до и после уточнения). Центральная часть Красноярской лесостепи, 2009–2011 гг.

Table 5. Comparison of the results of the Regional Methodology application (before and after clarification). The central part of the Krasnoyarsk forest-steppe, 2009–2011

Год	S , мм	X , мм	K_m	Π	Π_0	m	P	$\mathcal{E}_p$ (без учета K), мм	K	$\mathcal{E}_p$ (с учетом K), мм	Измеренный смыв $\mathcal{E}_{изм}$, мм	ME (без учета K)	ME (с учетом K)
Участок 6, линия 1													
2009	91	7.3	22.8	0.087	0.8	0.3	0.211	0.13	3.1	0.42	0.4	0.3	0.11
Участок 1, линия 2													
2010	100.8	17.9	25.2	0.092	0.8	0.3	0.061	0.05	2.4	0.11	0.1	0.3	0.11
Участок 1, линия 1													
2011	81.6	17.2	20.4	0.082	0.8	0.3	0.202	0.11	3.1	0.34	0.7	0.3	0.11

- $K = 2.4$ при M_{10+11} до 1.2 л/с км²;
- $K = 2.8$ при M_{10+11} от 1.2 до 1.7 л/с км²;
- $K = 3.1$ при M_{10+11} свыше 1.7 л/с км².

ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанная Д.А. Бураковым Региональная методика расчета потенциального смыва имеет важное практическое значение для определения расчетных значений эрозии от воздействия талых вод на обрабатываемых землях Средней Сибири. Следует отметить, что полученные опытным путем величины смыва почв на пашне центральной части Красноярской лесостепи находятся в широком диапазоне значений (0.1–6.1 мм слоя почвы), что является следствием комплексного воздействия различных факторов – как гидрометеорологических, так и условий подстилающей поверхности [8].

В первоначальном варианте представленной Региональной модели условия подстилающей поверхности в значительной мере учтены, в то время как влияние гидрометеорологических факторов требовалось уточнить и дополнить – результаты ее применения показывали существенное расхождение с измеренными величинами.

В дальнейшем на основе уточненных расчетных величин будет возможно качественное улучшение противоэрозионных мероприятий на пашне лесостепи Средней Сибири, что позволит увеличить урожайность сельскохозяйственных культур и снизить потери почвенного плодородия. Кроме того, непосредственные полевые исследования интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов совместно с получением уточненных расчетных величин смыва на обрабатываемых склонах водосборов поможет качественно и количественно оценить общие объемы смываемых почвенных частиц, процент доставки в эрозионно-русовую сеть и их долю в общем объеме экспорта наносов крупных рек [19, 20].

Уточненная формула Региональной модели была апробирована в процессе исследований смыва почв на пашне центральной части Красноярской лесостепи [8]. Данная модель может быть применима не только в районе авторских исследований, но и на других территориях со схожими природно-климатическими условиями. Для корректного применения модели и получения максимально точных результатов, следует произвести ее верификацию на основе полевых измерений в этих районах и при необходимости внести изменения в значения K , а также уточнить диапазоны значений показателя предшествующего осеннего увлажнения почв и модуля осеннего стока ближайших рек для определения величин предложенного коэффициента.

Следует отметить, что небольшая длина ряда наблюдений по годам, наличие участков с продольной обработкой почв, значительная разница в величинах снегонакопления в годы исследований не позволяют определить значения K с высокой точностью. По этой причине, в дальнейшем необходим более длинный ряд наблюдений за смывом и аккумуляцией на участках чистого пара без нарушений условий агротехники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований и анализа полученных данных, можно сделать следующие выводы:

- На пахотных микроводосборах центральной части Красноярской лесостепи диапазон значений потенциального смыва, полученных с помощью Региональной модели до ее уточнения, составляет от 0.03 до 0.48 мм. Измеренные величины смыва, полученные методом конусов выноса, составили от 0.1 до 6.1 мм.
- Предшествующее осеннее увлажнение почв и интенсивность поступления воды на поверхность почвы при снеготаянии оказывают заметное влияние на интенсивность эрозии от талых вод, прослеживается тесная корреляция между ними.
- Предложен вариант уточнения Региональной модели с помощью внедрения поправочного коэффициента K , суммарно учитывающего влияние предшествующего осеннего увлажнения почв и интенсивности поступления талой воды на поверхность почвы при снеготаянии. Дополнительно предложен альтернативный вариант определения значений K в зависимости от модуля осеннего стока ближайших рек за октябрь–ноябрь. Установленные значения предложенного коэффициента в зависимости от величин осеннего увлажнения и модуля осеннего стока составляют от 2.4 до 3.1.
- Применение адаптированной формулы Региональной методики показывает результаты, приближенные к измеренным величинам. Точность определения расчетных величин смыва по сравнению с Региональной формулой в ее исходном варианте в среднем увеличивается в три раза, значения средней ошибки (ME) уменьшились с 0.3 до 0.11 (табл. 5). Диапазон значений потенциального смыва, рассчитанного с помощью уточненной Региональной модели, составляет от 0.09 до 1.15 мм.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает огромную благодарность и признательность д-ру геогр. наук, профессору кафедры Природообустройства Красноярского ГАУ Д.А. Буракову; заведующему НИЛ Эрозии почв и русловых процессов Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, д-ру геогр. наук С.Р. Чалову за обсуждение и советы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобровицкая Н.Н. Эмпирический метод расчета смыва почвы со склонов // Сток наносов, его изучение и географическое распределение. Л., 1977. С. 202–211.
2. Бураков Д.А., Иванова О.И. Анализ формирования и прогноз стока весеннего половодья в лесных и лесостепных бассейнах рек Сибири. М.: Метеорология и гидрология, 2010. № 6. С. 87–100.
3. Бураков Д.А. Эрозия почв: учеб. Пособие / Д.А. Бураков, Е.Э. Маркова; Краснояр. Гос. аграр. ун-т. Красноярск, 2009. 160 с.
4. Вольнов В.В., Бойко А.В., Чичкарев А.С. Опыт использования противоэрозионных гидротехнических сооружений в борьбе со стоком талых вод и смывом пахотных почв на склоновых землях Алтайского края // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. № 6 (152). С. 42–48.
5. Голубев И.А. Влияние талых вод на эрозионно-аккумулятивные процессы на пашне в центральной лесостепной зоне Красноярского края // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2021. № 1 (165). С. 24–29.

6. Голубев И.А., Кожуховский А.В., Иванова О.И. Влияние осеннего увлажнения почв на эрозионно-аккумулятивные процессы в Красноярской лесостепи // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 1 (379). С. 130–142.
<https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-1-130-142>
7. Голубев И.А. Смыв почв талыми водами на пашне северной части Красноярской лесостепи // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 360. С. 172–175.
8. Голубев И.А. Эрозия почв от талых вод на сельскохозяйственных землях Красноярской лесостепи: дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.27 / Голубев Игорь Александрович. Красноярск, 2022.
9. Иванова О.И. Гидрологический анализ и прогноз весеннего половодья лесных и лесостепных рек Средней Сибири: дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.27 / Иванова Ольга Игоревна. Красноярск, 2011.
10. Инструкция по определению расчетных гидрологических характеристик при проектировании противоэрозионных мероприятий на европейской территории СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 62 с.
11. Краснощеков Ю.Н. Процессы водной эрозии почв на сплошных вырубках в горных лесах бассейна оз. Байкал // Экологическое влияние леса на среду. Красноярск: Институт леса и древесины им. В.Н. Сукачева АН СССР, 1977.
12. Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. М.: Изд-во МГУ, 1993. 200 с.
13. Литвин Л.Ф. География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2002.
14. Методические указания по проектированию противоэрозионной организации территории при внутрихозяйственном землеустройстве в зонах проявления водной эрозии. М.: ГосНИИ земельных ресурсов, 1989. 80 с.
15. Научные стационары: реалии, научная проблематика и инновации // Материалы научно-практической конференции с международным участием, посвященной 70-летию Нарымского стационара по изучению систем применения удобрений на дерново-подзолистой почве / Федеральное агентство научных организаций Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа — филиал ФГБУН Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий (СибНИИСХИТ — филиал СФНЦА РАН). Томск : Графика, 2017. 263 с.
16. Попов Е.Г. Гидрологические прогнозы. Л., Гидрометеиздат, 1979. 256 с.
17. Руководство по гидрологическим прогнозам. Ленинград: Гидрометеиздат, 1989. Вып. 1. 358 с.
18. Танасиенко А.А. Специфика эрозии почв в Сибири. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2003. 176 с.: ил.
19. Чалов С.Р. Речные наносы в эрозионно-руслых системах: автореф. дис. ... д-ра. геогр. наук: 25.00.27 / Чалов Сергей Романович. М. 2021.
20. Chalov S., Ivanov V. Catchment and in-channel sources in three large Eurasian Arctic rivers: Combining monitoring, remote sensing and modelling data to construct Ob', Yenisey and Lena rivers sediment budget // Catena. 2023. V. 230. № 107212.
21. Kozhuhovsky A., Yamskikh G., Komatsu G. The evolution of gullies in steppe and forest-steppe landscapes of the Minusinskaya intermountain depression, Siberia: a case study in the central part of the Krasnoyarsk water reservoir // Phys. Geogr. 2015. V. 36. № 4. P. 305–321.
22. Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses // Agric. handbook № 537. Washington, 1978. 65 p.

Clarification of the Regional Methodology for Calculating Potential Soil Flushing from Meltwater for the Northern Forest-Steppe of Central Siberia

I. A. Golubev^{1, 2, *}

¹Branch of PJSC “Rosseti Sibir” - “Krasnoyarskenergo”, Krasnoyarsk, Russia

²Krasnoyarsk state agrarian university, Krasnoyarsk, Russia

*E-mail: igorgol1984@bk.ru

Abstract—The need to verify, modernize and refine existing models for calculating potential soil flushing from the effects of meltwater is due to the small number of studies of this type of erosion in the forest-steppe zone of Central Siberia and, as a consequence, the inability to

reliably determine how accurate the calculation methods are in their current form under these conditions. For the agricultural zone of the Krasnoyarsk Territory, a regional model has been developed for calculating potential soil flushing based on a Universal equation and the Instructions' formula. This paper presents the results of its verification, performed using the results of the author's field measurements of soil flushing from meltwater by measuring removal cones on agricultural lands of the northern forest-steppe of Central Siberia (Krasnoyarsk forest-steppe). A refined version of the Regional Methodology is proposed, adapted to local hydrometeorological conditions and representing the formula of this model with an added correction factor K , taking into account the influence of the previous autumn moistening of soils and the intensity of water flow to the soil surface during snowmelt. Refinement and adaptation of the methodology allowed to increase the accuracy of the results of its application by an average of three times compared to the original type of the model, the average error decreased from 0.3 to 0.11. The refined version of the Regional methodology was tested in the course of the author's research of snow-fall soil erosion in the Krasnoyarsk forest-steppe.

Keywords: flushing, accumulation, slopes, meltwater, surface runoff, snow accumulation, snowmelt intensity, autumn soil moisture

REFERENCES

1. Bobrovickaya N.N. Empiricheskij metod rascheta smyva pochvy so sklonov // Stok nanosov, ego izuchenie i geograficheskoe raspredelenie. L., 1977. S. 202–211.
2. Burakov D.A., Ivanova O.I. Analiz formirovaniya i prognoz stoka vesennego polovod'ya v lesnyh i lesostepnyh bassejnah rek Sibiri. M., Meteorologiya i gidrologiya, 2010. № 6. S. 87–100.
3. Burakov D.A. Eroziya pochv: ucheb. Posobie / D.A. Burakov, E.E. Markova; Krasnoyarsk. Gos. agrar. un-t. Krasnoyarsk, 2009. 160 s.
4. Vol'nov V.V., Bojko A.V., Chichkarev A.S. Opyt ispol'zovaniya protiverozionnyh gidrotekhnicheskikh sooruzhenij v bor'be so stokom talyh vod i smyvom pahotnyh pochv na sklonovyh zemlyah Altajskogo kraja // Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2017. № 6 (152). S. 42–48.
5. Golubev I.A. Vliyanie talyh vod na erozionno-akkumulyativnye processy na pashne v central'noj lesostepnoj zone Krasnoyarskogo kraja // Ispol'zovanie i ohrana prirodnyh resursov v Rossii. 2021. № 1 (165). S. 24–29.
6. Golubev I.A., Kozhuhovskij A.V., Ivanova O.I. Vliyanie osennego uvlazhneniya pochv na erozionno-akkumulyativnye processy v Krasnoyarskoj lesostepi // Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy. 2021. № 1 (379). S. 130–142.
<https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-1-130-142>
7. Golubev I.A. Smyv pochv talymi vodami na pashne severnoj chasti Krasnoyarskoj lesostepi // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. 2012. № 360. S. 172–175.
8. Golubev I.A. Eroziya pochv ot talyh vod na sel'skohozyajstvennyh zemlyah Krasnoyarskoj lesostepi: dis. ... kand. geogr. nauk: 25.00.27 / Golubev Igor' Aleksandrovich. Krasnoyarsk, 2022.
9. Ivanova O.I. Gidrologicheskij analiz i prognoz vesennego polovod'ya lesnyh i lesostepnyh rek Srednej Sibiri: dis. ... kand. geogr. nauk: 25.00.27 / Ivanova Olga Igorevna. Krasnoyarsk, 2011.
10. Instrukciya po opredeleniyu raschetnyh gidrologicheskikh harakteristik pri proektirovanii protiverozionnyh meropriyatij na evropejskoj territorii SSSR. L.: Gidrometeoizdat, 1979. 62 s.
11. Krasnoshchekov Yu.N. Processy vodnoj erozii pochv na sploshnyh vyrubkah v gornyh lesah bassejna oz. Bajkal // Ekologicheskoe vliyanie lesa na sredu. Krasnoyarsk: Institut lesa i drevesiny im. V.N. Sukacheva AN SSSR, 1977.
12. Larionov G.A. Eroziya i deflyaciya pochv: osnovnye zakonomernosti i kolichestvennye ocenki. M.: Izd-vo MGU, 1993. 200 s.
13. Litvin L.F. Geografiya erozii pochv sel'skohozyajstvennyh zemel' Rossii. M.: IKC "Akademkniga", 2002.
14. Metodicheskie ukazaniya po proektirovaniyu protiverozionnoj organizacii territorii pri vnutrihozyajstvennom zemleustrojstve v zonah proyavleniya vodnoj erozii. M.: GosNII zemel'nyh resursov, 1989. 80 s.
15. Nauchnye stacionary: realii, nauchnaya problematika i innovacii // Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchyonnoj 70-letiyu Narymskogo stacionara po izucheniyu sistem primeneniya udobrenij na dernovo-podzolistoj pochve / Federal'noe agentstvo nauchnyh organizacij Sibirskij nauchno-issledovatel'skij institut sel'skogo hozyajstva i torfa – filial FG-

- BUN Sibirskogo federal'nogo nauchnogo centra agrobiotekhnologij (SibNIISKHiT – filial SFNCA RAN). Tomsk: Grafika, 2017. 263 s.
16. Popov E.G. *Gidrologicheskie prognozy*. L., Gidrometeoizdat, 1979. 256 s.
 17. *Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. Vyp. 1. 358 s.
 18. Tanasienko A.A. *Specifika erozii pochv v Sibiri*. – Novosibirsk: Izdatel'stvo SO RAN, 2003. 176 s.: il.
 19. Chalov S.R. *Rechnye nanosy v erozionno-ruslovyh sistemah: avtoref. dis. ... d-ra. geogr. nauk: 25.00.27 / Chalov Sergej Romanovich*. Moskva, 2021.
 20. Chalov S., Ivanov V. Catchment and in-channel sources in three large Eurasian Arctic rivers: Combining monitoring, remote sensing and modelling data to construct Ob', Yenisey and Lena rivers sediment budget // *Catena*. 2023. V. 230. № 107212.
 21. Kozhuhovsky A., Yamskikh G., Komatsu G. The evolution of gullies in steppe and forest-steppe landscapes of the Minusinskaya intermountain depression, Siberia: a case study in the central part of the Krasnoyarsk water reservoir // *Phys. Geogr.* 2015. V. 36. № 4. P. 305–321.
 22. Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses // *Agric. handbook* № 537. Washington, 1978. 65 p.

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ЗЕМЕЛЬ БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ, НАРУШЕННЫХ ПРИ ГОРНОПРОМЫШЛЕННОМ ОСВОЕНИИ

© 2023 г. Е. А. Еременко^а, *, Ю. Р. Беляев^а, **, С. И. Болысов^а, ***,
А. В. Бредихин^а, ****, В. Р. Битюкова^а, *****

^аГеографический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: eremenkoeaig@gmail.com

**E-mail: yrbel@mail.ru

***E-mail: sibol1954@bk.ru

****E-mail: avbredikhin@yandex.ru

*****E-mail: bituykova@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.05.2023 г.

После доработки 14.09.2023 г.

Принята к публикации 22.11.2023 г.

Предложена методика расчета интегрального показателя эколого-геоморфологической опасности горнопромышленных территорий с точки зрения их влияния на экологическую обстановку на Байкальской природной территории. Описанный подход позволяет детально охарактеризовать последствия добычи полезных ископаемых для экологической ситуации в регионе, так как учитывает не только площадь нарушенных земель, но и другие факторы, влияющие на возможность транспорта загрязнителей и степень их опасности (в частности, тип добываемого сырья, геоморфологическую позицию разрабатываемых месторождений, степень антропогенной трансформации рельефа, состав антропогенных отложений и степень рекультивации нарушенных земель). Для апробации методики выполнен расчет интегрального показателя эколого-геоморфологической опасности нарушенных земель в пределах всех муниципальных образований Байкальской природной территории по состоянию на 2020 год, проведено ранжирование их по значению показателя и составлена соответствующая карта.

Ключевые слова: интегральный показатель, антропогенный рельеф, добыча угля, россыпные месторождения, антропогенное воздействие

DOI: 10.31857/S0869607123030047, EDN: YJNSKR

ВВЕДЕНИЕ

Байкальская природная территория (БПТ) включает регионы, испытывающие антропогенное воздействие на протяжении нескольких последних столетий. Согласно Распоряжению Правительства РФ от 27 ноября 2006 г. № 1641-р “Об утверждении границ Байкальской природной территории и ее экологических зон” в состав БПТ входят юго-восточная часть Иркутской области, южная и центральная части Бурятии, а также юго-западная часть Забайкальского края (всего — 37 муниципальных образований, включая районы и городские округа). Богатство региона полезными ископаемыми предопределило широкомасштабные разведочные работы в первой половине XX века, а во второй половине XX века и XXI веке — активное развитие горнодобыва-

ющей отрасли. Горнодобывающие предприятия связали автомобильные и железные дороги, вблизи них возникли крупные селитебные центры. Строительство зданий и сооружений в ходе горнопромышленного, транспортного и селитебного освоения, а также, собственно, разработка сырья сопровождалась существенным изменением естественного рельефа БПТ.

Антропогенная трансформация рельефа — это комплекс разносторонних воздействий деятельности человека на рельеф территории, приводящий к последующим изменениям в природных экосистемах, а также, нередко, к возникновению негативных и опасных экологических явлений и состояний. Хозяйственная деятельность человека в пределах БПТ сопровождалась воздействием на рельеф, которое было как прямым (изменение морфологии рельефа путем создания антропогенных форм и трансформации облика естественных форм рельефа), так и косвенным (изменение условий протекания геоморфологических процессов, в частности, характера растительного покрова, геокриологических условий, параметров тепломассопереноса, гидрологических характеристик и пр.). Оценка геоморфологических опасностей, возникающих вследствие антропогенной трансформации рельефа, необходима и важна для сохранения и поддержания уникальных природных экосистем БПТ. Как и любая комплексная оценка она подразумевает определенную последовательность действий по систематизации и анализу разнородной географической информации, ее интегрирование и представление в виде одного или нескольких интегральных показателей. К настоящему моменту в отечественной и зарубежной науке накоплен большой арсенал подходов и методик оценки природных и природно-техногенных систем, а также рельефа для целей природопользования. Преимущественно, это оценки потенциальных опасностей и рисков (как в комплексе, так и по разным видам геоморфологических и геологических опасностей), в меньшей степени — величины антропогенного воздействия на рельеф.

ИЗУЧЕННОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Со второй половины XX века комплексные оценки используются в географических исследованиях для характеристики систем, объектов и/или процессов на основе изучения нескольких показателей их свойств, которые могут быть как качественными, так и количественными [18]. При этом объектом комплексной оценки может являться как состояние систем, так и связи между их компонентами [23, 24, и др.]. Основным итогом оценки является карта, отражающая пространственное распределение комплексного показателя. Описанный подход к оценке реализован, в частности, при оценке экологического состояния и ситуации [8, 9, 20], экологической напряженности [7], напряженности геоморфологических систем и обстановок [28]. Наиболее востребованной практикой являются исследования, направленные на комплексную оценку опасностей и риска [19, 22, 27].

Исследование взаимодействий рельефа и хозяйственной деятельности в пределах БПТ и ее окрестностях в течение последних 20–30 лет проводилось по двум ключевым направлениям: 1) изучение геоморфологических опасностей и связанных с ними рисков хозяйственного освоения территории; 2) изучение влияния хозяйственной деятельности на естественный рельеф. Наряду с анализом отдельных сторон функционирования эколого-геоморфологических систем освоенных территорий выполнялись интегральные оценки как рельефа в целом для нужд природопользования, так и нарушенности природных геосистем антропогенным воздействием.

В ряде научных работ отечественных исследователей затрагивались вопросы, связанные с геоморфологическими и геологическими рисками природопользования в Сибирском регионе. В частности, выполнены оценки селевого риска [5] и риска землетрясений в экономических показателях [17], оценка селевого риска для транспорт-

ных коммуникаций [33]. Непосредственно для территории Иркутской области оценка геоморфологических опасностей и рисков выполнена С.Б. Кузьминым [25], геоморфологической безопасности природопользования по методике [18] проведена Баженовой О.И. и соавторами [6] для верхней части бассейна р. Ангары.

В названных работах естественный рельеф и геоморфологические процессы рассматриваются как источники потенциальной опасности для хозяйства и населения. В то же время, хозяйственная деятельность и сопутствующее изменение рельефа сами являются источником потенциальных и фактических угроз для жизнедеятельности людей и для окружающей среды в целом. Эта сторона взаимодействия хозяйства и окружающей среды гораздо шире освещена в научных публикациях по изучаемому региону, особенно в последние 10 лет. Вопросы нарушенности природной среды антропогенным воздействием в пределах БПТ рассматривались во множестве научных работ, разработаны несколько методик комплексной оценки антропогенной нарушенности, основанных на взвешенном учете разнородных критериев. Коллективом авторов [12] выполнен обзор основных результатов работ сотрудников Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН в указанном направлении с 1960-х годов по 20-е годы XXI века. Составлена карта экологического зонирования БПТ, учитывающая геоморфологическое строение территории зоны атмосферного влияния и опасность выбросов загрязняющих веществ в ее пределах. Определены критерии экологической допустимости размещения хозяйственных объектов в центральной экологической зоне БПТ, подготовлены рекомендации для учета в стратегиях территориального развития. Одним из крупных геоинформационных проектов, реализованным в последние годы, является создание цифрового атласа “Байкальский регион: общество и природа” [4].

Значимость оценки экологического потенциала для обеспечения устойчивого развития БПТ подчеркивается в работах И.Н. Владимирова [13–15]. С использованием средств GRID-моделирования проведена [14] оценка экологического потенциала и степени устойчивости геосистем Байкальской Сибири. Оценка экологической стабильности БПТ с учетом состава земельного фонда и природных условий выполнена Лопаткиным Д.А. [29]. В то же время, напрямую нарушенность рельефа в представленных оценках не учитывалась, методы оценки ее степени пока не разработаны. Коноваловой Т.И. [21] предложена методология исследования трансформации геосистем БПТ, учитывающая их динамические параметры, и показано, что интенсивная хозяйственная деятельность способствует интенсификации природных трендов трансформации геосистем. Это в полной мере относится и к геоморфологическим системам освоенных территорий, особенно, к районам разработки месторождений полезных ископаемых. Повышение уклонов местности, появление огромного количества рыхлого материала и незадернованность поверхности являются причинами резкой активизации целого спектра геоморфологических процессов, обеспечивающих транспорт вещества (делювиального смыва, линейной эрозии и пр.). Для территории южного Прибайкалья и хребта Малый Хамар-Дабан составлены карты антропогенной нарушенности геосистем [31, 32].

В пределах БПТ наибольшим спектром воздействий на окружающую среду характеризуется промышленное природопользование, в частности горнодобывающая деятельность. Результаты анализа экологических последствий добычи полезных ископаемых в СФО показывают, что в 2015 г. на долю округа пришлось 70% всего объема отходов горнодобывающей промышленности в РФ [26]. При этом отходы производства (шлаки, шлам, вскрышные породы и пр.) сосредотачиваются на узко локальных участках, слагая или заполняя формы антропогенного рельефа. Антропогенный рельеф, нередко, является крайне нестабильным, подверженным разрушению природными факторами. Это определяет повышенный риск распространения отходов горнопромышленного производства за пределы зоны непосредственной добычи сырья, а значит — необходимость оценки устойчивости антропогенно нарушенных террито-

рий, в частности, созданного в районах разработки месторождений искусственного рельефа. Область негативного воздействия горнодобывающих предприятий на окружающие ландшафты значительно превышает площадь земельного отвода, что существенно ухудшает экологическую обстановку [30]. Одной из наиболее комплексных оценок влияния горнодобывающей промышленности Байкальского региона и Монголии на окружающую среду является оценка (а также соответствующие карты и методология), выполненная А.Д. Абалаковым и Н.Б. Базаровой [2]. Ими предложена система показателей, с помощью которых проведены оценка и картографирование техногенного воздействия на локальном (участки разработки месторождений) и площадном (административные районы) уровнях. Составлена карта, иллюстрирующая воздействие горнодобывающей промышленности на окружающую среду в бассейне озера Байкал [1]. В отдельных работах [10, 11] подчеркивается влияние горнодобывающей деятельности на изменение геолого-геоморфологических условий (наряду с другими направлениями воздействия на окружающую среду). В то же время, нельзя согласиться с выводом авторов о том, что “для такого типа нарушений отрицательные последствия ограничиваются районом месторождения” [11, с. 99], поскольку он не учитывает каскадности функционирования ландшафтов (и, в частности, рельефа) речных бассейнов, затронутых добычей сырья. Предложенная методика балльной оценки воздействия была реализована на примере Ишидейского каменноугольного и Хандинского бурогоугольного месторождений Иркутской области [11].

Нарушенные в результате разработки сырья территории после отработки месторождений переходят в естественный режим развития, однако ряд геоморфологических и других природных процессов развивается здесь, нередко, с существенно большей интенсивностью, чем в не затронутых освоением районах. Установлено, что экологические последствия разработки золоторудных месторождений (в настоящее время не действующих) напоминают о себе и в настоящее время. Так, значительная часть токсичных веществ сосредоточена в хвостохранилищах и отвалах золотоизвлекательных фабрик, являющихся фактическими источниками загрязнения [3, 16].

Таким образом, к настоящему времени накоплен большой опыт в области оценки нарушенности природных геосистем антропогенным воздействием, в том числе, непосредственно для БПТ. В то же время, трансформация рельефа в результате горнопромышленного освоения и ее последствия для природной среды в пределах территории БПТ изучены достаточно слабо. Представляется, что учет площадей нарушенных земель, уклонов местности — далеко не полный спектр критериев оценки нарушенности рельефа, который должен быть использован для интегральной оценки последствий вмешательства человека в функционирование рельефа. Кроме того, очевидна актуальность подобной оценки для территории БПТ в целом с учетом специфики месторождений в пределах отдельных муниципальных образований, что позволит выделить наиболее проблемные районы, а также разработать более эффективные меры по снижению существующих рисков. **Целью** представленного исследования являлась разработка методики интегральной оценки эколого-геоморфологической опасности земель, нарушенных горнопромышленной деятельностью в пределах БПТ, а также ее апробация, в том числе, для отдельных муниципальных образований. **Методика** интегральной оценки эколого-геоморфологической опасности земель, нарушенных при эксплуатации месторождений, разрабатывалась с учетом охарактеризованных выше подходов и нацелена на создание пространственной картины антропогенной трансформации рельефа, ее негативных и опасных для окружающей среды последствий.

МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ

Для разных типов природопользования характерны различные масштабы и типы антропогенных трансформаций рельефа. В пределах населенных пунктов БПТ ре-

льеф, безусловно, был изменен в ходе освоения. При этом чем более крупным является населенный пункт, тем, как правило, более масштабны эти изменения. Однако, планируя рельеф городских территорий, человек стремится создать не только безопасную, но и комфортную среду. Поэтому антропогенный рельеф городов (насыпи, выемки и др.), как правило, сравнительно стабилен. Совершенно иная ситуация создается в районах добычи полезных ископаемых, где трансформация рельефа происходит в процессе вскрышных работ, выемки полезного компонента (сырья) и образуемый антропогенный рельеф, нередко, практически не рекультивируется. Разрабатываемые, отработанные и заброшенные месторождения в пределах БПТ представляют собой участки нарушенных земель, где созданы масштабные комплексы антропогенного рельефа (карьеры, прорезы, штольни, канавы, отвальные поля, терриконы, площадки хвостохранилищ и пр.) (рис. 1). Грунт, слагающий эти новообразованные формы рельефа, чаще всего, не закреплен или слабо закреплен растительностью. Как следствие, загрязняющие вещества из отвалов карьеров и хвостохранилищ имеют возможность поступать в речную сеть с поверхностным стоком. Кроме того, линейная эрозия и делювиальный смыв, развивающиеся в контурах нарушенных земель, способствуют активизации поступления рыхлого материала в водотоки и, тем самым, увеличению мутности воды. Необходимо отметить, что чем более свежими (молодыми) являются антропогенные формы в пределах месторождений (как отработанных, так и разрабатываемых), тем активнее они размываются, так как на образование растительного покрова на отвалах и стенках карьеров уходят первые десятки лет. В случае, когда грунт нарушенных территорий мелкодисперсный, дополнительный вклад в распространение тонких частиц (в том числе, загрязнителей) вносит дефляция и эоловый перенос. Таким образом, нарушенные земли месторождений (как отработанных, так и разрабатываемых), безусловно, вносят свой вклад в загрязнение окружающей среды в пределах БПТ. Величина этого вклада зависит от нескольких факторов, в частности: площади нарушенных земель, характера антропогенной трансформации рельефа и состава поверхностных отложений на участке воздействия, “свежести” антропогенного рельефа (или стадии рекультивации), геоморфологической позиции месторождения и ассоциированных с ним нарушенных земель, типа добываемого полезного ископаемого.

Так, чем больше площадь нарушенных земель и меньше площадь рекультивированных участков, тем больше совокупная величина потенциального стока загрязняющих веществ. Большое значение имеет положение конкретного месторождения. К примеру, при положении нарушенных земель в бессточной котловине сток загрязняющих веществ оказывается локализован и не выходит за ее пределы. С другой стороны, при разработке месторождения в днище речной долины (характерно для россыпных месторождений) загрязняющие вещества имеют возможность мигрировать с речным стоком далеко за пределы района разработки. В то же время, интенсивность и дальность миграции во многом определяются характером изменения уклонов рек, наличием внутрибассейновых участков аккумуляции загрязняющих веществ (внутренних дельт, подпрудных водоемов и пр.). Так, установлено, что под влиянием обозначенных выше факторов вклад горнодобывающей промышленности г. Закаменска (бассейн р. Модон-Куль — правого притока р. Джиды, Бурятия) в поступление поллютантов в р. Джиду оказывается невелик, но, тем не менее, он все равно присутствует [34]. Тип разрабатываемого полезного ископаемого влияет, прежде всего, на состав загрязняющих веществ. Наиболее широкий спектр опасных загрязнителей характерен для районов разработки россыпей (золота, серебра и др.), а также участков добычи руд цветных металлов (вольфрам-молибденовые месторождения и пр.). Более узкий спектр характерен для районов разработки бурого и каменного угля, а наиболее узкий — общестроительных полезных ископаемых.

Следовательно, для комплексной оценки влияния трансформации рельефа в районах горнопромышленного освоения на экологическое состояние БПТ необходимо



Рис. 1. Добыча угля на Окинском месторождении (Бичурский район, Бурятия): амплитуда вертикального расчленения рельефа достигает 150–180 м.

Fig. 1. Coal mining at the Okinsky deposit (Bichursky district, Buryatia): the amplitude of the vertical dissection of the relief reaches 150–180 m.

оценить существующие разрабатываемые/отработанные/заброшенные месторождения с точки зрения обозначенных выше критериев. Предлагаемая методика комплексной оценки включает **следующие этапы**:

1. Выделение границ нарушенных земель (разрабатываемых и заброшенных месторождений) на основе анализа данных о контурах месторождений, предоставляемых на сайте Роснедр (<https://openmap.mineral.ru/>), результатов дешифрирования разновременных космических снимков и полевого обследования отдельных участков БПТ (выполнено авторами в июле 2022 г.).

2. Определение значимых свойств (критериев оценки) каждого контура нарушенных земель (площадь, геоморфологическая позиция, характер антропогенной трансформации рельефа и состав поверхностных отложений на участке воздействия, стадия рекультивации, тип добываемого сырья).

3. Присвоение баллов каждому контуру (месторождению или его части) по каждому из значимых критериев оценки. В случае, если в пределах одного месторождения могут быть выделены участки, различающиеся по значению критериев, балл присваивался по наихудшей позиции.

4. Расчет интегрального показателя эколого-геоморфологической опасности путем суммирования произведений баллов по каждому их критериев на коэффициент значимости соответствующего критерия. Для учета разной значимости критериев в комплексной оценке использован метод анализа иерархий [36–38].

5. Умножение полученного значения интегрального показателя опасности на площадь соответствующего участка нарушенных земель (месторождения или его части). В дальнейшем, к примеру, для перехода на уровень оценки по выбранным территориальным единицам (к примеру, муниципальным образованиям), возможно суммирование таких произведений по всем участкам нарушенных земель внутри отдельного выдела (в частности, в данной работе — внутри границ муниципального образования).

После анализа данных о локализации и статусе месторождений на сайте Роснедр (<https://openmap.mineral.ru/>) площади нарушенных земель в пределах БПТ по состоянию на 2020 г. были уточнены путем дешифрирования свободно распространяемых

многозональных спутниковых изображений высокого разрешения Sentinel-2A и Sentinel-2B. Выбор данной съемочной системы обусловлен сплошным покрытием территории съемкой, высоким пространственным разрешением снимков (10 м/пикс), а также относительно высокой повторяемостью съемки, позволяющей подобрать съемочные сцены, удовлетворяющие требованиям как по времени съемки, так и по условиям облачности, задымленности и пр. Снимки Sentinel-2 (на 2020 г.) были получены с интернет-портала scihub.copernicus.eu. Пространственное разрешение выбранных для дешифрирования съемочных систем позволяет уверенно дешифрировать участки нарушенных земель плановыми размерами более чем 15×15 м, что представляется вполне достаточным для целей исследования. Для дешифрирования подбирались съемочные сцены на конец лета – начало осени (завершающая часть активного вегетационного периода). Также обязательным условием выбора сцены было отсутствие, либо незначительная (не более 5%) площадь облачности, а также низкий уровень задымления (что весьма актуально в пожароопасный период). Для дешифрирования использовалась стандартная комбинация каналов видимой части спектра 4-3-2, позволяющая получить синтезированное изображение в естественных цветах. Все работы по созданию синтезированных изображений и их дешифрированию производились в среде свободно распространяемой геоинформационной системы QGIS.

В ходе работ использовались следующие основные дешифровочные признаки: отсутствие или разреженность растительности, характер очертаний объекта (скругленные очертания отвалных полей, иногда – прямоугольные очертания горных выработок и т.п.), наличие специфических текстур поверхности (бермы отвалных полей, ступени нагорных карьеров, обвалования хвостохранилищ и пр.), закономерное сочетание (чередование) участков разреженной или отсутствующей растительности с мелкими искусственными водоемами, ориентированными как вдоль, так и субперпендикулярно руслам рек (особенно характерно для участков разработки россыпных месторождений в днищах долин рек), наличие отчетливо дешифрируемых подъездных путей (дорог), а также дорог внутри дешифрируемого контура. Эти признаки в комплексе с исходными данными с портала Роснедр позволяют достаточно уверенно определять контуры нарушенных земель. В качестве дополнительных источников данных использовались также снимки высокого и сверхвысокого разрешения коммерческих съемочных систем WorldView-1, WorldView-2 и др. за отдельные годы, имеющиеся в свободном доступе на публичных интернет-порталах Google.Maps, Yandex.Maps, Bing.Maps, а также в сервисе ArcGIS.Imagery. Эти снимки в силу исключительно высокого (до 1–2 м/пикс) разрешения позволяют практически однозначно удостовериться в том, что выделенный участок нарушенных земель связан именно с добычей полезных ископаемых и, тем самым, верифицировать данные, полученные на основе анализа снимков Sentinel.

Следующим этапом оценки стал выбор и ранжирование значимых критериев (в основном неколичественных), определяющих степень опасности воздействия нарушенных земель на экологическую ситуацию в регионе (табл. 1).

При присвоении баллов частным значениям (диапазоном) значимых критериев акцент делался на величине потенциальной и/или фактической опасности ситуации, когда критерий принимает то или иное значение (при этом чем выше балл, тем больше опасность). Далее с использованием программного аппарата QGIS частным контурам нарушенных земель присваивался балл по каждому из четырех критериев. Для получения итогового значения комплексного показателя геоморфологической опасности необходим взвешенный учет критериев, так как они, очевидно, отличаются степенью значимости и влияния на итоговый результат оценки.

Веса критериев были определены с использованием метода анализа иерархий [35–38], для чего с привлечением коллектива экспертов-геоморфологов (всего опрошено – 6 чел.) составлена матрица попарных сравнений значимости. Матрица заполнялась

Таблица 1. Критерии комплексной оценки эколого-геоморфологической опасности земель, нарушенных в результате разработки полезных ископаемых**Table 1.** Criteria for a comprehensive assessment of the environmental and geomorphological risk on the lands affected by development of mineral resources

№	Критерий	Значение критерия	Балл
1	Геоморфологическая позиция участка месторождения	Плоские вершинные поверхности междуречий, днища замкнутых котловин, в том числе занятых озерами; площадки обширных озерных террас	1
		Приводораздельные позиции в условиях пересеченного рельефа, площадки надпойменных террас и поверхности подгорных шлейфов и педиментов	2
		Склоновые позиции, днища обширных межгорных котловин, дренируемые малыми водотоками	3
		Днища небольших долин постоянных и временных водотоков, пойменно-русловой комплекс долин рек	4
2	Характер антропогенной трансформации рельефа и состав поверхностных отложений	Участки разведанных, но пока не разрабатываемых месторождений , где распространены комплексы мелких горных выработок (разведочные канавы и пр.); состав антропогенных отложений различен, а их объемы минимальны в сравнении с прочими типами. Для таких участков воздействия характерны небольшие амплитуды вертикального расчленения рельефа (до 10–15 м), фрагментарность воздействия (антропогенный рельеф характеризуется более скромными морфологическими параметрами) и в целом меньшая антропогенная трансформация естественных ландшафтов.	1
		Участки воздействия с комплексом форм рельефа, связанных с разработкой общестроительных полезных ископаемых : карьерами (в том числе пойменными и русловыми) и отвалами вскрышных пород; характерно преобладание техногенно-переотложенных отложений – рыхлого материала размерностью до щебня/гальки	2
		Участки воздействия, где происходит разработка месторождений в коренных породах (рудные месторождения, угольные разрезы и пр.) , рельеф которых характеризуется максимальной (до первых сотен метров) вертикальной расчлененностью (карьеры (в том числе нагорные), отвалы различной морфологии, выемки и полувыемки, рвы обрушения), а в составе антропогенных отложений преобладает грубообломочный материал валунно-глыбовой размерности	3
		Участки, трансформированные освоением россыпных месторождений (золота, вольфрама и пр.), где наблюдается небольшая (первые десятки метров) амплитуда расчленения рельефа (сочетание карьеров-выемок и отвалов пустой породы), характерно преобладание в составе антропогенных отложений песчано-гравийно-галечного материала, относительно легко вовлекаемого в перемещение вниз по долинам рек (включая поллютанты), а также участки обособленных хвостохранилищ горнообогатительных комбинатов (характерные амплитуды вертикального расчленения рельефа – первые десятки метров); в составе антропогенных отложений которых доминируют частицы алевроглинистой и тонкопесчаной размерности, высокая доля поллютантов, перемещающихся за пределы районов складирования отходов с водой и ветром	4
3	Стадия рекультивации	Разработка прекращена, участок практически полностью рекультивирован (более 75% площади), либо разработка не начата, имеются только разведочные горные выработки	1
		Разработка прекращена, рекультивировано 25–75% территории	2
		Разработка прекращена, рекультивировано менее 25% территории, либо разрабатывается и рекультивируется более 25% территории	3
		Разрабатывается, рекультивировано менее 25% площади	4
4	Тип добываемого сырья	Грунтовые строительные материалы (щебень, песок, песчано-гравийная смесь и пр.)	1
		Каменный и бурый угли	2
		Флюорит и другое нерудное сырье, извлекаемое из скальных пород, руды драгоценных металлов (золото, серебро и пр.)	3
		Руды цветных и черных металлов, россыпи драгоценных металлов (золото)	4

Таблица 2. Квалиметрические коэффициенты (веса) критериев, определенные методом анализа иерархий**Table 2.** Qualitemetric criteria ratios determined by the hierarchy analysis method

Критерий	Расчетный вес критериев
Геоморфологическая позиция участка месторождения	0.414
Характер антропогенной трансформации рельефа и состав поверхностных отложений	0.122
Стадия рекультивации	0.198
Тип добываемого сырья	0.265

каждым из экспертов независимо от других, при этом выполнялось попарное сравнение значимости используемых критериев с использованием шкалы значимости по [36–38]. При проведении оценки значимости каждый критерий по очереди сравнивается со всеми остальными, значения показателя сравнительной значимости вносятся в матрицу. Итогом каждой экспертной оценки, таким образом, становится квадратная матрица **A** размером 4×4 (поскольку нами использовалось четыре критерия для оценки), все значения на главной диагонали которой равны 1, а для остальных элементов верно соотношение:

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}},$$

где a_{ij} — элемент матрицы **A**, находящийся на пересечении i -й строки и j -го столбца.

Далее каждая из составленных экспертами матриц попарного сравнения тестировалась на согласованность суждений согласно стандартной процедуре, обычно используемой в рамках метода анализа иерархий (АНР-подход) [36]. Фактические значения критерия согласованности изменялось в диапазоне от 0.001 до 0.05, поэтому все полученные частные экспертные матрицы были задействованы в оценке. Далее матрицы суждений проходили процедуру нормировки [36], после чего рассчитывалось среднее значение элементов по каждой строке. Эти средние значения и принимаются в качестве весов критериев в рамках одного частного экспертного мнения. Последним этапом определения итоговых весов критериев является арифметическое осреднение частных экспертных оценок веса каждого из критериев. Результаты осреднения весов четырех выбранных критериев по частным экспертным оценкам приведены в табл. 2.

Финальным этапом комплексной оценки стал, собственно, расчет безразмерного интегрального показателя эколого-геоморфологической опасности нарушенных земель ($\Gamma_{\text{нз}}$) для каждого контура нарушенных земель (месторождения) по формуле:

$$\Gamma_{\text{нз}} = \sum_{i=1}^4 K_i w_i,$$

где — значение конкретного критерия (в баллах), w — его вес.

Значения интегрального показателя $\Gamma_{\text{нз}}$ могут изменяться в пределах от 1 до 4, при этом значение $\Gamma_{\text{нз}} = 4$ соответствует наиболее опасным участкам нарушенных земель (с точки зрения роли участка как источника загрязняющих веществ), а $\Gamma_{\text{нз}} = 1$ — наиболее безопасным участкам.

Поскольку ключевой задачей комплексной оценки эколого-геоморфологической опасности является установление возможного негативного влияния разных частей территории БПТ (к примеру, отдельных муниципальных образований) на окружающую природную среду и, в конечном счете, на состояние экосистем озера Байкал, ключевое значение имеют потенциальные абсолютные значения поступления загрязняющих веществ с нарушенных земель. Можно предположить, что они будут прямо

пропорциональны площадям отдельных участков нарушенных земель и значению показателя их геоморфологической опасности, рассчитанного по указанной выше формуле. К примеру, крупный по площади участок с высоким значением показателя потенциально будет являться источником большего количества загрязняющих веществ, чем более мелкий по площади участок с таким же значением комплексного показателя. Соответственно, в качестве агрегированной меры потенциального воздействия земель, нарушенных при горнопромышленном освоении, на окружающую природную среду для отдельных участков нарушенных земель было использовано произведение площади данного участка нарушенных земель (в м^2) на показатель его геоморфологической опасности. В дальнейшем полученные значения показателя для отдельных участков месторождений могут быть агрегированы для получения комплексной характеристики любых территориальных выделов, к примеру, речных бассейнов или административных районов. В рамках настоящей статьи приведен пример применения методики, где агрегация значений выполнена для муниципальных образований БПТ. Получаемое значение интегрального показателя может рассматриваться как характеристика совокупной эколого-геоморфологической опасности земель, нарушенных при горнопромышленном освоении, в границах данного муниципального образования. Такого рода оценка может быть использована при принятии административных решений по снижению опасности воздействия горнодобывающей промышленности на экологическую обстановку.

РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ МЕТОДИКИ И ОБСУЖДЕНИЕ

Фактически полученные расчетным путем значения комплексного показателя эколого-геоморфологической опасности для отдельных участков нарушенных земель БПТ изменялись в диапазоне от 1.121 до 3.396. Для удобства представления на картах диапазон значений интегрального показателя эколого-геоморфологической опасности был разбит на четыре класса, соответствующие низкой (1.00–1.75), средней (1.75–2.50), высокой (2.50–3.25) и очень высокой (3.25–4.00) степени опасности (рис. 2).

Диапазон расчетных значений интегрального показателя потенциальной эколого-геоморфологической опасности земель, нарушенных при горнопромышленном освоении (отображено качественным фоном на рис. 2), получился достаточно широким — от 2001 до 70870046 (внутри каждого муниципального образования суммировались произведения площади участка нарушенных земель на полученное для этого участка значение интегрального показателя). Для удобства представления на карте (рис. 2) весь диапазон значений итогового показателя (агрегированного внутри каждого муниципального образования) разделен на шесть промежутков. Отдельно показаны (зеленым цветом на рис. 2) муниципальные образования, в пределах которых нарушенные земли за рассматриваемый период времени (2014–2020 гг.) не выявлены (Тункинский, Муйский, Курумканский, Баунтовский эвенкийский районы и Северобайкальский городской округ Бурятии, Ольхонский район и Иркутский городской округ Иркутской области, а также Читинский район Забайкальского края).

Анализируя рейтинг регионов по значению интегрального показателя эколого-геоморфологической опасности нарушенных земель (Гнз) можно выделить группу муниципальных образований, лидирующих по значению показателя по состоянию на 2020 г. (рис. 3).

Наибольшее значение показателя эколого-геоморфологической опасности нарушенных земель по состоянию на 2020 г. характерно для Красночикийского района Забайкальского края, что объясняется широким распространением нарушенных земель в районах россыпной добычи золота. Днища речных долин, в пределах которых происходит разработка россыпных месторождений, полностью трансформированы человеком — создан комплекс антропогенных форм (насыпи, выемки, отвалы, плотины

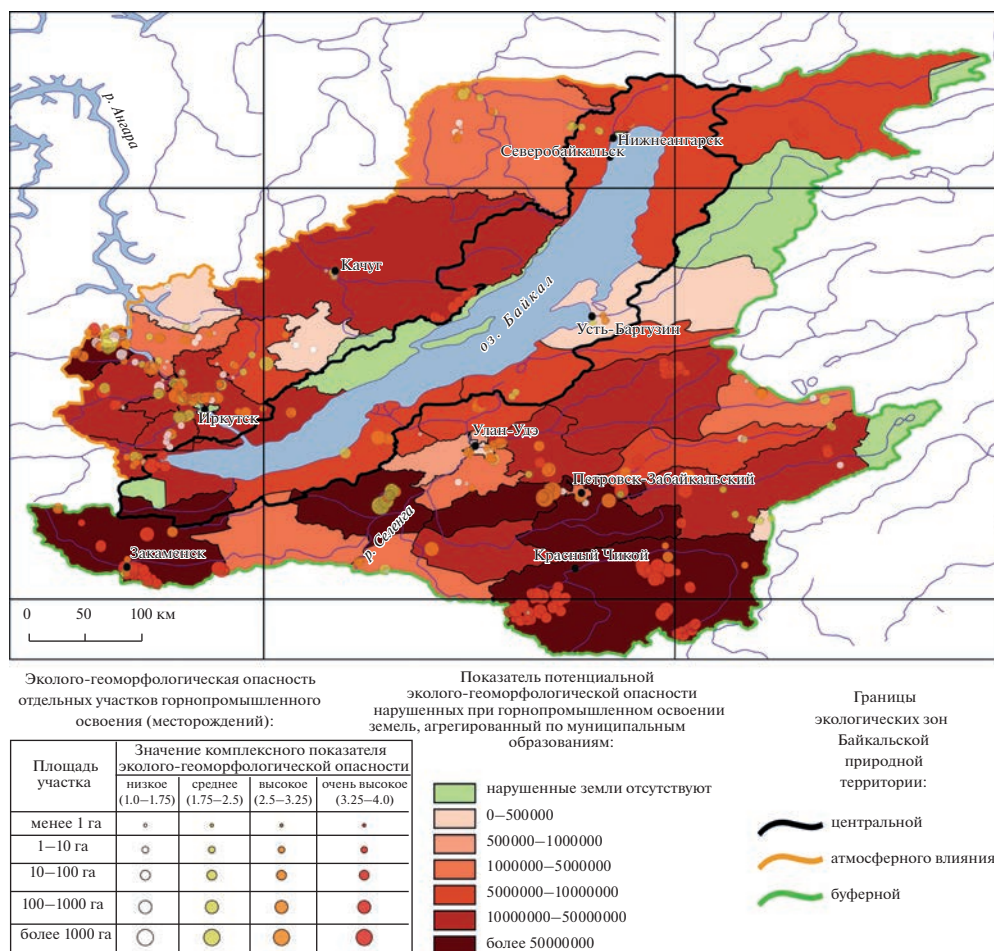
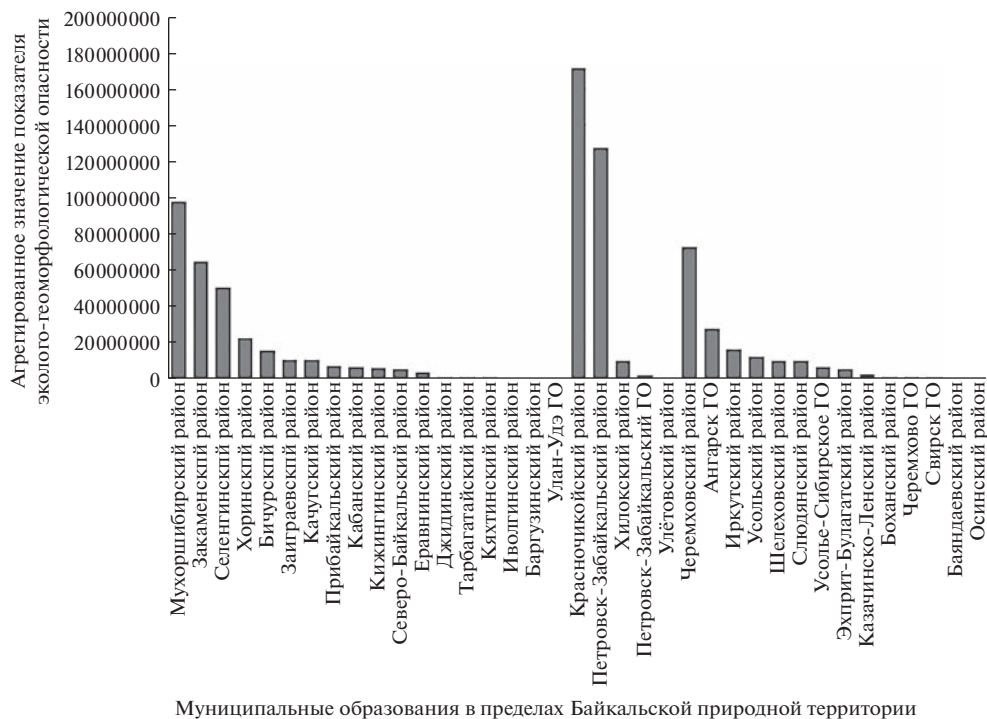


Рис. 2. Эколого-геоморфологическая опасность потенциального воздействия земель, нарушенных при добыче полезных ископаемых, на экологическое состояние Байкальской природной территории (по состоянию на 2020 год).

Fig. 2. Potential ecologo-geomorphological hazard of mining for the ecological state of the Baikal Natural Territory (as of 2020).

и пр.), естественная растительность нарушена и на отработанных участках восстанавливается крайне медленно. С поверхности в пределах нарушенных земель залегают легко размываемые песчаные грунты, содержащие широкий спектр загрязнителей, в том числе, особо опасные вещества (ртуть, углеводороды и пр.). Естественные лесные ландшафты на таких территориях соседствуют с техногенными “пустынями”, где под действием воды и ветра загрязнители мигрируют и с речным стоком способны распространяться далеко за пределы районов разработки месторождений.

Второе место по величине интегрального показателя эколого-геоморфологической опасности нарушенных земель занимает Петровск-Забайкальский район Забайкальского края, где расположены активно разрабатываемые угольные разрезы Саган-Нур,



Муниципальные образования в пределах Байкальской природной территории

Рис. 3. Рейтинг муниципальных образований по агрегированному в их границах значению интегрального показателя эколого-геоморфологической опасности нарушенных земель $\Gamma_{\text{нз}}$ (по состоянию на 2020 г.).

Fig. 3. Rating of municipalities according to the complex index of eco-geomorphological hazard of disturbed lands (as of 2020).

Зугмара и Харауз, а также Бом-Горхонское месторождение вольфрама и висмута. Третье место в рейтинге и лидирующую позицию среди муниципальных образований Бурятии занимает Мухоршибирский район, где продолжается разработка угольных месторождений Саган-Нур и Харауз. Закаменский район Бурятии, занимающий в пределах Бурятии третье место по площади нарушенных земель, по показателю геоморфологической опасности выходит на второе место в пределах субъекта (и пятое в пределах БПТ). Это связано с благоприятным для транспорта поллютантов геоморфологическим положением разрабатываемых месторождений (в днищах и на склонах речных долин, а также в приводораздельных позициях) и их высокой опасностью (тяжелые металлы, кислоты, ртуть). Кроме того, в Закаменском районе разрабатываются Инкурское и Холтосонское месторождения вольфрама (в верховьях р. Джиды) и многочисленны частично заброшенные, но не рекультивированные россыпные месторождения золота в долинах правых притоков Джиды ниже Закаменска. Среди муниципальных образований Иркутской области по показателю эколого-геоморфологической опасности нарушенных земель лидирует Черемховский район, где расположено одно из крупнейших месторождений каменного угля, он же занимает четвертое место в общем рейтинге в пределах всей БПТ по состоянию на 2020 год.

ВЫВОДЫ

Анализируя полученные результаты комплексной оценки эколого-геоморфологической опасности нарушенных при разработке полезных ископаемых земель в пределах муниципальных образований Иркутской области, Бурятии и Забайкальского края, входящих в границы БПТ, можно сделать следующие основные выводы:

1. Расчет интегрального показателя эколого-геоморфологической опасности нарушенных земель позволяет более детально охарактеризовать последствия разработки месторождений для экологической ситуации в регионе, так как учитывает не только площадь нарушенных земель, но и другие факторы, влияющие на возможность транспорта вещества и степень его экологической опасности (в частности, тип добываемого сырья, геоморфологическую позицию разрабатываемых месторождений, степень антропогенной трансформации рельефа, состав антропогенных отложений и степень рекультивации нарушенных земель).

2. Лидирующие позиции по значению интегрального показателя эколого-геоморфологической опасности нарушенных земель занимают муниципальные образования, где продолжаются ширококомасштабная добыча каменного угля (Мухоршибирский район Бурятии, Петровск-Забайкальский район Забайкальского края), руд цветных металлов (Закаменский район Бурятии, Петровск-Забайкальский район Забайкальского края) и разработка россыпных месторождений золота (Закаменский район Бурятии, Красночикойский район Забайкальского края).

3. Абсолютным лидером по площади нарушенных земель по состоянию на 2020 год в пределах БПТ является Петровск-Забайкальский район Забайкальского края (4395 га), по значению интегрального показателя эколого-геоморфологической опасности нарушенных земель по состоянию на 2020 г. лидирует Красночикойский район Забайкальского края ($\Gamma_{\text{нз}} = 171565725$). Такая смена района-лидера связана с типом разрабатываемого сырья и геоморфологической позицией разрабатываемых месторождений в Красночикойском районе – преобладают россыпные месторождения, характеризующиеся наличием особо опасных веществ (ртути, используемой при выделении полезного компонента), а также расположением в днищах долин, что благоприятно для выноса вещества (в т.ч. поллютантов) за пределы участков добычи сырья.

4. В ряде муниципальных образований Иркутской области, Бурятии и Забайкальского края значения интегрального показателя эколого-геоморфологической опасности нарушенных земель крайне низкие или вообще равны нулю (в случае отсутствия нарушенных земель по состоянию на 2020 гг.). К примеру, в пределах Бурятии значения интегрального показателя эколого-геоморфологической опасности нарушенных земель, полученные для Кяхтинского, Иволгинского, Баргузинского районов и городского округа Улан-Удэ, примерно в сто раз меньше, чем полученные для Мухоршибирского района.

Исследования выполнены в рамках договора № 8/Д-2021 “Разработка интегрированной (интегральной) оценки антропогенного воздействия и состояния окружающей среды озера Байкал” (руководитель – д.г.н., профессор, академик РАН Н.С. Касимов) и темы госзадания кафедры геоморфологии и палеогеографии № 121040100323-5 “Эволюция природной среды в кайнозой, динамика рельефа, геоморфологические опасности и риски природопользования”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абалаков А.Д., Базарова Н.Б. Картографическая оценка воздействия горнодобывающей промышленности на окружающую среду в бассейне озера Байкал // География и природные ресурсы. 2015. № 3. С. 64–73.
2. Абалаков А.Д., Базарова Н.Б. Экологические аспекты горнодобывающего производства районов экономического коридора Китай–Монголия–Россия // География и природные ресурсы. 2020. № 2. С. 42–50.

3. *Абрамов Б.Н., Эпова Э.С., Манзырев Д.В.* Геоэкологические проблемы отработки рудных месторождений золота в Восточном Забайкалье // География и природные ресурсы. 2019. № 2. С. 103–111.
4. Атлас Байкальский регион: общество и природа. Иркутск: Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения РАН, 2021. 320 с. ISBN 978-5-98797-313-4.
5. *Бабурин В.Л., Бадина С.В., Деркачева А.А., Сократов С.А., Хисматуллин Т.И., Шныпарков А.Л.* Оценка селевого риска в экономических показателях на примере Сибирского федерального округа // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2019. № 4. С. 3–14.
6. *Баженова О.И., Тюменцева Е.М., Тухта С.А.* Экстремальные фазы денудации и вопросы геоморфологической безопасности Верхнего Приангарья // География и природные ресурсы. 2016. № 3. С. 118–129.
7. *Белоцерковский М.Ю., Белякова Т.М., Беркович К.М., Гладкевич Г.И., Губанов М.Н., Зорина Е.Ф., Косарев А.Н., Ларионов Г.А., Семенченко Б.А., Чалов Р.С., Чернов А.В.* Экологическая напряженность России (факторы, их оценка и районирование) / Проблемы оценки экологической напряженности территории России: факторы, районирование. М.: Изд-во МГУ. 1993. С. 93–100.
8. *Битюкова В.Р.* Интегральная оценка экологической ситуации городов России // Региональные исследования. 2014. № 4. С. 49–57.
9. *Битюкова В.Р., Боровиков М.С.* Экологическое состояние регионов России и Казахстана: возможности измерения и факторы дифференциации // Региональные исследования. 2016. № 4 (54). С. 67–80.
10. *Бычков О.А.* Прогнозная оценка состояния геотехнических систем при освоении территорий / Кучинские чтения: материалы юбилейной научной конференции, посвященной 120-летию со дня рождения профессора М.И. Кучина. Томск: Изд-во ТГАСУ. 2007. С. 78–80.
11. *Бычков О.А., Мухина Е.М.* Методика оценки изменения состояния окружающей среды при освоении территорий Ишидеевского и Хандинского месторождений Иркутского угольного бассейна / Роговские чтения. Проблемы инженерной геологии, гидрогеологии и геоэкологии урбанизированных территорий (Матер. Всерос. Конф.). Томск. 2015. С. 99–101.
12. *Владимиров И.Н., Корытный Л.М., Плюсин В.М., Сороковой А.А.* Исследования Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН на Байкальской природной территории // География и природные ресурсы. 2016. № S5. С. 6–14.
13. *Владимиров И.Н.* Природная сущность и социальная значимость экологического потенциала геосистем // География и природные ресурсы. 2019. № S5. С. 12–18.
14. *Владимиров И.Н.* Экологический потенциал геосистем Байкальской Сибири как основа оптимизации природопользования в регионе // География и природные ресурсы. 2020. Т. 41. № S5. С. 6–13.
15. *Владимиров И.Н.* Экологический потенциал экосистем Байкальской Сибири. Диссертации на соискание ученой степени доктора географических наук. Иркутск, 2020. 409 с.
16. *Выркин В.Б., Плюсин В.М., Белозерцева И.А., Шеховцов А.И., Енущенко И.В., Захаров В.В.* Современное состояние природы и экологические проблемы Среднего Приангарья // География и природные ресурсы. 2014. № 1. С. 25–35.
17. *Грязнова В.В., Данилина А.В., Деркачева А.А., Хисматуллин Т.И., Шныпарков А.Л.* Риск землетрясений на территории России в экономических показателях // Снежные лавины, сели и оценка риска. 2020. Вып. 4. С. 100–116.
18. *Еременко Е.А., Беляев Ю.Р., Болысов С.И., Мысливец В.И., Бредихин А.В.* Новый подход к комплексной оценке рельефа для целей эффективного природопользования // Геоморфология. 2021. Т. 52. № 1. С. 19–32.
19. *Качура Р.А., Куклин А.С., Лапердин В.К., Тимофеев Н.В.* Геологические опасности и риски по нефтегазопроводам на севере о. Сахалин // Известия Иркутского гос. ун-та. Серия: Науки о Земле. 2009. Т. 2. № 1. С. 59–74.
20. *Кондрин А.Т., Косарев А.Н., Полякова А.В., Полякова Т.В.* Экологическое состояние и устойчивость к антропогенным нагрузкам морей Европейской части России / Проблемы оценки экологической напряженности Европейской территории России: факторы, районирование, последствия. М. 1996. С. 107–117.
21. *Коновалова Т.И.* Методология исследования трансформации геосистем геотектонически активных регионов // География и природные ресурсы. 2020. Т. 41. № S5. С. 14–19.
22. *Косинова И.И., Крутских Н.В.* Эколого-геологическое районирование территории г. Воронежа // Вестник Воронежского гос. ун-та. Серия: Геология. 2001. № 12. С. 205–212.
23. *Крашенинникова С.В.* К вопросу об эколого-геоморфологической оценке территории города // Изв. ПГПУ. Естественные науки. 2006. № 1 (5). С. 150–154.
24. *Кружалин В.И.* Эколого-геоморфологический анализ территории // Вестник МГУ. Сер. 5. Геогр. 1997. № 4. С. 11–15.
25. *Кузьмин С.Б.* Опасные геоморфологические процессы и риск природопользования. Новосибирск: Акад. изд-во "Гео", 2009. 195 с.
26. *Кузьмин М.И., Кузнецова А.Н.* Эколого-геологические риски развития ресурсных регионов // География и природные ресурсы. 2018. № 2. С. 5–13.
27. *Лапердин В.К., Кустов Ю.И., Качура Р.А.* Факторы природной нестабильности и техногенных рисков на территории курорта Аршан (бассейн р. Кынгари, республика Бурятия) // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2010. № 4. С. 37–45.

28. Лебедева Е.В., Шварев С.В., Готванский В.И. Природно-обусловленная напряженность геоморфологических процессов территории Дальнего Востока России // Геоморфология. № 4. 2014. С. 48–59.
29. Лопаткин Д.А. Картографирование экологической сбалансированности территории (на примере Байкальского региона) // География и природные ресурсы. 2020. Т. 41. № 55. С. 208–213.
30. Подосенова О., Сливяк В. Уголь России: влияние на окружающую среду и человека. 2013. 19 с.
31. Фролов А.А. Геоинформационное картографирование изменчивости ландшафтов (на примере Южного Прибайкалья) // География и природные ресурсы. 2015. № 1. С. 156–166.
32. Фролов А.А., Силаев А.В., Софронов А.П. Геосистемы хребта Малый Хамар-Дабан (западное Забайкалье) // География и природные ресурсы. 2021. Т. 42. № 1. С. 73–83.
33. Шныпарков А.Л., Турчанинова А.С., Хисматуллин Т.И., Сократов С.А. Селевой риск для транспортных коммуникаций территории Восточной Сибири и Дальнего Востока в середине XXI века // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции. Душанбе: ООО Промоушн. 2020. Т. 1. С. 60–73.
34. Goncharov A.V., Baturina N.S., Maryinsky V.V., Kaus A.K., Chalov S.R. Ecological assessment of the Selenga River basin, the main tributary of Lake Baikal, using aquatic macroinvertebrate communities as bioindicators // Journal of Great Lakes Research. 2020. V. 46. № 1. P. 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2019.11.005>
35. Alonso H.A., Lamata M.T. Consistency in the analytic hierarchy process: A new approach // International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems. 2006. V. 14. № 4. P. 445–459.
36. Saaty T.L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resources Allocation. McGraw-Hill, New York. 1980. 287 p.
37. Saaty T.L. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process // European Journal of Operational Research. 1990. V. 48. Iss. 1. P. 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
38. Saaty T. Relative measurement and its generalization in decision making. Why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors. The Analytic Hierarchy/Network Process // Rev. R. Acad. Cien. Serie A. Mat. 2008. V. 102 (2). P. 251–318.

Integrated Assessment of the Geomorphological Hazard of the Mining Territories within the Baikal Region

E. A. Eremenko^{1, *}, Yu. R. Belyaev^{1, **}, S. I. Bolysov^{1, ***},
A. V. Bredikhin^{1, ****}, and V. R. Bituykova^{1, *****}

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

*E-mail: eremenkoeaig@gmail.com

**E-mail: yrbel@mail.ru

***E-mail: sibol1954@bk.ru

****E-mail: avbredikhin@yandex.ru

*****E-mail: bituykova@yandex.ru

Abstract—A method for calculating the complex index of the eco-geomorphological hazard of mining territories according to their influence on the ecological situation in the Baikal region is proposed. The described approach makes it possible to characterize in detail the consequences of mining for the ecological situation in the region. The proposed assessment takes into account not only the area of disturbed lands, but also other factors affecting the possibility of transport of pollutants and the degree of their hazard (in particular, the type of raw material extracted, the geomorphological position of the mining territories, the degree of the anthropogenic transformation of landscapes, the composition of anthropogenic deposits and the degree of reclamation of disturbed lands). To test the methodology, the complex index of the eco-geomorphological hazard of lands disturbed by mining was calculated for municipalities of the Baikal region for 2020. Municipalities were ranked according to the value of the complex index and a corresponding map was compiled.

Keywords: complex index, anthropogenic relief, coal mining, alluvial gold mining, anthropogenic impact

REFERENCES

1. Abalakov A.D., Bazarova N.B. Kartograficheskaya ocenka vozdeystviya gornodobyvayushchej promyshlennosti na okruzhayushchuyu sredu v bassejne ozera Bajkal // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2015. № 3. S. 64–73.
2. Abalakov A.D., Bazarova N.B. Ekologicheskie aspekty gornodobyvayushchego proizvodstva rajonov ekonomicheskogo koridora Kitaj-Mongoliya-Rossiya // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2020. № 2. S. 42–50.
3. Abramov B.N., Epova E.S., Manzyrev D.V. Geoekologicheskie problemy otrabotki rudnykh mestorozhdenij zolota v Vostochnom Zabajkal'e // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2019. № 2. S. 103–111.
4. Atlas Bajkal'skij region: obshchestvo i priroda. Irkutsk: Institut geografii im. V.B. Sochavy Sibirskogo otdeleniya RAN, 2021. 320 s. ISBN 978-5-98797-313-4.
5. Baburin V.L., Badina S.V., Derkacheva A.A., Sokratov S.A., Hismatullin T.I., Shnyparkov A.L. Ocenka selevogo riska v ekonomicheskikh pokazatelyah na primere Sibirskogo federal'nogo okruga // *Vestnik Mosk. un-ta. Ser. 5. Geogr.* 2019. № 4. S. 3–14.
6. Bazhenova O.I., Tyumenceva E.M., Tuhta S.A. Ekstremal'nye fazy denudacii i voprosy geomorfologicheskoy bezopasnosti Verhnego Priangar'ya // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2016. № 3. S. 118–129.
7. Belocerkovskij M.YU., Belyakova T.M., Berkovich K.M., Gladkevich G.I., Gubanov M.N., Zorina E.F., Kosarev A.N., Larionov G.A., Semenchenko B.A., Chalov R.S., Chernov A.V. Ekologicheskaya napryazhennost' Rossii (faktory, ih ocenka i rajonirovanie) / *Problemy ocenki ekologicheskoy napryazhennosti territorii Rossii: faktory, rajonirovanie*. M.: Izd-vo MGU. 1993. S. 93–100.
8. Bitjukova V.R. Integral'naya ocenka ekologicheskoy situacii gorodov Rossii // *Regional'nye issledovaniya*. 2014. № 4. S. 49–57.
9. Bitjukova V.R., Borovikov M.S. Ekologicheskoe sostoyanie regionov Rossii i Kaahstana: vozmozhnosti izmereniya i faktory differenciacii // *Regional'nye issledovaniya*. 2016. № 4 (54). S. 67–80.
10. Bychkov O.A. Prognoznaya ocenka sostoyaniya geotekhnicheskikh sistem pri osvoenii territorij / *Ochenkie chteniya: materialy yubilejnoy nauchnoj konferencii, posvyashchennoj 120-letiyu so dnya rozhdeniya professora M.I. Kuchina*. Tomsk: Izd-vo TGASU. 2007. S. 78–80.
11. Bychkov O.A., Muhina E.M. Metodika ocenki izmeneniya sostoyaniya okruzhayushchej sredy pri osvoenii territorij Ishidejskogo i Handinskogo mestorozhdenij Irkutskogo ugol'nogo bassejna / *Rogovskie chteniya. Problemy inzhenernoj geologii, gidrogeologii i geoekologii urbanizirovannykh territorij* (Mater. Vseross. Konf.). Tomsk. 2015. S. 99–101.
12. Vladimirov I.N., Korytnyj L.M., Plyusnin V.M., Sorokovoj A.A. Issledovaniya Instituta geografii im. V.B. Sochavy SO RAN na Bajkal'skoj prirodnoj territorii // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2016. № 55. S. 6–14.
13. Vladimirov I.N. Prirodnaya sushchnost' i social'naya znachimost' ekologicheskogo potentsiala geosistem // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2019. № 55. S. 12–18.
14. Vladimirov I.N. Ekologicheskij potentsial geosistem Bajkal'skoj Sibiri kak osnova optimizacii prirodopol'zovaniya v regione // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2020. T. 41. № 55. S. 6–13.
15. Vladimirov I.N. Ekologicheskij potentsial ekosistem Bajkal'skoj Sibiri. Dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora geograficheskikh nauk. Irkutsk, 2020. 409 s.
16. Vyrkin V.B., Plyusnin V.M., Belozerceva I.A., Shekhovcov A.I., Enushchenko I.V., Zaharov V.V. Sovremennoe sostoyanie prirody i ekologicheskie problemy Srednego Prionon'ya // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2014. № 1. S. 25–35.
17. Gryaznova V.V., Danilina A.V., Derkacheva A.A., Hismatullin T.I., Shnyparkov A.L. Risk zemletvrasenij na territorii Rossii v ekonomicheskikh pokazatelyah // *Snezhnye laviny, seli i ocenka riska*. 2020. Vyp. 4. S. 100–116.
18. Eremenko E.A., Belyaev Y.R., Bolysov S.I., Myslivec V.I., Bredikhin A.V. Novyj podhod k kompleksnoj ocenke rel'efa dlya celej effektivnogo prirodopol'zovaniya // *Geomorfologiya*. 2021. T. 52. № 1. S. 19–32.
19. Kachura R.A., Kuklin A.S., Laperdin V.K., Timofeev N.V. Geologicheskie opasnosti i riski po neftegazoprovodam na severe o. Sahalin // *Izvestiya Irkutskogo gos. un-ta. Seriya: Nauki o Zemle*. 2009. T. 2. № 1. S. 59–74.
20. Kondrin A.T., Kosarev A.N., Polyakova A.V., Polyakova T.V. Ekologicheskoe sostoyanie i ustojchivost' k antropogennym nagruzkam morej Evropejskoj chasti Rossii / *Problemy ocenki ekologicheskoy napryazhennosti Evropejskoj territorii Rossii: faktory, rajonirovanie, posledstviya*. Moskva, 1996. S. 107–117.
21. Kononova T.I. Metodologiya issledovaniya transformacii geosistem geotektonicheski aktivnykh regionov // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2020. T. 41. № 55. S. 14–19.
22. Kosinova I.I., Krutskih N.V. Ekologo-geologicheskoe rajonirovanie territorii g. Voronezha // *Vestnik Voronezhskogo gos. un-ta. Seriya: Geologiya*. 2001. № 12. S. 205–212.
23. Krashenninnikova S.V. K voprosu ob ekologo-geomorfologicheskoy ocenke territorii goroda // *Izvestiya PGPU. Estestvennye nauki*. 2006. № 1 (5). S. 150–154.
24. Kruzhalin V.I. Ekologo-geomorfologicheskij analiz territorii // *Vestnik MGU. Ser. 5. Geogr.* 1997. № 4. S. 11–15.

25. Kuz'min S.B. Opasnye geomorfologicheskie processy i risk prirodopol'zovaniya. Novosibirsk: Akad. izd-vo "Geo", 2009. 195 s.
26. Kuz'min M.I., Kuznecova A.N. Ekologo-geologicheskie riski razvitiya resursnyh regionov // Geografiya i prirodnye resursy. 2018. № 2. S. 5–13.
27. Laperdin V.K., Kustov Yu.I., Kachura R.A. Faktory prirodnoj nestabil'nosti i tekhnogennyh riskov na territorii kurorta Arshan (bassejn r. Kyngari, respublika Buryatiya) // Zashchita okruzhayushchej srede v neftegazovom komplekse. 2010. № 4. S. 37–45.
28. Lebedeva E.V., Shvarev S.V., Gotvanskij V.I. Prirodno-obuslovlennaya napryazhennost' geomorfologicheskikh processov territorii Dal'nego Vostoka Rossii // Geomorfologiya. № 4. 2014. S. 48–59.
29. Lopatkin D.A. Kartografirovanie ekologicheskoy sbalansirovannosti territorii (na primere Bajkal'skogo regiona) // Geografiya i prirodnye resursy. 2020. T. 41. № S5. S. 208–213.
30. Podosenova O., Sliviyak V. Ugol' Rossii: vliyaniye na okruzhayushchuyu sredyu i cheloveka. 2013. 19 s.
31. Frolov A.A. Geoinformacionnoye kartografirovanie izmenchivosti landshaftov (na primere YUzhnogo Pribajkal'ya) // Geografiya i prirodnye resursy. 2015. № 1. S. 156–166.
32. Frolov A.A., Silaev A.V., Sofronov A.P. Geosistemy hrebta Malyj Hamar-Daban (zapadnoye Zabajkal'e) // Geografiya i prirodnye resursy. 2021. T. 42. № 1. S. 73–83.
33. Shnyparkov A.L., Turchaninova A.S., Hismatullin T.I., Sokratov S.A. Selevoy risk dlya transportnyh kommunikacij territorii Vostochnoj Sibiri i Dal'nego Vostoka v seredine XXI veka // Selevye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita. Trudy 6-j Mezhdunarodnoj konferencii. Dushanbe: OOO Promoushn. 2020. T. 1. S. 60–73.
34. Goncharov A.V., Baturina N.S., Maryinsky V.V., Kaus A.K., Chalov S.R. Ecological assessment of the Selenga River basin, the main tributary of Lake Baikal, using aquatic macroinvertebrate communities as bioindicators // Journal of Great Lakes Research. 2020. V. 46. № 1. P. 53–61. DOI: 10.1016/j.jglr.2019.11.005
35. Alonso H.A., Lamata M.T. Consistency in the analytic hierarchy process: A new approach // International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems. 2006. Vol. 14. № 4. P. 445–459.
36. Saaty T.L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resources Allocation. McGraw-Hill, New York. 1980. 287 p.
37. Saaty T.L. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process // European Journal of Operational Research. 1990. Vol. 48. Iss. 1. P. 9–26. [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
38. Saaty T. Relative measurement and its generalization in decision making. Why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors. The Analytic Hierarchy/Network Process // Rev. R. Acad. Cien. Serie A. Mat. 2008. Vol. 102 (2). S. 251–318.

СЕЗОННАЯ И МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ В ПЕТРОЗАВОДСКОЙ ГУБЕ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

© 2023 г. Г. Э. Здоровеннова^а, *, Р. Э. Здоровеннов^а, **,
Н. И. Пальшин^а, ***, Т. В. Ефремова^а, ****

^аИнститут водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия

*E-mail: zdorovennova@gmail.com

**E-mail: romga74@gmail.com

***E-mail: npalshin@mail.ru

****E-mail: efremova@nwpi.krc.karelia.ru

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.

После доработки 24.04.2023 г.

Принята к публикации 22.11.2023 г.

По круглогодичным измерениям температуры воды на автономной станции (заякоренной косе с температурными датчиками) изучены особенности температурного и ледового режимов Петрозаводской губы Онежского озера в современных климатических условиях, уточнены даты и продолжительность основных гидрологических явлений на акватории губы. В аномально теплую зиму 2019–2020 гг. акватория Петрозаводской губы не покрылась льдом полностью впервые за длительный период наблюдений, в районе станции измерений ледовые поля периодически наблюдались с конца января до середины марта. Продолжительность ледостава в две следующие зимы составила 3.5 и 5 мес. Получены данные о сроках начала и продолжительности весенней подледной конвекции, феномена, играющего важную роль в термическом режиме озера в конце зимы. Показано, что 2016, 2021 и 2022 гг. весеннее подледное конвективное перемешивание продолжалось 4–6.5 нед., охватывая к концу ледостава весь столб воды. Перемешивание водной толщи после взлома льда (весенняя гомотермия) продолжалось еще 3–4 нед. Весной 2020 г. подледная конвекция не наблюдалась, перемешивание в условиях открытой воды продолжалось два месяца с середины марта до середины мая. Даты перехода температуры воды через 4°C в сторону повышения в годы измерений (5–19 мая) опережали среднемноголетние на 2–3 нед. (конец мая). Термическая стратификация устанавливалась в годы измерений в период с 12 по 27 мая, раньше среднемноголетних сроков (начало июня), и существовала 3–3.5 мес. Полное перемешивание водной массы губы происходило в конце августа–начале сентября, и далее до установления льда водная толща охлаждалась в состоянии гомотермии с редкими эпизодами установления слабой стратификации. Непосредственно перед установлением льда температура воды понижалась до очень низких значений и не превышала 0.1°C по столбу воды. Период со среднесуточной температурой воды поверхностного слоя Петрозаводской губы выше 10°C продолжался в годы измерений от 121 до 144 сут.

Ключевые слова: озеро, подледная конвекция, стратификация, термический режим, ледовый режим, климатическая изменчивость, температурная коса

DOI: 10.31857/S0869607123030126, **EDN:** RRRKVK

ВВЕДЕНИЕ

Глобальные изменения климата в наибольшей степени проявляются в северных регионах мира [11]. Вследствие этих изменений в водоемах суши увеличивается температура воды, сокращается продолжительность ледостава, в глубоких озерах усиливается летняя температурная стратификация [17, 18].

Изменения термического режима озер и ледовой фенологии отражаются на кислородном режиме [15] и состоянии сообществ озер северных широт, где сезонность — основное явление в годовом цикле планктона. В озерах происходят заметные сдвиги в пищевых цепях между фито- и зоопланктоном из-за различной чувствительности видов к весеннему потеплению [20]. Подобные изменения в трофических цепях со временем могут привести к заметным экосистемным перестройкам, что определяет актуальность изучения термического и ледового режимов водоемов на фоне климатической изменчивости.

Онежское озеро — крупный глубокий водоем с весьма сложным термогидродинамическим режимом. Ежегодно на акватории Онежского озера наблюдается прохождение весеннего и осеннего термического бара, летом формируется термическая стратификация водной толщи, в конце ледостава наблюдается процесс подледного конвективного перемешивания водного столба, развиваются крупномасштабные циркуляции, сгонно-нагонные явления, сейши, внутренние волны, апвеллинги [5, 12]. По данным многолетних измерений установлены сроки и продолжительность основных гидрологических явлений в открытом плесе озера и его заливах, изучены сезонные термические циклы, получены средние многолетние характеристики распределения температуры воды на разных горизонтах в разных районах озера [5, 10].

Региональная изменчивость климата южной Карелии, которая выражается в повышении температуры воздуха во все сезоны года [6, 9], обусловила изменения ледового и термического режимов Онежского озера в течение нескольких последних десятилетий. Наблюдения за температурой воды Онежского озера проводятся на сети гидрологических постов Росгидромета, расположенных на берегах его заливов и губ (пгт Вознесенье, г. Кондопога, дер. Лонгасы, о. Маячный, г. Медвежьегорск, г. Петрозаводск). По данным гидрологического поста в Петрозаводской губе установлено сокращение периода ледостава на 20 сут. за период 1950–2009 гг. [5], обнаружено статистически значимое повышение температуры поверхностного слоя воды в месяцы с июня по октябрь на $0.02\text{--}0.044^\circ\text{C}/\text{год}$ для периода с 1953 по 2013 гг. [5]. Выявленные изменения термического и ледового режимов Петрозаводской губы обосновывают необходимость изучения изменения сроков гидрологических явлений в заливах и губах Онежского озера на фоне изменчивости регионального климата. Особую актуальность эти исследования приобретают в связи с высокой биоресурсной ценностью Онежского озера.

Сезонная изменчивость температуры открытого плеса Онежского озера, а также центральных районов заливов и губ была изучена по данным многолетних декадных наблюдений Карельской гидрометеорологической обсерватории на рейдовых вертикалях и гидрологическом разрезе [5].

В последние 30 лет объем гидрологических измерений как на акватории Онежского озера в целом, так и в Петрозаводской губе резко сократился. Измерения температуры воды открытого плеса, заливов и губ Онежского озера выполняются во время ежегодных научно-исследовательских экспедиций Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, однако проследить изменение сроков гидрологических явлений на фоне изменчивости регионального климата по данным этих измерений невозможно, так как они проводятся лишь несколько раз за сезон открытой воды, даты измерений в разные годы не совпадают. Слабо изученной остается сезонная изменчивость температуры воды заливов и губ озера в период ледостава. Исследование подледной конвекции на акватории Петрозаводской губы в марте 2015–2017 гг. прово-

дилось в рамках международного проекта “Life under ice” [21], однако даты начала этого явления в 2015 и 2017 гг. не были установлены, так как измерения проводились уже при развитой конвекции. Совершенно отсутствуют данные по изменению температуры воды в центральных глубоководных районах губы для периодов установления и взлома льда. Нет точных данных по срокам прохождения весеннего и осеннего термобара по акватории Петрозаводской губы, продолжительности весеннего и осеннего перемешивания, летней стратификации.

Для того, чтобы выявить реакцию термического и ледового режимов Петрозаводской губы Онежского озера на изменчивость регионального климата южной Карелии, силами сотрудников Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН были организованы измерения температуры воды на автономной станции в центральной глубоководной части губы в круглогодичном режиме. В октябре 2019 г. в озере была установлена автономная станция — коса с температурными датчиками. Измерения на этой станции проводятся до настоящего времени. Целью настоящей работы было изучение термического и ледового режимов Петрозаводской губы Онежского озера в современных климатических условиях, уточнение сроков основных гидрологических явлений на акватории губы по круглогодичным измерениям температуры воды на автономной станции в 2019–2022 гг. с привлечением к анализу данных измерений 2015–2017 гг., проведенных в рамках проекта “Life under ice”.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Петрозаводская губа — залив в северо-западной части Онежского озера, вытянутый с северо-запада на юго-восток. Длина губы около 14 км до Ивановских островов, ширина — около 5 км. Глубины увеличиваются от вершины к выходу из губы, достигая 30 м по центральной оси. От залива Большое Онего губа отделена Ивановскими островами и сообщается на юго-востоке с центральной частью Онежского озера проливом шириной 6–7 км и глубиной 23 м. Берега губы высокие, слабо изрезаны. Основной приток осуществляется из озера Логмозера, в которое впадает р. Шуя. Также в губу впадают реки Лососинка, Неглинка, Сельгская Речка, Студенец, Вилда, Большой и Каменный ручьи.

Автономная станция в центральной части Петрозаводской губы представляет собой заякоренную косу, оснащенную датчиками температуры TR-1060 канадской фирмы RBR Ltd. Начиная с 21 октября 2019 г., коса находится в озере непрерывно круглый год; весной и осенью коса извлекается на несколько дней для снятия данных и замены элементов питания в датчиках. Датчики распределены по водному столбу так, чтобы была возможность получить информацию по температуре эпи-, мета- и гипolimниона. В разные периоды измерений количество датчиков температуры на косе изменялось от 5 до 16; в период с 26 мая по 27 ноября 2021 г. работал только один датчик, расположенный в придонном слое. Верхний датчик на косе при всех постановках заглублялся до 3.5–4.5 м в целях сохранности всей косы (табл. 1). В анализе также использовались данные, полученные весной 2016 г. в рамках проекта “Life under ice”, когда проводились измерения температуры на косе с 13 марта по 6 июня 2016 г. в том же районе губы (рис. 1, точка 1). Дискретность измерений во все годы составляла одну минуту. Анализ данных автономной станции позволил уточнить для акватории Петрозаводской губы сроки и продолжительность основных гидрологических явлений: установления и взлома льда, весенней подледной конвекции, весеннего и осеннего перемешивания, летней стратификации. По данным измерений на одной вертикали невозможно проследить прохождение термического бара по акватории губы, но даты перехода температуры воды через 4°C в сторону повышения и понижения, оцененные по данным автономной станции, дают представление о сроках этого явления; для полноценного анализа прохождения термического бара требуются измерения на разрезе

Таблица 1. Периоды и глубины измерений автономной станции в центральной части Петрозаводской губы Онежского озера в 2016 и 2019–2022 гг.

Table 1. Periods and depths of measurements by an autonomous station in the central part of the Petrozavodsk Bay of Lake Onega in 2016 and 2019–2022

Период измерений	Глубина станции, м	Количество датчиков, глубины измерений, м
13 марта–6 июня 2016 г.	26.0	8 датчиков: 4.6, 5.5, 9.5, 13.5, 17.5, 21.5, 25.4, 26.0
21 октября 2019 г.–2 июля 2021 г.	19.5	6 датчиков: 3.5, 7.0, 11.0, 15.0, 18.5, 19.5
26 мая–27 ноября 2021 г.	19.5	1 датчик: 18.5
27 ноября 2021 г.–13 мая 2022 г.	19.5	5 датчиков: 3.5, 7.0, 11.0, 15.0, 19.5
14 мая 2022 г.–13 октября 2022 г.	20.0	16 датчиков: от 4.5 до 19.5 м через 1 м
21 октября 2022 г.–июнь 2023 (план)	20.0	16 датчиков: от 4.5 до 19.5 м через 1 м

или на нескольких вертикалях. В качестве критерия установления стратификации на акватории губы рассматривалось достижение разницы температуры в один и два градуса по водному столбу, как предлагается в ряде исследований [13, 14].

Анализ погодных условий района исследований был проведен по данным метеостанции (МС) Петрозаводск за 2015–2022 гг., данные получены на ресурсе открытого доступа “Расписание погоды” [8]. Наличие льда на акватории Петрозаводской губы уточнялось по спутниковым снимкам [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Погодные условия района исследований. В табл. 2 приведены отклонения среднемесячной температуры воздуха в 2015–2022 гг. от климатической нормы 1961–1990 гг. по метеостанции Петрозаводск. Анализ данных показал, что в 2015–2022 гг. преобладали

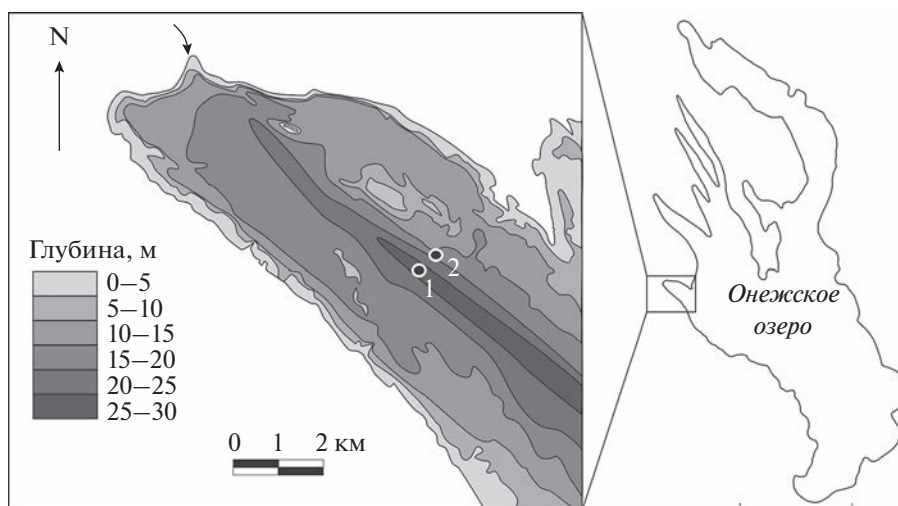


Рис. 1. Положение станции автономных измерений температуры в центральной части Петрозаводской губы Онежского озера в весенние месяцы 2016 г. (1) и в 2019–2022 гг. (2).

Fig. 1. Position of the station for autonomous temperature measurements in the central part of the Petrozavodsk Bay of Lake Onega in the spring months of 2016 (1), and in 2019–2022 (2).

Таблица 2. Отклонения среднемесячной температуры воздуха от климатической нормы 1961–1990 гг. по МС Петрозаводск в 2015–2022 гг. Жирным выделены максимальные значения отклонений в каждом месяце

Table 2. Deviations of the average monthly air temperature from the baseline 1961–1990 according to meteorological station Petrozavodsk in 2015–2022. Bold indicates the maximum values of deviations in each month

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2015	4.3	7.1	5.1	0.7	2.0	0.7	–1.8	1.5	3.0	0.2	2.6	5.9
2016	–3.5	7.5	3.2	2.0	4.3	0.7	2.4	1.3	1.2	–0.5	–1.8	3.2
2017	4.1	2.3	3.4	–1.3	–3.4	–1.8	–0.6	1.9	1.0	–0.1	2.3	5.7
2018	6.0	–1.3	–3.8	1.6	4.1	0.0	2.5	2.9	2.6	1.5	2.8	1.2
2019	2.5	5.9	2.7	2.5	0.7	3.0	–2.6	–0.6	0.8	–0.5	1.3	6.4
2020	9.4	7.1	4.3	0.0	–1.1	2.6	0.1	0.6	2.5	2.6	4.0	3.8
2021	2.3	–4.6	0.8	1.8	1.1	5.7	3.9	1.7	–1.1	2.6	1.9	–2.3
2022	3.5	5.5	2.1	0.2	–1.1	1.8	2.7	4.3	–0.6	0.2	0.6	2.2

положительные отклонения температуры, то есть, сохранялась тенденция потепления регионального климата южной Карелии во все сезоны года. Наибольшие положительные отклонения (до $+9.4^{\circ}\text{C}$) были характерны для зимних месяцев.

В аномально теплую зиму 2019–2020 гг. среднемесячная температура воздуха в ноябре–марте изменялась в пределах от -2.7 до -0.1°C , в течение 39 сут с декабря по февраль наблюдались оттепели. По температурным условиям апреля–мая выделялся теплый 2016 г. и холодный 2017 г. со средней температурой за эти месяцы 8.1 и 2.6°C соответственно. Близкими к норме или холоднее были эти месяцы в 2020 и 2022 гг. Лето 2020 г. со средней температурой июня–августа 15.6°C было заметно более холодным, чем лето 2021 и 2022 гг., со средней температурой 18.0 и 17.5°C соответственно. Лето 2021 г. было самым теплым за весь период метеонаблюдений на МС Петрозаводск. Наиболее теплой была осень 2020 г. со средней температурой сентября–октября 6.2°C ; осенние месяцы в 2021 и 2022 гг. были заметно холоднее с соответствующей температурой 4.3 и 3.9°C .

Погодные условия в годы исследований заметно отличались, что обусловило выраженные межгодовые отличия в ледовой фенологии, а также в датах и продолжительности основных гидрологических явлений на акватории Петрозаводской губы.

Предлеставный период. По данным автономной станции было установлено, что в предлеставный период водная масса Петрозаводской губы охлаждалась в состоянии гомотермии. Переход температуры воды через 4°C в сторону понижения происходил в годы измерений в середине–конце ноября (табл. 3). Весь последующий период до установления льда водная масса губы охлаждалась в состоянии гомотермии под действием ветрового перемешивания. Период охлаждения водной массы губы после перехода 4°C в сторону понижения до установления льда был наиболее длительным в зимний сезон 2019–2020 гг. и составил 83 дня; в зимние сезоны 2020–2021 и 2021–2022 гг. этот период продолжался 20 и 15 сут соответственно. Продолжительность осеннего перемешивания очень важна, поскольку в этот период происходит насыщение кислородом водной толщи и придонных слоев. К моменту установления льда температура воды во все годы наблюдений понижалась до очень низких значений (рис. 2). Непосредственно перед установлением льда температура воды на верхнем и нижнем горизонтах наблюдений составляла 0.02 и 0.05°C 31 января 2020 г., 0.01 и 0.08°C 12 января 2021 г., 0.05 и 0.11°C 7 декабря 2021 г.

Период ледостава. Согласно среднемноголетним данным, лед устанавливается в акватории Петрозаводской губы 18 декабря и существует до 9 мая [5]. Наиболее ранняя

Таблица 3. Даты перехода температуры воды через 4°C в сторону понижения осенью ($T_b < 4^\circ\text{C}$) и повышения весной ($T_b > 4^\circ\text{C}$), установления и взлома льда, установления и разрушения стратификации ($dT > 1^\circ\text{C}$) в центральной глубоководной части Петрозаводской губы Онежского озера по данным автономной станции. н/д — нет данных

Table 3. Dates of water temperature transition through 4°C downwards in autumn ($T_b < 4^\circ\text{C}$) and upwards in spring ($T_b > 4^\circ\text{C}$), ice formation (УЛ) and breakup (БЛ), establishment and destruction of stratification ($dT > 1^\circ\text{C}$) in the central deep-water part of the Petrozavodsk bay of Lake Onega according to the data of the autonomous station. н/д — no data

Зимний сезон	$T_b < 4^\circ\text{C}$	Установление льда	Взлом льда	$T_b > 4^\circ\text{C}$	$dT > 1^\circ\text{C}$
2015–2016	н/д	н/д	25.04.2016	7.05.2016	15.05.2016–н/д
2019–2020	9.11.2019	31.01.2020	22.03.2020	5–7.05.2020	23.05.2020–4.09.2020
2020–2021	27–30.11.2020	12.01.2021	20.04.2021	11.05.2021	12.05.2021–26.08.2021
2021–2022	22.11.2021	7.12.2021	3.05.2022	13–19.05.2022	27.05.2022–31.08.2022

дата установления льда в губе — 18 ноября 1993 г., наиболее поздняя — 23 января 2004 г. Наиболее ранняя дата очищения ото льда 19 апреля 2007 г., наиболее поздняя — 28 мая 1956 г.

В течение аномально теплой зимы 2019–2020 гг. в открытом плесе Онежского озера впервые за длительный период наблюдений сплошной ледовый покров не установился [4]. В январе–марте 2020 г. льдом были покрыты северные районы озера — Повенецкий залив, Великая, Горская и Уницкая губы, частично — Кондопожская губа. Также ледовые поля наблюдались вдоль восточного побережья озера. Акватория Петрозаводской губы была частично покрыта льдом в период с конца января до конца марта 2020 г. Лед установился в вершине Петрозаводской губы и вдоль ее левого берега, в то время как центр губы и акватория вдоль правого берега оставались свободными ото льда всю зиму. В районе автономной станции ледовые поля периодически появлялись с конца января до середины марта 2020 г. (табл. 3). Таким образом, ледостав на акватории Петрозаводской губы продолжался в течение двух месяцев, что заметно меньше среднемноголетних сроков. В связи с тем, что практически всю зиму сохранялся теплообмен водной массы губы с атмосферой, температура воды по столбу была очень низкой на протяжении всей зимы: до 10 февраля изменялась в пределах 0.01–0.20°C, с 10 февраля до 20 марта — 0.1–0.4°C, с 22 марта начала постепенно увеличиваться (рис. 2).

Исследования на небольших озерах Карелии в аномально теплый зимний сезон 2019–2020 гг. не выявили резкого сокращения продолжительности ледостава относительно среднемноголетних значений, но было отмечено уменьшении толщины озерного льда [3].

В зимний сезон 2020–2021 гг. лед на акватории Петрозаводской губы установился 12 января 2021 г., взлом льда произошел 20 апреля 2021 г., то есть период ледостава продолжался 3.5 мес., что заметно меньше среднемноголетних сроков. Позднее установление льда было связано с теплым осенним и раннезимним периодами, а раннее освобождение ото льда — с теплым весенним. В следующий зимний сезон ледостав продолжался близко к среднемноголетним значениям — почти пять месяцев (с 7 декабря 2021 г. по 3 мая 2022 г.), что было обусловлено холодными погодными условиями осени и весны.

Взлом льда весной 2016 г. произошел 25 апреля (табл. 3), что близко к наиболее ранней дате очищения ото льда. Теплая погода марта и апреля 2016 г. способствовала раннему сходу льда (табл. 2).

В 2016, 2021 и 2022 гг. до начала весенней подледной конвекции температура верхнего слоя воды не превышала 0.1°C. Температура придонного слоя в первые 2–3 нед.

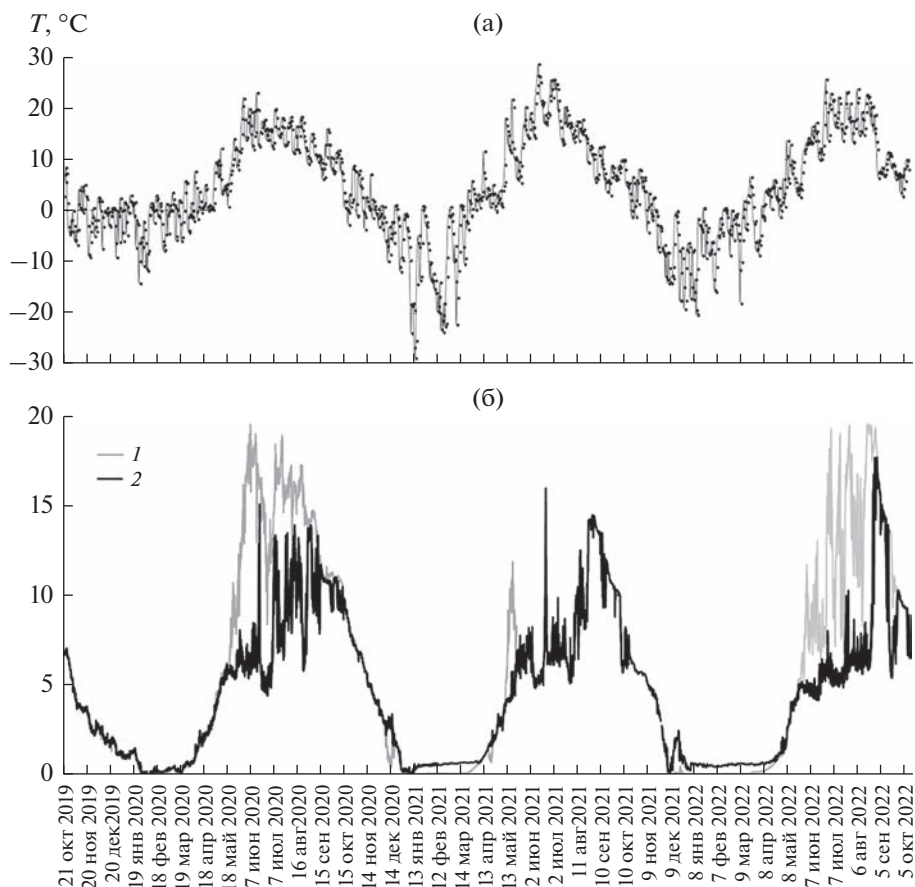


Рис. 2. Температура воздуха по МС Петрозаводск (а) и температура воды в центральной части Петрозаводской губы (б) в период с октября 2019 г. по октябрь 2022 г. 1 – верхний слой воды (глубина датчика 3.5 и 4.5 м), 2 – придонный слой (глубина датчика 18.5 и 19.5 м). Исходные данные температуры воды осреднены по 3 ч.

Fig. 2. Air temperature according to the Petrozavodsk meteorological station (a) and water temperature in the central part of the Petrozavodsk Bay (б) from October 2019 to October 2022. 1 – upper water layer (sensor depth 3.5 and 4.5 m), 2 – bottom layer (sensor depth 18.5 and 19.5 m). The water temperature data are averaged over 3 hours.

после установления льда повышалась до $0.5\text{--}0.6^\circ\text{C}$ вследствие поступления тепла из донных отложений, и затем менялась слабо вплоть до начала весенней подледной конвекции.

Весенняя подледная конвекция. С началом весеннего подледного радиационного нагрева начинается повышение температуры воды подледного слоя и формирование конвективно-перемешанного слоя. Измерения позволили установить, что конвективное перемешивание в 2016 г. началось 15 марта, в 2021 г. – 24 марта, в 2022 г. – 20 марта. Весной 2020 г. это явление не наблюдалось в районе станции измерений, так как ледовые поля периодически появлялись и исчезали, и устойчивого ледового покрова не существовало. Измерения в акватории губы в середине марта в 2015 и 2017 гг. в рамках проекта “Life under ice” проводились при уже хорошо развитой конвекции, что не

позволило установить дату начала этого явления; но можно предположить, что в эти годы конвекция началась уже в конце февраля или в первых числах марта, так как к середине марта конвективное перемешивание достигло 15–20 м [10, 12]. Такому раннему началу подледной конвекции могли способствовать теплые погодные условия января–марта в 2015 и 2017 гг., которые характеризовались превышением нормы по температуре воздуха на 2–7°C (табл. 2).

Весной 2016 г. за месяц (с середины марта до середины апреля) конвективное перемешивание достигло глубины 21.5 м, придонные слои вовлеклись в перемешивание в последние 10 дней ледостава. В 2021 г. конвекция достигла дна за 18 сут (с 24 марта по 10 апреля), и затем до взлома льда столб воды нагревался в полностью перемешанном состоянии еще в течение 10 сут. В 2022 г. конвекция достигла дна за месяц (с 20 марта до 24 апреля) и в перемешанном состоянии столб воды нагревался еще 9 сут. Продолжалась весенняя подледная конвекция в 2016 г. 40 сут, в 2021 г. — 27 сут, в 2022 г. — 43 дня. К моменту взлома льда в 2016, 2021 и 2022 гг. водная толща Петрозаводской губы была полностью перемешана, температура воды достигла 1.3–1.6°C. Радиационное нагревание покрытых льдом водоемов и подледное конвективное перемешивание играют важнейшую роль в термическом режиме озер в конце периода ледостава [10, 12]. Конвективное перемешивание способствует насыщению кислородом придонных слоев, а также может иметь важные экологические следствия для развития фитопланктона в конце периода ледостава, удерживая клетки водорослей в пределах конвективного слоя [7]. Роль вертикальных конвективных токов в переносе клеток водорослей по водному столбу исследовалась в акватории Петрозаводской губы весной 2017 г. [19]. Авторы показали, что, с одной стороны, конвективные токи способствуют удержанию клеток водорослей во взвешенном состоянии, а с другой — могут уносить их из фотической зоны, то есть, могут оказывать как стимулирующее, так и сдерживающее влияние на развитие подледного фитопланктона.

Весеннее перемешивание в условиях открытой воды. После освобождения ото льда водная толща Петрозаводской губы некоторое время остается в полностью перемешанном состоянии. Температура воды верхнего слоя постепенно повышается и, благодаря конвективному перемешиванию в диапазоне температур до 4°C, тепло перераспределяется по водному столбу. Переход температуры воды через 4°C в сторону повышения в центральной части Петрозаводской губы наблюдался в годы измерений в первую-вторую декады мая (табл. 3). Весной 2020 г. температура воды в акватории Петрозаводской губы достигла 4°C 5–7 мая, практически в те же сроки, что и весной 2016 г. и лишь на несколько суток раньше, чем в 2021 и 2022 гг. Период от исчезновения льда на акватории губы до достижения температуры 4°C в 2016, 2021 и 2022 гг. составил 10–20 сут, в 2020 г. заметно больше — 45 сут. В статье [4] указано, что прохождение термобара по акватории Петрозаводской губы весной 2020 г. произошло на 10–15 сут раньше среднемноголетних сроков (конец мая), и в качестве возможной причины этого были указаны аномально теплые погодные условия зимнего сезона 2019–2020 гг. Однако, измерения показали, что весной 2016, 2021 и 2022 гг. температура воды в акватории губы также достигла 4°C заметно раньше среднемноголетних сроков. Можно заключить, что в последние годы на фоне потепления регионального климата характерно более раннее прохождение термобара по акватории губы по сравнению со среднемноголетними сроками.

После достижения температуры воды 4°C при жаркой безветренной погоде практически сразу может установиться стратификация. Такая ситуация наблюдалась весной 2016 и 2021 гг., когда стратификация установилась уже через 1–7 сут после перехода температуры воды через 4°C в сторону повышения. Однако, при сильных ветрах и прохладной погоде водная толща губы может оставаться в перемешанном состоянии при температуре 4–6°C до 14–17 сут, что наблюдалось весной 2020 и 2022 гг. Период от взлома льда до установления летней термической стратификации занимал в 2016, 2021

и 2022 г. 3–4 нед., в то время как весной 2020 г. продолжался более двух месяцев. Увеличение продолжительности периода весенней гомотермии при более раннем сходе льда было показано также для двух небольших озер Финляндии и Карелии [2].

Продолжительность периода весенней гомотермии играет важную экологическую роль, так как этот период характеризуется активной гидродинамикой, насыщением кислородом придонных слоев, перераспределением растворенных и взвешенных веществ, биогенов по водной толще водоемов, что создает благоприятные условия для гидробионтов.

Летняя термическая стратификация. Периоды с разницей температуры по водному столбу более одного и двух градусов довольно близко совпадали для всех лет наблюдений (рис. 3). Даты установления стратификации на акватории Петрозаводской губы в годы исследований приходились на вторую–третью декады мая (табл. 3, рис. 3). В статье [4] указано, что весной 2020 г. стратификация установилась на 15–20 сут раньше среднемноголетних сроков, что авторы связывают с аномально теплыми погодными условиями зимнего сезона 2019–2020 гг. и ранним освобождением акватории губы ото льда. Однако, например, в 2016 и 2021 гг. с теплыми условиями апреля и мая стратификация установилась даже раньше, чем в 2020 и 2022 гг. с прохладными погодными условиями этих весенних месяцев (табл. 3). То есть, даты установления стратификации определяются скорее погодными условиями периода после освобождения ото льда, чем погодными условиями зимнего сезона.

Температура верхнего слоя воды (глубины 3.5–4.5 м) вследствие радиационного нагревания постепенно повышалась в годы измерений в июне–июле до 15–20°C (рис. 2, 3). В июле и августе при установлении холодной ветреной погоды периодически наблюдалось значительное уменьшение температуры верхнего слоя озера до 7–10°C, при этом стратификация становилась слабее, но водная масса не перемешивалась полностью. Температура придонного слоя в течение летних месяцев постепенно повышалась и достигала 6–9°C в конце августа. В летние месяцы всех лет наблюдений в придонных слоях водной толщи губы периодически наблюдались эпизоды резкого увеличения температуры воды с последующим возвратом к предыдущему уровню. Например, в период с 30 июня по 3 июля 2021 г. происходило повышение температуры от 5.5 до 16°C, затем в период до 5 июля температура понизилась до 6.24°C. Прохладным летом 2020 г. такие эпизоды повторялись довольно часто, а в жаркие летние месяцы 2021 и 2022 гг. наблюдались заметно реже. Возможно, что такой характер изменения температуры воды в придонном слое мог быть связан с опусканием теплой воды из поверхностного слоя вследствие конвергенции течений.

Термическая стратификация существовала на акватории губы более 3–3.5 мес. Во все годы измерений в конце августа–начале сентября происходило полное перемешивание водной толщи губы. При этом в течение нескольких дней происходило существенное увеличение температуры придонного слоя на 6–11°C (рис. 3). Например, в период с 23 и 28 августа 2022 г. температура придонного слоя увеличилась от 6.7 до 17.5°C и достигла годового максимума.

Осеннее перемешивание. Разрушение стратификации происходило в годы измерений в конце августа–начале сентября, в придонном слое при этом наблюдался резкий рост температуры воды до годового максимума 14–17°C (рис. 2, 3). На этапе осеннего охлаждения озеро находилось в состоянии гомотермии. Продолжительность периода от разрушения стратификации до установления льда составила 130 сут в осенне-зимние месяцы 2020–2021 гг. и 98 сут в 2021–2022 гг. Интересная особенность изменения температуры была характерна для этапа осеннего охлаждения. На протяжении сентября и октября всех лет наблюдений на фоне охлаждения водной массы, периодически наблюдались эпизоды более быстрого уменьшения температуры придонного слоя, по сравнению с верхним слоем (рис. 3). При этом разница температур по водному столбу

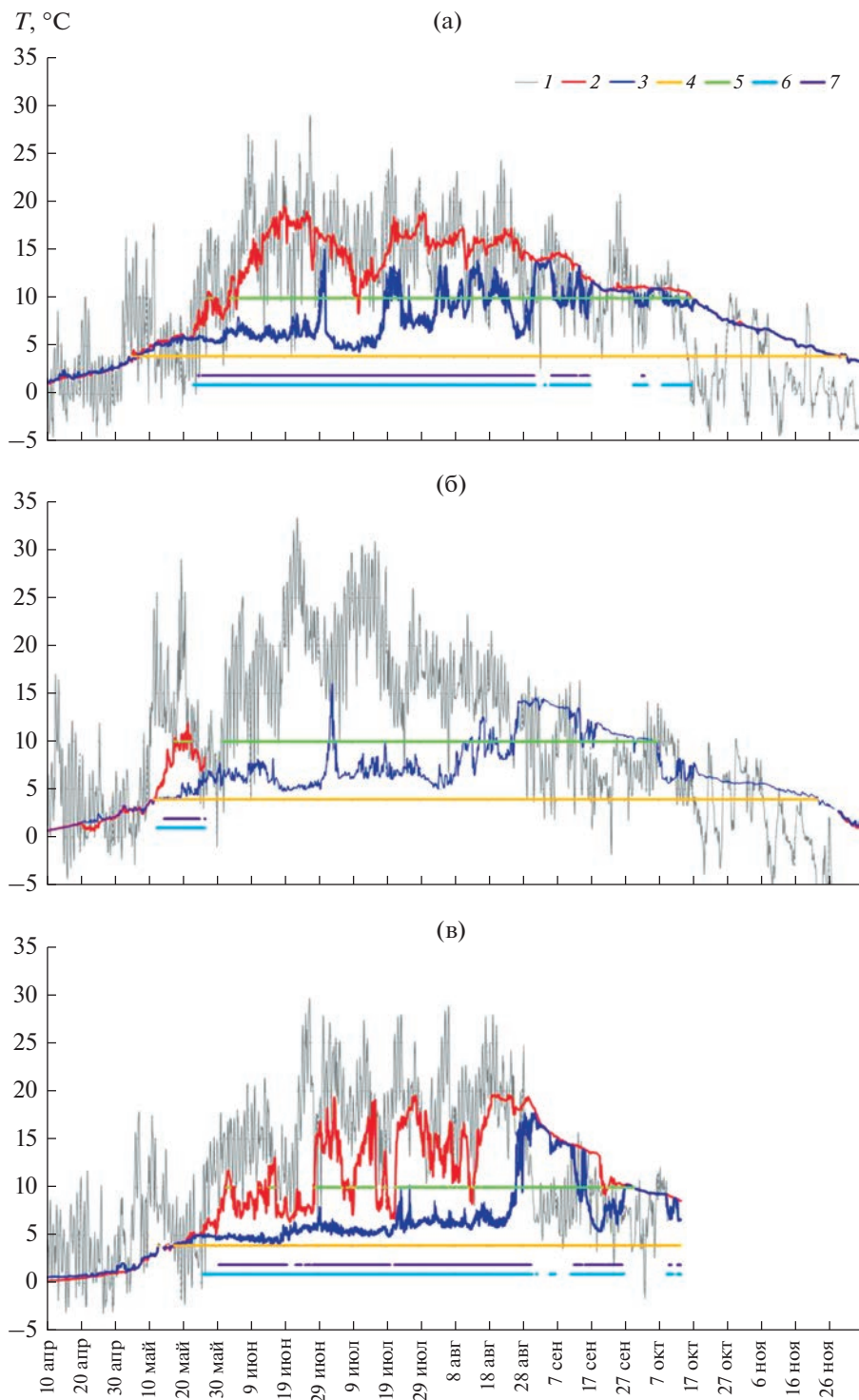


Рис. 3. Температура воздуха на МС Петрозаводск (1), температура воды верхнего (2) и придонного (3) слоев в период с 10 апреля по 5 декабря в 2020 (а), 2021 (б) и 2022 (в) гг. 4 и 5 — линии, соответствующие температуре 4 и 10°C соответственно, 6 и 7 — продолжительность периодов с разницей температуры по водному столбу более 1 и 2°C соответственно. Исходные данные температуры воды осреднены по 3 ч.

Fig. 3. Air temperature at weather station Petrozavodsk (1), water temperature of the upper (2) and bottom (3) layers from April 10 to December 5 in 2020 (a), 2021 (б) and 2022 (в), 4 and 5 — lines corresponding to temperatures of 4 and 10°C, 6 and 7 — periods with a temperature difference in the water column of more than 1 and 2°C, respectively. The water temperature data are averaged over 3 h.

могла увеличиваться до 5–6°C. Возможно, такие эпизоды резкого уменьшения температуры придонного слоя были связаны с притоком более холодных вод с мелководий.

Период с температурой воды выше 10°C. Переход температуры поверхностного слоя воды через 10°C в сторону повышения наблюдался в годы измерений с 17 мая по 1 июня, в сторону понижения — с конца сентября до второй декады октября. Таким образом, период с температурой верхнего слоя воды выше 10°C (так называемое “биологическое лето”) продолжался в 2020 г. более 140 сут и был заметно короче — 121 сут — в 2022 г., что было связано с холодными температурными условиями мая и сентября в этот год. Точно определить продолжительность этого периода для лета 2021 г. не представляется возможным, так как измерения проводились только на придонном датчике. Но если ориентироваться на температуру воздуха и показания придонного датчика температуры, то температура верхнего слоя озера могла превышать 10°C в период с начала июня до начала октября, то есть, более 120 сут. Увеличение продолжительности периода с температурой воды выше 10°C на фоне потепления регионального климата показано для ряда озер Карелии [1]. По измерениям на автономной станции пока нельзя говорить о явных тенденциях изменчивости продолжительности этого периода, можно только говорить о том, что она существенно меняется в разные годы. Стоит отметить, что важную роль в продолжительности “биологического лета” играют не только температурные условия летних месяцев, но также весенних и осенних.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По измерениям на автономной станции в центральной части акватории Петрозаводской губы Онежского озера в 2016 и 2019–2022 гг. установлены даты и продолжительность основных гидрологических явлений.

Обнаружены сдвиги сроков основных гидрологических явлений на акватории губы относительно среднееголетних значений на фоне потепления регионального климата. Зафиксировано резкое сокращение продолжительности ледостава до 2–3.5 мес. (при среднееголетнем значении 4.5 мес.) за счет более позднего установления и более раннего схода льда в годы с теплыми осенними, зимними и весенними сезонами. Даты перехода температуры воды через 4°C в сторону повышения весной (1–2 декады мая) также наблюдались раньше среднееголетних значений (конец мая). Период весеннего перемешивания в условиях открытой воды продолжался от 3–4 нед. до двух месяцев (весна 2020 г.). Существенное увеличение продолжительности весеннего перемешивания играет важную роль в функционировании озерной экосистемы и может оказывать влияние на улучшение кислородных условий в период открытой воды и перенос питательных веществ по водному столбу, создавая благоприятные условия для развития гидробионтов. Летняя стратификация в годы исследований устанавливалась в середине–конце мая раньше среднееголетних сроков (начало июня) и продолжалась более 3–3.5 мес. Увеличение продолжительности летней стратификации может негативно влиять на кислородные условия гипolimниона.

Установлено, что на этапе осеннего охлаждения водная масса Петрозаводской губы охлаждается в состоянии гомотермии, даты перехода температуры воды через 4°C в сторону понижения приходятся на середину—конец ноября. До установления льда водная масса губы остается в полностью перемешанном состоянии вследствие ветрового воздействия. Длительный период гомотермии на этапе осеннего охлаждения и в предледоставный период способствует насыщению кислородом придонных слоев, что благоприятно сказывается на кислородном режиме губы в последующий период ледостава.

Установлены некоторые характерные особенности весенней подледной конвекции: в годы с устойчивым ледоставом это явление начинается в конце февраля—середине марта и продолжается 4–6.5 нед. до взлома льда. Вследствие подледного радиационного нагревания температура воды повышается до 1.3–1.6°C к концу ледостава. Конвективное перемешивание охватывает всю водную толщу Петрозаводской губы в последние дни ледостава, что может иметь важные экологические следствия для развития фитопланктона в конце зимы и после взлома льда (насыщение кислородом придонных слоев, перенос биогенов из придонных слоев в фотическую зону, перенос клеток водорослей по водному столбу).

Выявленные изменения сроков гидрологических явлений на акватории Петрозаводской губы Онежского озера могут оказывать влияние на фенофазы в развитии планктона. Для сезонного развития фитопланктона большое значение имеет продолжительность и интенсивность весенней подледной конвекции, весеннего перемешивания в условиях открытой воды, сроки прохождения термобара и летней стратификации. Изменение сезонных циклов развития фитопланктона может привести к изменению кормовой базы глубоководного бентоса Онежского озера, в которой главную роль играет весенний диатомовый фитопланктон.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ “Карельский научный центр Российской академии наук”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефремова Т.В., Пальшин Н.И., Белашев Б.З. Температура воды разнотипных озер Карелии в условиях изменения климата (по данным инструментальных измерений 1953–2011 гг.) // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 2. С. 228–238.
2. Здорovenнова Г.Э., Гавриленко Г.Г., Здорovenнов Р.Э. и др. Эволюция температуры водной толщи бореальных озер на фоне изменений регионального климата // Известия РГО. 2017. Т. 149. Вып. 6. С. 59–74.
3. Здорovenнова Г.Э., Голосов С.Д., Пальшин Н.И. и др. Зимний термический и ледовый режимы малых озер Карелии на фоне региональной климатической изменчивости // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2022. Т. 67. № 1. С. 138–155. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.108>
4. Калинкина Н.М., Теканова Е.В., Ефремова Т.В. и др. Реакция экосистемы Онежского озера в весеннее-летний период на аномально высокую температуру воздуха зимы 2019–2020 годов // Известия РАН. Серия географическая. 2021. Т. 85. № 6. С. 888–899. <https://doi.org/10.31857/S2587556621060078>
5. Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада Европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск КарНЦ РАН, 2015. 375 с.
6. Назарова Л.Е. Климатические условия на территории Карелии // Современные исследования водоемов Севера. Учебное пособие. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2021. С. 7–16.
7. Пальшин Н.И., Здорovenнова Г.Э., Здорovenнов Р.Э. и др. Влияние весенней подледной освещенности и конвективного перемешивания на распределение хлорофилла “а” в малом мезотрофном озере // Водные ресурсы. 2019. Т. 46. № 3. С. 259–269. <https://doi.org/10.31857/S0321-0596463259-269>
8. Расписание погоды. Сайт. Rp5.ru URL: <https://rp5.ru/>. Дата обращения 15 февраля 2023 г.
9. Резников А.И., Исаченко Г.А. Изменение климатических характеристик западной части тайги Европейской России в конце XX—начале XXI вв. // Известия РГО. 2021. Т. 153. Вып. 1.

- С. 3–18.
<https://doi.org/10.31857/S0869607121010055>
10. Тихомиров А.И. Термика крупных озер. Л.: Наука, 1982. 232 с.
 11. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Росгидромет. СПб: Научно-технические технологии. 2022. 676 с.
 12. Buffard D., Zdorovenнова G., Bogdanov S. *et al.* Under-ice convection dynamics in a boreal lake // *Inland Waters*. 2019. V. 9. № 2. P. 142–161.
<https://doi.org/10.1080/20442041.2018.1533356>
 13. Desgué-Itier O., Melo Vieira Soares L., Anneville O. *et al.* Past and future climate change effects on the thermal regime and oxygen solubility of four peri-alpine lakes // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2023. V. 27. P. 837–859.
<https://doi.org/10.5194/hess-27-837-2023>
 14. Engelhardt C., Kirillin G. Criteria for the onset and breakup of summer lake stratification based on routine temperature measurements // *Fundam. Appl. Limnol.* 2014. V. 184 (3). P. 183–194.
<https://doi.org/10.1127/1863-9135/2014/0582>
 15. Jane S.F., Hansen G.J.A., Kraemer B.M. *et al.* Widespread deoxygenation of temperate lakes // *Nature*. 2021. V. 594. P. 66–70.
<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03550-y>
 16. Multimaps. Сайт. URL: <https://multimaps.ru>. Date of access 15 February 2023
 17. O'Reilly C.M. *et al.* Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe // *Geophys. Res. Lett.* 2015. 42. 24. 10773–10781.
<https://doi.org/10.1002/2015GL066235>
 18. Sharma S., Blagrove K., Magnuson J.J. *et al.* Widespread loss of lake ice around the Northern Hemisphere in a warming world // *Nat. Clim. Chang.* 2019. V. 9. № 3. P. 227–231.
<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0393-5>
 19. Suarez E., Tiffay M.-C., Kalinkina N. *et al.* Diurnal variation in the convection-driven vertical distribution of phytoplankton under ice and after ice-off in large Lake Onego (Russia) // *Inland Waters*. 2019. V. 9. № 2. P. 193–204.
<https://doi.org/10.1080/20442041.2018.1559582>
 20. Winder M., Schindler D.E. Climate Change Uncouples Trophic Interactions in an Aquatic Ecosystem // *Ecology*. 2004. V. 85. № 8. P. 2100–2106.
<https://doi.org/10.1890/04-0151>
 21. Wüest A., Pasche N., Ibelings B. *et al.* Life under ice in Lake Onego (Russia) – an interdisciplinary winter limnology study // *Inland Waters*. 2019. V. 9. № 2. P. 125–129.
<https://doi.org/10.1080/20442041.2019.1634450>

Seasonal and Inter-Annual Variability of Water Temperature in Petrozavodsk Bay of Lake Onega

G. E. Zdorovenнова^{1, *}, R. E. Zdorovenнов^{1, **}, N. I. Palshin^{1, ***}, and T. V. Efremova^{1, ****}

¹*Institute for Water Problems of the North, Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia*

**E-mail: zdorovennova@gmail.com*

***E-mail: romga74@gmail.com*

****E-mail: npalshin@mail.ru*

*****E-mail: efremova@nwpi.krc.karelia.ru*

Abstract—Based on year-round measurements of water temperature at an autonomous station (an anchored chain equipped with temperature sensors), the features of the temperature and ice regimes of the Petrozavodsk Bay of Onega Lake in modern climatic conditions were studied; the dates and duration of the main hydrological phenomena in the water area of the bay were specified. In the abnormally warm winter of 2019–2020, the water area of the Petrozavodsk Bay was not completely covered with ice for the first time in a long period of observations; in the area of the measurement station, ice fields were observed from late January to mid-March. The duration of ice-covered period in the next two winters was 3.5 and 5 months. Data were obtained on the timing of the onset and duration of the spring under-ice convection, a phenomenon that plays an important role in the thermal regime of the lake at the end of winter. It is shown that 2016, 2021 and 2022 spring under-ice convective mixing

lasted 4–6.5 weeks, covering the entire water column by the end of ice period. Mixing of the water column after breaking the ice (spring homothermy) continued for another 3–4 weeks. In the spring of 2020, under-ice convection was not observed; spring overturn continued for two months from mid-March to mid-May. The dates of the upward transition of water temperature through 4°C in the years of measurements (5–19 May) were ahead of the long-term average by 2–3 weeks (end of May). Thermal stratification was established from 12 to 27 May and existed for 3–3.5 months. Complete mixing of the water mass of the bay took place in late August–early September, and then, until ice settling, the water column cooled in a state of homothermy. Immediately before ice formation, the water temperature dropped to very low values and did not exceed 0.1°C in the water column. The period with an average daily water temperature of the surface layer of the Petrozavodsk Bay above 10°C lasted from 121 to 144 days during the years of measurements.

Keywords: lake, under-ice convection, stratification, thermal regime, ice regime, climatic variability, autonomous station, chain with temperature sensors

REFERENCES

1. Efremova T.V., Pal'shin N.I., Belashev B.Z. Water temperature in different types of lakes in Karelia under changing climate based on data of instrumental measurements in 1953–2011 // *Water Resources*. 2016. T. 43. № 2. P. 402–411.
2. Zdorovenнова G.E., Gavrilenko G.G., Zdorovenнов R.E. et al. E'voluciya temperatury vodnoj tolshhi boreal'nyh ozer na fone izmenenij regional'nogo klimata // *Izvestiya RGO*. 2017. T. 149. Vyp. 6. S. 59–74.
3. Zdorovenнова G.E., Golosov S.D., Pal'shin N.I. et al. Zimnij termicheskiy i ledovyy rezhimy malyyh ozer karelii na fore regional'noj klimaticheskoy izmenchivosti // *Vestnik Sankt-Peterburgskogo unichersiteta. Nauki o Zemle*. 2022. T. 67. № 1. S. 138–155.
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.108>
4. Kalinkina N.M., Tekanova E.V., Efremova T.V. et al. Reakciya ekosistemy Onezhskogo ozera v vesenne-letnij period na anomal'no vysokuyu temperaturu vozduxa zimy 2019–2020 godov // *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*. 2021. T. 85. № 6. S. 888–899.
<https://doi.org/10.31857/S2587556621060078>
5. Krupnejshie ozera-vodoxranilishha Severo-Zapada Evropejskoj territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie ekosistem pri klimaticheskix i antropogennyx vozdeystviyax. Petrozavodsk KarNC RAN, 2015. 375 s.
6. Nazarova L.E. Klimaticheskie usloviya na territorii Karelii // *Sovremennye issledovaniya vo doemov Severa. Uchebnoe posobie*. Petrozavodsk: KarNC RAN, 2021. S. 7–16.
7. Palshin N.I., Zdorovenнова G.E., Zdorovenнов R.E. et al. Effect of under-ice light intensity and convective mixing on chlorophyll a distribution in a small mesotrophic lake // *Water Resources*. 2019. T. 46. № 3. P. 384–394.
8. Raspisanie pogody. Sajt. RP5.ru. URL: <https://rp5.ru/>. Data obrashheniya 15 fevralya 2023 g.
9. Reznikov A.I., Isachenko G.A. Izmeneniya klimaticheskix xarakteristik zapadnoj chasti tajgi Evropejskoj Rossii v konce XX–nachale XX vv. // *Izvestiya RGO*. 2021. T. 153. Vyp. 1. S. 3–18.
<https://doi.org/10.31857/S0869607121010055>
10. Tixomirov A.I. Termika krupnyh ozer. L.: Nauka, 1982. 232 s. Tretij ocenochnyj doklad ob izmeneniyax klimata i ix posledstviyax na territorii Rossijskoj Federacii. Rosgidromet. SPb: Naukoemkie tehnologii. 2022. 676 s.
11. Tretij ocenochnyj doklad ob izmeneniyax klimata i ix posledstviyax na territorii Rossijskoj Federacii. Rosgidromet. SPb: Naukoemkie tehnologii. 2022. 676 s.
12. Bouffard D., Zdorovenнова G., Bogdanov S. et al. Under-ice convection dynamics in a boreal lake // *Inland Waters*. 2019. Vol. 9. № 2. P. 142–161.
<https://doi.org/10.1080/20442041.2018.1533356>
13. Desgué-Itier O., Melo Vieira Soares L., Anneville O. et al. Past and future climate change effects on the thermal regime and oxygen solubility of four peri-alpine lakes // *Hydrol. Earth Syst. Sci*. 2023. Vol. 27. P. 837–859.
<https://doi.org/10.5194/hess-27-837-2023>
14. Engelhardt C., Kirillin G. Criteria for the onset and breakup of summer lake stratification based on routine temperature measurements, *Fundam. Appl. Limnol*. 2014. Vol. 184 (3). P. 183–194.
<https://doi.org/10.1127/1863-9135/2014/0582>

-
15. Jane S.F., Hansen G.J.A., Kraemer B.M. et al. Widespread deoxygenation of temperate lakes // *Nature*. 2021. Vol. 594. P. 66–70.
<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03550-y>
 16. Multimaps. Сайт. URL: <https://multimaps.ru>. Date of access 15 February 2023.
 17. O'Reilly C.M. et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe // *Geophys. Res. Lett.* 2015. 42. 24. 10773–10781.
<https://doi.org/10.1002/2015GL066235>
 18. Sharma S., Blagrove K., Magnuson J.J. et al. Widespread loss of lake ice around the Northern Hemisphere in a warming world // *Nat. Clim. Chang.* 2019. Vol. 9. № 3. P. 227–231.
<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0393-5>
 19. Suarez E., Tiffay M.-C., Kalinkina N. et al. Diurnal variation in the convection-driven vertical distribution of phytoplankton under ice and after ice-off in large Lake Onego (Russia) // *Inland Waters*. 2019. Vol. 9. № 2. P. 193–204.
<https://doi.org/10.1080/20442041.2018.1559582>
 20. Winder M., Schindler D.E. Climate Change Uncouples Trophic Interactions in an Aquatic Ecosystem // *Ecology*. 2004. Vol. 85. № 8. P. 2100–2106.
<https://doi.org/10.1890/04-0151>
 21. Wüest A., Pasche N., Ibelings B. et al. Life under ice in Lake Onego (Russia) – an interdisciplinary winter limnology study // *Inland waters*. 2019. Vol. 9. № 2. P. 125–129.
<https://doi.org/10.1080/20442041.2019.1634450>

ВЛИЯНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ЛЕСОЗАГОТОВОК НА НАРУШЕНИЕ ПОЧВЫ, СОСТОЯНИЕ ЖИВОГО НАПОЧВЕННОГО ПОКРОВА И ПОСЛЕДУЮЩЕЕ ВОЗОБНОВЛЕНИЕ ДЕРЕВЬЕВ В БОРЕАЛЬНЫХ ЛЕСАХ РОССИИ

© 2023 г. А. С. Ильинцев*

Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, Архангельск, Россия

**E-mail: a.ilintsev@narfu.ru*

Поступила в редакцию 24.04.2023 г.

После доработки 26.06.2023 г.

Принята к публикации 22.11.2023 г.

Представлены материалы изучения физических свойств верхних горизонтов почвы, видового разнообразия живого напочвенного покрова и естественного возобновления деревьев на 1–15 летних вырубках. Заметное уплотнение почвы наблюдается в колеях проезда техники, преимущественно в толще почвы 0–10 см, но не в междолевойном пространстве и пасаках. Установлено, что физические свойства (плотность сложения, общая пористость и пористость аэрации) верхних горизонтов почвы зависят от возраста рубки и участка исследования ($p < 0.01$). Уплотнение почвы в колеях через 9–15 лет после рубки снижается до показателей на участках, где движение техники не осуществлялось. Заращение поврежденных участков вырубок происходит видами с широкой экологической амплитудой к экологическим факторам, а также видами рудералами и стабилизируется через 15 лет после рубки, когда уровень разнообразия приближается к нерубленным насаждениям. Возобновление вырубок идет в основном лиственными породами (осиной и березой), разрастающимися преимущественно на пасаках. В колеях и междолевых пространствах количество подраста в 2–7 раз меньше, чем на пасаках.

Ключевые слова: вырубки, лесозаготовительная техника, свойства почвы, травяно-кустарничковый ярус, подрост

DOI: 10.31857/S0869607123030072, **EDN:** NWTAMJ

ВВЕДЕНИЕ

Глобальные процессы, в том числе технологические тренды [23], изменение климата [8] и растущий спрос на лесную продукцию и услуги требуют совершенствования стратегий управления лесами [27]. Леса во всем мире играют ключевую роль в экономике, которая оказывает на лесные экосистемы все большее антропогенное давление. Лесопользование происходит в контексте динамичных систем, включая не только экологические, но и социальные и политические. В рамках научных исследований необходимо сбалансировать противоречивые требования различных слоев общества к древесным продуктам и экосистемным услугам лесных насаждений для рационального использования лесных ресурсов. Значительная доля антропогенной нагрузки приходится на лесные почвы, которые весьма чувствительны к неправильному лесопользованию [14]. Изменение свойств почвы влияет на функционирование лесных экосистем, последующее возобновление деревьев, продуктивность лесов и биологическое разнообразие [15, 17, 19, 24].

Минимальное влияние лесозаготовительных операций на лесные почвы наблюдается в зимний сезон, когда почвы промерзли и покрыты устойчивым снежным покровом [19]. Однако климатические изменения и высокий круглогодичный спрос на древесину все чаще приводит к тому, что лесозаготовки ведутся на незамерзших почвах или во влажных условиях. Проведение лесосечных работ на почвах с низкой несущей способностью допускается в летний период с трелевкой древесины по волокам, укрепленными порубочными остатками. Однако погодные условия могут быстро изменить ситуацию на делянке, что делает лесозаготовку деликатной и сложной задачей.

В настоящее время на Европейском Севере России заготовка древесины осуществляется с применением тяжелой лесозаготовительной техники круглый год, даже летом, на плохо дренируемых почвах. Эти почвы характеризуются слабым почвогенезом, литологической неоднородностью, из-за чего подвержены специфическому воздействию лесозаготовительной техники. Возникающие при этом нарушения влекут определенные экологические последствия, связанные с изменением свойств почвы. Предпосылкой данных исследований является необходимость получения точных и глубоких знаний о влиянии современных лесозаготовительных работ на определенные типы лесных почв [1]. Заполнение пробелов в научных знаниях о воздействии лесозаготовительных операций на почвы способствует решению актуальных задач их сохранения.

Цель исследования состояла в том, чтобы оценить, как и в какой степени современная лесозаготовительная техника при заготовке древесины влияет на физические свойства почвы, напочвенный покров и естественное лесовозобновление.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в лесном регионе на территории Архангельской области, где активно проводятся сплошные рубки. Объекты исследования расположены в таежной зоне (подзоне средней тайги) в которой доминирующим типом растительности являются хвойные еловые леса, также известные как бореальные леса [3]. Ельники черничные влажные широко распространены в регионе исследования и вовлекаются в хозяйственное использование. Почвы на исследуемых вырубках характеризовались как полугидроморфные (глее-подзолистые). Продуктивность исходных древостоев на этих почвах низкая, преобладали насаждения IV и V класса бонитета с примесью листовенных пород. Тип леса — ельник черничный влажный (ельник долгомошный).

Заготовка древесины на всех участках была проведена с применением многооперационных лесозаготовительных машин по скандинавской технологии в летний сезон. Разработка лесосек проводилась по узкопасечной технологии: ширина технологических коридоров составляла 4–5 м, а ширина пасек — 16–18 м. Рубка выполнялась харвестером “John Deere 1270”, а транспортировка сортиментов — форвардером “John Deere 1210”.

Интенсивность сплошных рубок составляла до 95% от исходного запаса древостоя. Для обеспечения естественного лесовозобновления при разработке лесосек оставлялись семенные деревья в количестве не менее 20 шт./га. На некоторых лесосеках оставлялись неэксплуатационные участки леса с наличием природных объектов, имеющих природоохранное значение. Для сохранения биологического разнообразия были сохранены единичные деревья, присутствующие в составе древостоя и второй ярус ели. Очистка мест рубок проводилась одновременно с заготовкой древесины путем складкой порубочных остатков на волока.

Полевые исследования провели статистико-динамическим методом, который состоит в спорадическом изучении серии сплошных вырубок (более 20) разного возраста (1–7, 9, 13, 15) и однородных по лесорастительным условиям.

На каждой вырубке заложили временные учетные площадки размером 5×5 м по трансектам через 15–20 м. Одна трансекта располагалась на технологических коридорах, где движется лесозаготовительная техника, а другая на пасаках, где не предусматривается движение техники, в соответствии с технологическими картами разработки лесосек. На каждой трансекте закладывали по 15 учетных площадок. Общее количество учетных площадок составило 30 шт. На данных площадках проводили отбор образцов почвы, оценку живого напочвенного покрова и естественного лесовозобновления.

Для определения физических свойств отбирали образцы почвы в верхних минеральных горизонтах на глубине 0–10 и 10–20 см с помощью почвенного бура объемом 52.78 см³. Отбор образцов почвы на технологических коридорах проводили отдельно для следов проезда техники (колеи) и межколейного пространства. На каждой учетной площадке собирали по 4 образца почвы. На учетных площадках, заложенных на пасаках, отбирали по 2 образца почвы. Общее количество взятых образцов на каждую рубку – 90 шт. Все образцы после сбора взвешивали на аналитических весах с точностью до 0.01 г. В лабораторных условиях образцы почвы высушили при температуре 105°C до постоянной массы. Основные физические свойства почвы (плотность сложения, общую пористость и пористость аэрации) определили в соответствии с общепринятыми методами [5].

Для анализа ценофлоры на учетных площадках провели геоботанические описания. Идентификацию выявленных видов растений проводили с использованием общеизвестных определителей и интернет определителя [6]. По заложенным учетным площадкам для каждой рубки (отдельно для волока и пасаки) составили список встречаемости сосудистых растений и мохообразных с учетом их площади проективного покрытия.

Для оценки последующего лесовозобновления выполнили сплошной перебор подраста на учетных площадках [7]. На учетных площадках, заложенных на технологических коридорах, оценивали приуроченность поселения (к колеям и межколейным пространствам). К подросту относили все древесные растения с диаметром на высоте груди (1.3 м) менее 6 см, который при учете классифицировали по древесным породам и категориям крупности. По материалам полевого учета определили количество подраста на 1 га.

Для установления связи между изучаемыми признаками провели дисперсионный, регрессионный и многомерный анализы в программах STATISTICA 12 (StatSoft) и R version 3.6.2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Физические свойства почв. В первые два года после рубки на вырубках увеличивает плотность сложения верхних горизонтов почвы, что приводит к снижению общей пористости и пористости аэрации (табл. 1). В последующие годы идет снижение плотности сложения и увеличение общей пористости и пористости аэрации. Наибольшее уплотнение наблюдается в колеях, при неоднократном проезде технических средств. Здесь ход восстановления первоначальных физических свойств идет гораздо медленней, чем на межколейном пространстве и пасаках, где не было воздействия лесозаготовительной техники.

Двухфакторный дисперсионный анализ показал, что возраст рубки и участок исследования значительно влияют на физические свойства верхних горизонтов почвы ($p < 0.01$). Таким образом, в колеях формируются критичные физические свойства, которые будут иметь различные экологические последствия для последующей лесовосстановительной сукцессии.

Видовое разнообразие живого напочвенного покрова. После сплошной рубки леса происходят сильные изменения в видовом составе напочвенного покрова (рис. 1).

Таблица 1. Физические свойства почвы на объектах исследования в зависимости от прошедшего возраста после рубки**Table 1.** Soil physical properties at the study sites, depending on the past age after logging

Возраст после рубки	Колес						Межкочейные пространства						Пасеки					
	BD, г/см ³		P, %		Pa, %		BD, г/см ³		P, %		Pa, %		BD, г/см ³		P, %		Pa, %	
	M	m	M	m	M	m	M	m	M	m	M	m	M	m	M	m	M	m
На глубине 0–10 см																		
1	1.48	0.04	43.2	1.5	10.4	0.8	1.26	0.03	50.2	1.4	13.6	1.1	1.19	0.04	52.9	1.5	15.9	1.0
2	1.57	0.05	38.4	2.0	10.2	1.2	1.33	0.04	47.8	1.5	13.6	1.6	1.31	0.04	48.5	1.6	14.2	1.3
3	1.49	0.04	40.8	1.5	8.7	1.3	1.24	0.04	51.2	1.5	12.9	1.7	1.23	0.02	52.0	0.4	13.5	0.6
4	1.45	0.02	43.0	0.9	11.3	0.9	1.26	0.07	52.1	2.5	12.6	1.5	1.21	0.03	52.0	1.3	19.8	1.8
5	1.46	0.08	42.8	3.0	11.1	1.8	1.24	0.02	52.6	0.9	18.1	1.9	1.20	0.03	41.6	3.0	17.4	1.3
6	1.48	0.04	41.9	1.7	13.7	1.7	1.27	0.06	50.0	2.5	12.6	1.6	1.28	0.02	49.9	1.0	14.1	1.6
7	1.41	0.01	46.7	0.6	11.3	0.7	1.16	0.03	54.8	0.9	19.7	1.1	1.05	0.03	55.6	2.0	20.9	2.0
9	1.29	0.04	47.5	1.7	15.5	1.1	1.16	0.06	52.7	2.5	17.3	1.5	1.17	0.04	52.1	1.8	19.2	1.2
13	1.32	0.05	48.4	2.1	10.1	1.4	1.20	0.04	53.1	1.7	16.9	1.4	1.15	0.04	54.8	2.9	21.7	2.5
15	1.39	0.07	46.6	2.5	13.5	1.2	1.18	0.04	53.7	1.5	19.1	1.1	1.19	0.03	53.7	1.1	22.5	1.0
На глубине 10–20 см																		
1	1.52	0.04	42.6	1.7	11.0	0.7	1.30	0.04	47.8	1.4	13.2	0.8	1.32	0.03	48.4	1.1	14.7	1.0
2	1.60	0.04	39.7	1.4	11.6	1.1	1.39	0.03	47.6	1.2	14.2	1.2	1.37	0.02	48.4	0.8	16.0	1.4
3	1.45	0.02	45.4	0.8	12.2	0.8	1.36	0.05	47.8	2.0	12.9	1.5	1.31	0.02	51.3	0.7	19.5	1.6
4	1.42	0.04	45.0	1.4	15.4	1.4	1.31	0.03	50.6	1.0	17.4	1.7	1.27	0.03	51.8	1.6	21.4	1.3
5	1.40	0.04	46.6	1.6	11.0	1.3	1.26	0.02	51.6	0.7	15.0	1.4	1.30	0.01	48.4	1.7	18.7	1.4
6	1.49	0.06	43.6	2.4	11.5	1.2	1.38	0.02	48.1	0.9	14.0	0.9	1.34	0.03	49.5	1.2	16.4	1.4
7	1.43	0.04	46.2	1.3	13.7	0.7	1.26	0.02	51.7	0.9	18.1	2.0	1.27	0.03	52.3	1.0	21.2	1.5
9	1.36	0.04	46.8	1.7	12.5	1.2	1.28	0.04	49.7	1.4	16.9	1.3	1.28	0.03	49.6	1.2	18.1	1.8
13	1.40	0.05	47.2	1.9	12.8	0.8	1.27	0.02	52.0	0.7	22.7	1.4	1.20	0.03	53.7	1.1	16.4	2.0
15	1.42	0.04	45.7	1.5	13.4	1.2	1.26	0.03	51.8	1.2	17.3	1.3	1.24	0.03	52.5	1.0	18.8	1.8

Обозначения: BD – плотность сложения почвы, г/см³; P – общая пористость, %; Pa – пористость аэрации, %; M – среднее значение; m – ошибка среднего, %

На части объектов исследования сильно отличается видовой состав на пасеках и волоках. Это прослеживается в первую очередь на волоках, где образовались колес с неблагоприятными физическими свойствами, которые заполнились водой, вследствие этого сформировалась значительная гетерогенность в условиях произрастания. На пасеках практически полностью сохраняется видовой состав напочвенного покрова, но с признаками стресса (изменения окраски листьев, уменьшения размера побегов и усыхания мохового покрова).

На старых вырубках отмечен наиболее гетерогенный видовой состав с видами, приуроченными к разным типам фитоценозов (лесным, луговым и нарушенным растительным сообществам). По волокам произрастает более 30 видов сосудистых растений (в коренном бореальном лесу в среднем насчитывается не более 15–20 сосудистых растений). На данном этапе сукцессии восстановления лесного фитоценоза формируется большое количество экологических ниш, что отражается на разнообразии жизненных форм.

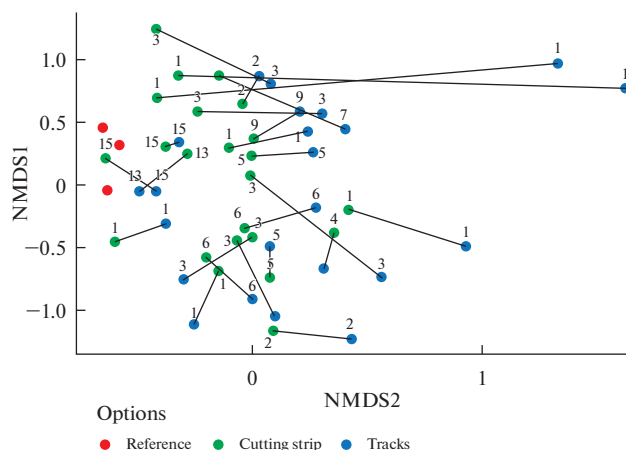


Рис. 1. Распределение объектов исследования в зависимости от прошедшего возраста после рубки и видового состава напочвенного покрова.

Fig. 1. Distribution of study sites depending on the past age after logging and the species composition of the ground cover.

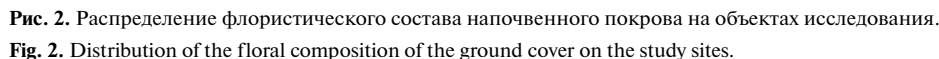
На большинстве старых вырубок еще доминируют стресс-толеранты и рудералы, такие как *Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth, *C. angustifolium* (L.) Scop, *Aegopodium podagraria* L., *Stellaria holostea* L. (рис. 2).

Кроме них уже достаточно много типичных лесных бореальных видов и луговых (*Trifolium pratense* L., *T. repens* L., *Ranunculus repens* L., *R. propinquus* C.A. Mey., *Veronica longifolia* L., *Alchemilla subcrenata* Bus, *Vicia sepium* L. и др). Так же на видовой состав на волоках и доминирование отдельных видов травяно-кустарничкового яруса влияло увлажнение субстрата (уровень залегания грунтовых вод и степень проточности). При высокой влажности, волока покрыты *Polytrichum commune* L. Bryoid. Rbh. и *Sphagnum* sp., разрастаются представители рода *Carex* и *Equisetum*.

Возобновление хвойных и лиственных деревьев. Лесовозобновительный процесс на объектах исследования проходит неравномерно, что подтверждается математическими зависимостями ($R^2 = 0.20-0.75$), и который зависит от участка вырубки (рис. 3).

Наиболее успешно естественное лесовозобновление отмечается на пасаках, где отсутствовало прямое влияние техники. В колеях и межколеяных пространствах количество подроста в 2–7 раз меньше, чем на пасаках. Такое различие объясняется тем, что в технологических коридорах складываются неблагоприятные почвенные условия в колеях для роста и развития древесных пород. Местами на этих участках наблюдаются плотные слои порубочных остатков, которые защищают почвенный покров от чрезмерного уплотнения и колеобразование, но также препятствуют, долгое время, возобновлению леса.

В большинстве случаев сплошные вырубки обеспечиваются хвойным подростом, но лиственные породы (береза и осина) имеют в данных условиях преимущество. Для них складываются благоприятные световые условия, обильное плодоношение, вегетативное размножение, быстрый рост позволяют занимать доминирующее положение. Для устранения конкуренции со стороны лиственных и сохранения хвойных пород в составе, рекомендуется вести за ними рубки осветления и прочистки с ранних стадий формирования древостоев.



При современной технологии заготовки древесины доля волоков (технологических коридоров) составляет до 30%. Именно на этих участках вырубок наблюдается повреждение почвы при транспортировке древесины груженными форвардерами. Укладывание порубочных остатков на волока в большинстве случаев позволяет избежать колееобразования и уплотнения почвы, но в тех местах, где количество порубочных остатков было недостаточно, наблюдаются глубокие колеи и высокие значения плотности сложения верхних горизонтов почвы (1.49–1.60 г/см³). Это объясняется несколькими причинами, тяжелая техника не только уплотняет почву, но и оттесняет верхние горизонты почвы, обнажая таким образом нижние минеральные горизонты обычно более высокой плотности [29]. Увеличение плотности сложения почвы, вызванное лесозаготовкой, в этом исследовании, было аналогичным или выше, чем значения, полученные в различных условиях [12, 14, 27, 31].

Большинство исследований показывают, что риск уплотнения почвы является самым высоким во влажном состоянии почвы [30, 33]. Сырая почва снижает несущую способность почв и более высокие нагрузки колес увеличивают глубину, на которой давление передается в почве, тем самым влияя на больший объем почвы. Уплотнение почвы изменяет и другие свойства [13, 19], которые влияют на функционирование почв. Нами обнаружено снижение общей пористости и пористости аэрации, которые напрямую зависят от плотности сложения. Так в колеях общая пористость находится на уровне 40%, что ниже чем на пасаках, где значения составляют более 50%. Снижение общей пористости предполагает ограничения в кислороде и водоснабжении для почвенных микроорганизмов и растений, с негативными последствиями для экологии почвы и продуктивности лесов [14]. Пористость аэрации в колеях составляет на

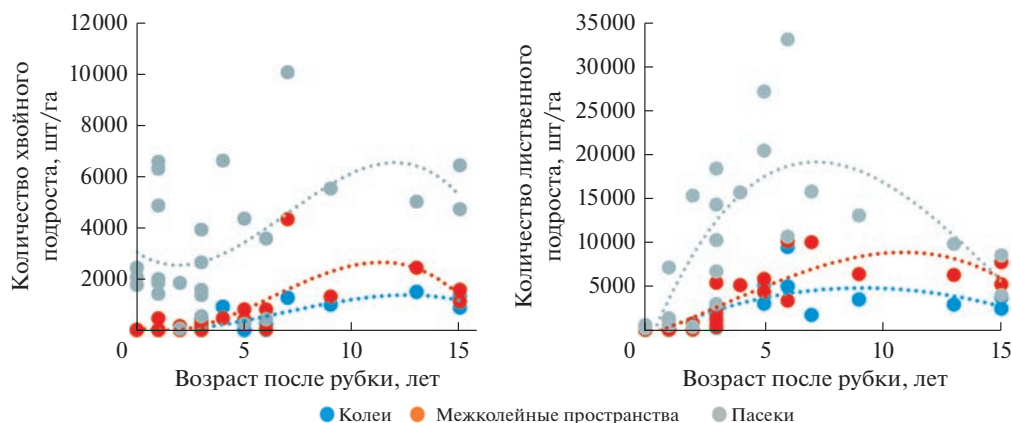


Рис. 3. Распределение количества подроста на объектах исследования в зависимости от прошедшего возраста после рубки.

Fig. 3. Distribution of the amount of undergrowth on the study sites, depending on the past age after logging.

уровне 8.7–15.5%, которая может оказать негативное влияние на функционирование корней растений. Как правило, корни растений функционируют на уровне кислорода более 10% [21, 26]. Полученные данные согласуются с данными полученными на вырубках в условиях таежной зоны [10]. Исследования различных авторов показывают, что большое значение для анализа процессов восстановления почвенного покрова имеет длительность периода после рубки [14, 19], что также отмечается в наших исследованиях. Восстановление растительного и почвенного покровов в местах повреждения связаны между собой. Поселение и успешный рост растительности зависит от почвенных факторов [32]. Однако темпы восстановительных сукцессий растительности и почв могут быть разными. Это связано с изменением не только физических, но и химических и биологических свойств почв, которые происходят в результате воздействия лесозаготовительной техники [1, 18, 19, 34].

Образующая гетерогенность условий, связанная с рубкой и проездом лесозаготовительной техники, влияет на состав нижних ярусов растительности, что отмечается во многих работах [2, 25, 35]. В местах проезда техники практически полностью уничтожается живой напочвенный покров, но уже через 1–2 года после рубки наблюдается внедрение новых видов. Удаление древесного полога приводит к заселению и разрастанию травянистой и злаковой растительности, включая внедрению заносных (случайных) видов [22, 28]. В большинстве описанных участков на смену доминантам зеленомошной группы леса выходят представители таких родов, как *p. Calamagrostis*, *p. Equisetum* *p. Carex* и *p. Chamaenerion*. Общее количество видов травяно-кустарничкового яруса сильно меняется на участках разных лет рубки. Это прослеживается не только в пределах колеи и междолевых пространствах, но и на пасеках. Удаление лесной подстилки в колеях, по-видимому, предоставляет возможность укорениться большему числу видов, вероятно, благодаря освобождению от конкуренции с предшествующей растительностью [16]. Неблагоприятные физические свойства, а также снижение плодородия верхнего слоя почвы из-за переноса питательных веществ после удаления живого напочвенного покрова [20], предполагает снижение конкуренции также в долгосрочной перспективе. Микроучастки оставшиеся после заготовки древесины, способствуют образованию участков с разнообразной растительностью.

Лесовозобновление на вырубках характеризуется большой неоднородностью. Прежде всего это связано с наличием колея различной глубины и захламления порубочными остатками [11, 19]. На волоках часто образуется сильно уплотненный перемешанный горизонт, состоящий из порубочных остатков и почвы, с неблагоприятными водно-физическими свойствами. По мнению различных исследователей [7, 10, 11], именно на участках с трансформированными почвами складывается наиболее неблагоприятная обстановка для лесовозобновления. Здесь плохо расселяются и хвойные, и лиственные древесные породы, а лесовозобновление нередко растягивается на 15 и более лет. Часто здесь первоначально образуются комплексы типичных пустырей, а в последующем — редин [11].

На всем рассматриваемом временном интервале, количество подроста на пасаках больше, чем на волоках. Связано это с тем, что во время рубки большая часть подроста предварительной генерации сохраняется и уже через 1–2 года после рубки мягколиственные породы активно возобновляются. Следует отметить, что данные породы менее требовательны, например, к физическим свойствам почвы, чем хвойные [19, 24]. Также на пасаках отсутствует прямое воздействие лесозаготовительной техники, которая может оказывать отрицательное влияние на последующее лесовозобновление путем изменения морфологических свойств почвы, а также ее физических, химических и биологических свойств. Ранее коллективом авторов [9] было отмечено, что на пасаках изменение физических свойств почвы в основном связано с вырубкой основного элемента древостоя, то есть с экологическими факторами лесной среды.

В таежной зоне большинство вырубок оставляется под естественное лесовозобновление. В качестве мер содействия естественному лесовозобновлению применяют оставление семенных деревьев, куртин, сохранение подроста и минерализацию поверхности почвы. Однако наши результаты, как и накопленный опыт [4, 11] показывают, что зачастую наблюдается неудовлетворительное лесовозобновление вырубок со сменой породного состава в пользу мягколиственных пород.

В рамках совершенствования системы устойчивого лесопользования [19, 23, 27] возрастает потребность в соответствующих и адаптированных методах смягчения негативных последствий лесозаготовительной техники на лесную почву. Для оперативного планирования в лесном хозяйстве должен быть разработан комплекс нормативно-рекомендательных инструментов с различными методами принятия решений. Это касается выбора системы заготовки древесины, организации лесозаготовительных работ с учетом природных особенностей, планирования сезона лесозаготовительных работ и технологии лесосечных работ, укрепления волоков порубочными остатками и др. Кроме этого, важное значение имеют технологические решения, включая подбор системы машин и механизмов, количество проездов техники по волокам, использование шин большего размера, регулирования давления в шинах, применение гусениц противоскольжения, оснащение техники компонентами навигации (GPS, ГЛОНАСС) совместно с ГИС-технологиями. Подобная система управленческих решений требует проведения комплексных научных исследований в различных регионах и типах лесорастительных условий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проведении заготовки древесины с применением системы многооперационных машин, в процессе транспортировки древесины происходит уплотнение почвы в колеях. При этом максимальное уплотнение наблюдается в первые годы после рубки. В последующие годы уплотнение почвы снижается, и к 15-ти летнему возрасту практически достигает показателей естественной почвы.

Восстановление живого напочвенного покрова на волоках происходит в течение 15-ти летнего периода после рубки. Процесс разрастания травяно-кустарничкового и

мохово-лишайникового ярусов на всех участках происходит интенсивно и способствует восстановлению почвенных свойств.

В первые годы на волоках складываются неблагоприятные условия для лесовозобновления, что связано с трансформацией почвенного покрова. Приоритет в заселении волоков часто приходится на листовые породы, что вызывает необходимость принятия решений о создании лесных культур, либо потребует проведения рубок ухода в последующем для предотвращения смены пород.

Для обеспечения качественного естественного лесовозобновления требуется при планировании и проведении лесозаготовительных работ применение мер по снижению нарушений почвенного покрова на волоках.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает искреннюю благодарность к.с.-х.н. А.П. Богданову, к.с.-х.н. А.А. Парамонову и Ю.С. Быкову за помощь в сборе полевого материала, а также д.с.-х.н. Е.Н. Наквасиной, к.с.-х.н. И.Б. Амосовой и к.б.н. А.Г. Волкову за обсуждение и интерпретацию полученных результатов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук по проекту МК-2622.2021.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дымов А.А. Влияние сплошных рубок в бореальных лесах России на почвы (обзор) // Почвоведение. 2017. № 3. С. 787–798.
2. Ильинцев А.С., Амосова И.Б., Третьяков С.В. Эколого-биологический анализ влияния различных видов рубок на структуру травяно-кустарничкового яруса черничных типов леса // Лесотехнический журнал. 2019. № 1. С. 31–43.
3. Курнаев С.Ф. Лесорастительное районирование СССР. М.: Наука, 1973. 203 с.
4. Мелехов И.С. Лесоводство. 2-е изд., доп., испр. М.: МГУЛ, 2003. 302 с.
5. Наквасина Е.Н. Агрохимические свойства почв: учеб. пособие. Архангельск: Арханг. гос. техн. ун-т, 2009. 101 с.
6. Плантариум. Растения и лишайники России и сопредельных стран: открытый онлайн атлас и определитель растений. 2007–2022. [Электронный ресурс] URL: <https://www.plantarium.ru/> (дата обращения: 28.10.2022).
7. Резников А.И., Исаченко Г.А. Изменение климатических характеристик западной части тайги Европейской России в конце XX—начале XXI вв. // Известия Русского географического общества. 2021. Т. 153. № 1. С. 3–18.
8. Побединский А.В. Изучение лесовосстановительных процессов. М.: Наука, 1966. 64 с.
9. Сабо Е.Д., Кормилицына О.В., Бондаренко В.В. Виды и динамика уплотнения и разуплотнения почв на вырубках // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. 2012. № 3 (86). С. 42–46.
10. Серый В.С., Анисеева В.А., Вялых Н.И., Кубрак Н.И. Изменение лесорастительных условий вырубок при современных лесозаготовках // Экологические исследования в лесах Европейского Севера: Сб. науч. трудов. Архангельск, 1991. С. 3–15.
11. Цветков В.Ф. Камо Грядеши (Некоторые вопросы лесоводства и лесоведения на Европейском Севере). Архангельск: Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 2000. 253 с.
12. Akay A.E., Yuksel A., Reis M., Tutus A. The impacts of ground-based logging equipment on forest soil // Polish Journal of Environmental Studies. 2007. V. 16. № 3. P. 371–376.
13. Bowd E.J., Banks S.C., Strong C.L., Lindenmayer D.B. Long-term impacts of wildfire and logging on forest soils // Nature Geoscience. 2019. V. 12. P. 113–118.
14. Cambi M., Certini G., Neri F., Marchi E. Impact of heavy traffic on forest soils: A review // Forest Ecology and Management. 2015. V. 338. P. 124–138.
15. Genikova N.V., Mamontov V.N., Kryshen A.M., Kharitonov V.A. et al. Natural Regeneration of the Tree Stand in the Bilberry Spruce Forest—Clear-Cutting Ecotone Complex in the First Post-Logging Decade // Forests. 2021. V. 12. P. 1–15.
16. Hart S.A., Chen H.Y. Understory vegetation dynamics of North American boreal forests // Critical Reviews in Plant Sciences. 2006. V. 25. № 4. P. 381–397.

17. Hattori D., Tanaka K., Irino K.O., Kendawang J.J. et al. Effects of soil compaction on the growth and mortality of planted dipterocarp seedlings in a logged-over tropical rainforest in Sarawak Malaysia // *Forest Ecology and Management*. 2013. V. 310. P. 770–776.
18. Hume A.M., Chen H.Y.H., Taylor A.R. Intensive forest harvesting increases susceptibility of northern forest soils to carbon, nitrogen and phosphorus loss // *Journal of Applied Ecology*. 2017. V. 00. P. 1–10.
19. Ilintsev A.S., Nakvasina E.N., Högbom L. Methods of Protection Forest Soils during Logging Operations (Review) // *Lesnoy Zhurnal [Russian Forestry Journal]*. 2021. № 5. P. 92–116.
20. Jansons Ā., Robalte L., Čakšs R., Matisons R. Long-term effect of whole tree biomass harvesting on ground cover vegetation in a dry Scots pine stand // *Silva Fennica*. 2016. V. 50. № 5. P. 1–8.
21. Kozłowski T.T. Soil compaction and growth of woody plants // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 1999. V. 14. P. 596–619.
22. MacLean D.A., Wein R.W. Changes in understory vegetation with increasing stand age in New Brunswick forests: species composition, cover, biomass and nutrients // *Canadian Journal of Botany*. 1977. V. 55. P. 2818–2831.
23. Marchi E., Chung W., Visser R., Abbas D. et al. Sustainable Forest Operations (SFO): A new paradigm in a changing world and climate // *Science of the Total Environment*. 2018. V. 634. P. 1385–1397.
24. Mariotti B., Hoshika Y., Cambi M., Marra E. et al. Vehicle-induced compaction of forest soil affects plant morphological and physiological attributes: A meta-analysis // *Forest Ecology and Management*. 2020. V. 462. P. 1–9.
25. Okland T., Rydgren K., Okland R.H., Storaunet K.O., Rolstad J. Variation in environmental conditions, understorey species number, abundance and composition among natural and managed *Picea abies* forest stands // *Forest Ecology and Management*. 2003. V. 177. P. 17–37.
26. Osman K.T. *Forest Soils: Properties and Management*. Springer International Publishing Switzerland, 2013. 217 p.
27. Picchio R., Mederski P.S., Tavankar F. How and How Much, Do Harvesting Activities Affect Forest Soil, Regeneration and Stands? // *Current Forestry Reports*. 2020. V. 6. P. 115–128.
28. Roberts M.R., Zhu L.X. Early response of the herba-ceous layer to harvesting in a mixed coniferous-deciduous forest in New Brunswick, Canada // *Forest Ecology and Management*. 2002. V. 155. P. 17–31.
29. Schack-Kirchner H., Fenner P.T., Hildebrand E.E. Different responses in bulk density and saturated hydraulic conductivity to soil deformation by logging machinery on a Ferralsol under native forest // *Soil Use and Management*. 2007. V. 23. № 3. P. 286–293.
30. Sirén M., Ala-Ilomäki J., Lindeman H., Uusitalo J., Kiilo K.E.K., Salmivaara A., Ryynänen A. Soil disturbance by cut-to-length machinery on mid-grained soils // *Silva Fennica*. 2019. V. 53. № 2. P. 1–24.
31. Solgi A., Naghdi R., Marchi E., Laschi A., Keivan Behjou F., Hemmati V., Masumian A. Impact Assessment of Skidding Extraction: Effects on Physical and Chemical Properties of Forest Soils and on Maple Seedling Growing along the Skid Trail // *Forests*. 2019. V. 10. № 2. P. 1–17.
32. Susnjar M., Horvat D., Seselj J. Soil compaction in timber skidding in winter conditions // *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2006. V. 27. № 1. P. 3–15.
33. Toivio J., Helmisäari H.S., Palviainen M., Lindeman H., Ala-Ilomäki J., Sirén M., Uusitalo J. Impacts of timber forwarding on physical properties of forest soils in southern Finland // *Forest Ecology and Management*. 2017. V. 405. P. 22–30.
34. Worrell R., Hampson A. The influence of some forest operations on the sustainable management of forest soils – a review // *Forestry*. 1997. V. 70. P. 61–85.
35. Zenner E.K., Kabrick J.M., Jensen R.G., Peck J.E., Grabner J.K. Responses of ground flora to a gradient of harvest intensity in the Missouri Ozarks // *Forest Ecology and Management*. 2006. V. 222. P. 326–334.

The Impact of Modern Logging on Soil Disturbance, the State of Ground Cover and the Subsequent Regeneration of Trees in Boreal Forests of Russia

A. S. Ilintsev*

Northern Research Institute of Forestry, Arkhangelsk, Russia

*E-mail: a.ilintsev@narfu.ru

Abstract—The article presents materials for studying the physical properties of the upper horizons of the soil, the species diversity of the living ground cover and the natural regeneration of trees in 1–15 years old clear-cuttings. A noticeable compaction of the soil is observed in the ruts of the passage of machines, mainly in the thickness of the soil 0–10 cm, but not in

the between ruts sand the cutting strips. We found that the physical properties (bulk density, total porosity and aeration porosity) of the upper soil horizons depend on the age of cutting and the study site ($p < 0.01$). Soil compaction in the ruts decreases 9–15 years after logging to indicators in sites where the movement of machines was not carried out. The overgrowth of damaged sections in clear-cuts occurred through ruderal species and species with wide ecological amplitudes to environmental factors. This overgrowth stabilised 15 years after logging when the biodiversity level approached untouched stands. The regeneration of clear-cuts is mainly deciduous such as birch and aspen that mainly grew in the cutting strips. In the ruts and the between ruts, the amount of undergrowth is 2–7 times less than in cutting strips.

Keywords: clear-cuts, logging machinery, soil properties, grass-shrub layer, undergrowth

REFERENCES

1. Dymov A.A. Vliyaniye sploshnykh rubok v boreal'nykh lesakh Rossii na pochvy (obzor) // *Pochvovedenie*. 2017. № 3. S. 787–798.
2. Ilintsev A.S., Amosova I.B., Tret'yakov S.V. Ekologo-biologicheskij analiz vliyaniya razlichnykh vidov rubok na strukturu travyano-kustarnichkovogo yarusy chernichnykh tipov lesa // *Lesotekhnicheskij zhurnal*. 2019. № 1. S. 31–43.
3. Kurnaev S.F. *Lesorastitel'noe rajonirovanie SSSR*. M.: Nauka, 1973. 203 s.
4. Melekhov I.S. *Lesovodstvo*. 2-e izd., dop., ispr. M.: MGUL, 2003. 302 s.
5. Nakvasina E.N. *Agrohimicheskie svoystva pochv: ucheb. posobie*. Arhangel'sk: Arhang. gos. tekhn. un-t, 2009. 101 s.
6. Plantarium. Rasteniya i lishajniki Rossii i sopredel'nykh stran: otkrytyj onlajn atlas i opredelitel' rastenij. 2007–2022. [Elektronnyj resurs] URL: <https://www.plantarium.ru/> (data obrashcheniya: 28.10.2022).
7. Pobedinskij A.V. *Izuchenie lesovosstanovitel'nykh processov*. M.: Nauka, 1966. 64 s.
8. Reznikov A.I., Isachenko G.A. *Izmenenie klimaticheskikh harakteristik zapadnoj chasti tajgi Evropejskoj Rossii v konce XX–nachale XXI vv.* // *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*. 2021. T. 153. № 1. S. 3–18.
9. Sabo E.D., Kormilicyna O.V., Bondarenko V.V. *Vidy i dinamika uplotneniya i razuplotneniya pochv na vyrubkah* // *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoj vestnik*. 2012. № 3 (86). S. 42–46.
10. Seryj V.S., Anikeeva V.A., Vyalyh N.I., Kubrak N.I. *Izmenenie lesorastitel'nykh uslovij vyrubok pri sovremennykh lesozagotovkah* // *Ekologicheskie issledovaniya v lesakh Evropejskogo Severa*: Sb. nauch. trudov. Arhangel'sk, 1991. S. 3–15.
11. Cvetkov V.F. *Kamo Gryadeshi (Nekotorye voprosy lesovodstva i lesovedeniya na Evropejskom Severe)*. Arhangel'sk: Izd-vo Arhang. gos. tekhn. un-ta, 2000. 253 s.
12. Akay A.E., Yuksel A., Reis M., Tutus A. The impacts of ground-based logging equipment on forest soil // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2007. Vol. 16, № 3. P. 371–376.
13. Bowd E.J., Banks S.C., Strong C.L., Lindenmayer D.B. Long-term impacts of wildfire and logging on forest soils // *Nature Geoscience*. 2019. Vol. 12. P. 113–118.
14. Cambi M., Certini G., Neri F., Marchi E. Impact of heavy traffic on forest soils: A review // *Forest Ecology and Management*. 2015. Vol. 338. P. 124–138.
15. Genikova N.V., Mamontov V.N., Kryshen A.M., Kharitonov V.A. et al. Natural Regeneration of the Tree Stand in the Bilberry Spruce Forest–Clear-Cutting Ecotone Complex in the First Post-Logging Decade // *Forests*. 2021. Vol. 12. P. 1–15.
16. Hart S.A., Chen H.Y. Understory vegetation dynamics of North American boreal forests // *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2006. Vol. 25. № 4. P. 381–397.
17. Hattori D., Tanaka K., Irino K.O., Kendawang J.J. et al. Effects of soil compaction on the growth and mortality of planted dipterocarp seedlings in a logged-over tropical rainforest in Sarawak Malaysia // *Forest Ecology and Management*. 2013. Vol. 310. P. 770–776.
18. Hume A.M., Chen H.Y.H., Taylor A.R. Intensive forest harvesting increases susceptibility of northern forest soils to carbon, nitrogen and phosphorus loss // *Journal of Applied Ecology*. 2017. Vol. 00. P. 1–10.
19. Ilintsev A.S., Nakvasina E.N., Högbom L. Methods of Protection Forest Soils during Logging Operations (Review) // *Lesnoj Zhurnal [Russian Forestry Journal]*. 2021. № 5. P. 92–116.
20. Jansons Ā., Robalte L., Čakšs R., Matisons R. Long-term effect of whole tree biomass harvesting on ground cover vegetation in a dry Scots pine stand // *Silva Fennica*. 2016. Vol. 50. № 5. P. 1–8.
21. Kozłowski T.T. Soil compaction and growth of woody plants // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 1999. Vol. 14. P. 596–619.

22. MacLean D.A., Wein R.W. Changes in understory vegetation with increasing stand age in New Brunswick forests: species composition, cover, biomass and nutrients // *Canadian Journal of Botany*. 1977. Vol. 55. P. 2818–2831.
23. Marchi E., Chung W., Visser R., Abbas D. et al. Sustainable Forest Operations (SFO): A new paradigm in a changing world and climate // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 634. P. 1385–1397.
24. Mariotti B., Hoshika Y., Cambi M., Marra E. et al. Vehicle-induced compaction of forest soil affects plant morphological and physiological attributes: A meta-analysis // *Forest Ecology and Management*. 2020. Vol. 462. P. 1–9.
25. Okland T., Rydgren K., Okland R.H., Storaunet K.O., Rolstad J. Variation in environmental conditions, understorey species number, abundance and composition among natural and managed *Picea abies* forest stands // *Forest Ecology and Management*. 2003. Vol. 177. P. 17–37.
26. Osman K.T. *Forest Soils: Properties and Management*. Springer International Publishing Switzerland, 2013. 217 p.
27. Picchio R., Mederski P.S., Tavankar F. How and How Much, Do Harvesting Activities Affect Forest Soil, Regeneration and Stands? // *Current Forestry Reports*. 2020. Vol. 6. P. 115–128.
28. Roberts M.R., Zhu L.X. Early response of the herbaceous layer to harvesting in a mixed coniferous-deciduous forest in New Brunswick, Canada // *Forest Ecology and Management*. 2002. Vol. 155. P. 17–31.
29. Schack-Kirchner H., Fenner P.T., Hildebrand E.E. Different responses in bulk density and saturated hydraulic conductivity to soil deformation by logging machinery on a Ferralsol under native forest // *Soil Use and Management*. 2007. Vol. 23. № 3. P. 286–293.
30. Sirén M., Ala-Ilomäki J., Lindeman H., Uusitalo J., Kiilo K.E.K., Salmivaara A., Rynänen A. Soil disturbance by cut-to-length machinery on mid-grained soils // *Silva Fennica*. 2019. Vol. 53. № 2. P. 1–24.
31. Solgi A., Naghdi R., Marchi E., Laschi A., Keivan Behjou F., Hemmati V., Masumian A. Impact Assessment of Skidding Extraction: Effects on Physical and Chemical Properties of Forest Soils and on Maple Seedling Growing along the Skid Trail // *Forests*. 2019. Vol. 10. № 2. P. 1–17.
32. Susnjarić M., Horvat D., Seselj J. Soil compaction in timber skidding in winter conditions // *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2006. Vol. 27. № 1. P. 3–15.
33. Toivio J., Helmisaari H.S., Palviainen M., Lindeman H., Ala-Ilomäki J., Sirén M., Uusitalo, J. Impacts of timber forwarding on physical properties of forest soils in southern Finland // *Forest Ecology and Management*. 2017. Vol. 405. P. 22–30.
34. Worrell R., Hampson A. The influence of some forest operations on the sustainable management of forest soils – a review // *Forestry*. 1997. Vol. 70. P. 61–85.
35. Zenner E.K., Kabrick J.M., Jensen R.G., Peck J.E., Grabner J.K. Responses of ground flora to a gradient of harvest intensity in the Missouri Ozarks // *Forest Ecology and Management*. 2006. Vol. 222. P. 326–334.

**РЕГИОНАЛЬНАЯ ДИНАМИКА ПРОМЫШЛЕННОСТИ, СЕЛЬСКОГО
ХОЗЯЙСТВА И НАСЕЛЕНИЯ В РОССИИ в 1990–2020 гг.:
ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ**

© 2023 г. Н. Н. Клюев*

Институт географии РАН, Москва, Россия

**E-mail: klyuev@igras.ru*

Поступила в редакцию 06.11.2023 г.

После доработки 10.11.2023 г.

Принята к публикации 22.11.2023 г.

Проведена группировка регионов России по типу сопряженной динамики промышленности, сельского хозяйства и населения за 1990–2020 годы, косвенно отражающей и динамику интегральной антропогенной нагрузки на природу. Выявлены зоны, наиболее сильно пораженные трансформационной депрессией, которые охватывают практически все европейское Нечерноземье, юг Восточной Сибири и Дальний Восток. А значительный прирост нагрузок отмечается на Северном Кавказе, в российской Прибалтике, субширотном ареале регионов, протянувшимся от Брянской области до Башкортостана, а также Тюменской области. Усиление нагрузки произошло прежде всего в пределах степной и лесостепной зон, в наибольшей степени трансформированных антропогенной деятельностью. В целом “давление” на природу увеличивается на хорошо освоенной территории (примерно 1/10 часть территории страны, где проживает около трети населения), а сокращается — на обширной слабоосвоенной территории (около половины территории и 1/6 населения России). Новый экологически неблагоприятный тренд в динамике нагрузок на природу — их относительный сдвиг в приморские регионы, на уязвимые к воздействиям и дефицитные в стране рекреационно привлекательные побережья атлантических морей, а также Каспийского моря. Установлено, что ухудшение экологической обстановки в регионах сильного роста нагрузок более вероятно, чем ее улучшение в регионах-лидерах их спада.

Ключевые слова: антропогенная нагрузка, промышленность, сельское хозяйство, население, российские регионы, постсоветская динамика

DOI: 10.31857/S0869607123030084, EDN: YKXIFR

ВВЕДЕНИЕ

Одна из самых важных и трудных геоэкологических задач — поиск показателей, характеризующих интегральную антропогенную нагрузку на природу. Ее решение связано с необходимостью “приведения к общему знаменателю” практически необозримого множества очень разнообразных, качественно неоднородных, зачастую несопоставимых видов антропогенных воздействий.

Многие авторы разрабатывают *интегральные индексы воздействий*, суммируя широкий спектр отдельных их видов. Примером могут служить работы В.Р. Битюковой [1 и др.]. Такой подход, несомненно, плодотворен, в особенности для анализа структуры интегральных индексов, что позволяет выявить “экологический синдром” — своеобразие региональной структуры антропогенных воздействий на фоне страны в целом. При

этом, однако, неизбежен элемент субъективности при выборе количества и состава воздействующих факторов, а также оценки их природоразрушающих потенций. Кроме того, интегральные индексы воздействий рассчитываются на базе экологической статистики, которая пока еще недостаточно подробна и качественна.

По оценкам Российского союза промышленников и предпринимателей, реальные выбросы предприятий превышают отчетные в 3–4 раза [13]. По оценкам В.И. Данилова-Данильяна, данные Государственных докладов о состоянии окружающей среды многократно расходятся с реальностью [14]. Данные о выбросах в атмосферу зачастую формируются не на основе их фиксации датчиками на предприятиях, а рассчитываются по формулам. Расчетными методами определяются и транспортные выбросы. Множество мелких предприятий совсем не отчитываются о выбросах. Общая величина выбросов, которой часто оперируют исследователи, мало информативна, поскольку токсичность разных веществ различается многократно. Так, 1 г бенз(а)пирена по токсичности эквивалентен 3 т оксида углерода [9]. Сибирские географы установили, что, например, в гг. Иркутске и Шелехове количество контролируемых сбросов сточных вод в десятки раз меньше существующих. Объем загрязненных сточных вод, по данным официальной статистики, оказался в четыре раза меньше, чем по данным специального обследования [2, с. 6].

Качество статистики окружающей среды в постсоветский период заметно ухудшилось. Количество предприятий, охваченных статистическим наблюдением, сокращается в связи с их реорганизацией, слияниями, поглощениями и банкротствами. Лишь за 2005–2018 гг. количество водопользователей, предоставляющих статистические отчеты по форме № 2-тп (водхоз), уменьшилось примерно на 40% [3]. За 1991–2016 гг. количество станций наблюдения за качеством воздуха уменьшилось с 821 до 678, а количество наблюдаемых городов — с 337 до 243. Изменяются и методики учета сбросов и выбросов, что затрудняет сопоставимость данных.

На долю так называемых “неорганизованных” источников выбросов в атмосферу (отвалов, карьеров, терриконов, официальных и незаконных свалок, мусорных полигонов, открытых складов,строек, асфальтовых покрытий, лесных и степных пожаров, печного отопления жилых домов и др.), которые не охвачены статистическим учетом, по оценкам, приходится более половины всех реальных выбросов. С диффузным загрязнением, которое никак не фиксируется, связано более 60% поступления загрязняющих веществ в водные объекты [6]. Величина нарушенных земель в районах нефтегазодобычи фиксируется лишь в пределах лицензионных участков, а, например, по данным дистанционного зондирования на Тазовском полуострове, 60% нарушенных земель располагается вне месторождений и официально не учитывается [15].

На наш взгляд, именно недоучет в официальной статистике многих источников и факторов негативных воздействий на природу служит причиной того, что несмотря на внушительный спад хозяйственной активности в стране в постсоветский период не фиксируется заметного улучшения состояния природных компонентов [4, 8, 14, 20 и др.].

В связи с неполнотой данных, содержащихся в официальной статистике окружающей среды, а также учитывая необходимость высокого уровня обобщения актуален поиск *отдельных, наиболее репрезентативных параметров-индикаторов*, имеющих интегративное значение. Так, А.Г. Исаченко [10, с. 278] в качестве интегрального косвенного показателя антропогенной нагрузки на ландшафты использует плотность населения. Плотность населения наряду с “видом использования земель” — два критерия, используемые Б.И. Кочуровым [17] для составления карт экологических ситуаций. В качестве обобщающего показателя антропогенной нагрузки используется и такой индикатор, как энергопотребление на единицу территории — производственное энергопотребление [16] и “физиологическое” (энергию, используемую на питание человека) [29].

Цель настоящего исследования — представить обобщенную картину постсоветской динамики промышленности, сельского хозяйства и населения в регионах России, косвенно характеризующей и динамику суммарной антропогенной нагрузки на природу.

Промышленность и сельское хозяйство наряду с транспортом — главные хозяйственные отрасли, трансформирующие природу (включить в анализ транспорт не позволяет отсутствие соответствующей статистики в региональном разрезе). Высокую нагрузку на природу создает и население, даже так называемого *постиндустриального общества*. На первый взгляд кажется, что от постиндустриального города — города офисов, лабораторий и торгцентров — экологический вред невелик. Но и “человеку постиндустриальному” нужна большая квартира, требующая отопления, кондиционирования, водоснабжения и канализации, много бытовой техники, как минимум, один автомобиль, дача и т.д. и, соответственно, много энергии и отходов, концентрирующихся к тому же в компактных ареалах крупных агломераций. Жизнеобеспечение человека, особенно жителя крупного города современной России связано с серьезными экологическими издержками. Так, в Москве и Санкт-Петербурге основную долю выбросов вредных веществ в атмосферу составляет личный автотранспорт, а загрязненных сточных вод — жилищно-коммунальное хозяйство [23, с. 197]. Это — экологический след населения, а не производства.

Конечно, динамика производства и населения не коррелирует напрямую с динамикой антропогенных воздействий, поскольку меняются структура хозяйства, технологии и техника, потребление населения (а значит, и их экологические характеристики) и т.д. Но динамика социально-экономических показателей может служить одним из интегральных, обобщающих индикаторов изменений антропогенной нагрузки и может использоваться для оценки этих изменений лишь *в грубом приближении, в самом общем виде*.

Постсоветская трансформация населения и хозяйства в регионах России выступает центральной темой в экономико-географической литературе последних десятилетий. Однако межрегиональным различиям в совместной динамике населения и хозяйства и экологической интерпретации этой динамики исследователи уделяют меньше внимания. В наших прежних работах подобный анализ проводился для периода на рубеже XX–XXI веков [11]. Потребовалось распространить этот опыт на все постсоветское время — российская хозяйственная жизнь и ее территориальные проявления очень изменчивы. Так, практически повсеместный спад сельскохозяйственной деятельности сменился ее ренессансом во многих регионах страны, значительные колебания объемов производства испытали нефте- и угледобывающие регионы, пришли в упадок старые и возникли новые районы разработки минеральных ресурсов и т.д.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование базируется на материалах официальной социально-экономической статистики [21, 22, 24]. Исследование охватывает все российские регионы за исключением Республики Крым и г. Севастополя, а также в отдельных случаях Чеченской Республики и Республики Ингушетия — в силу отсутствия данных. В работе использовались статистические методы: метод группировки, анализ средних величин, динамических рядов и показателей вариации. Средством анализа межрегиональных различий и визуализации его результатов выступало тематическое картографирование.

Поскольку объемы выпуска промышленной и сельскохозяйственной продукции, исчисляемые в стоимостных показателях, и численность населения лишь косвенно отражают величину антропогенной нагрузки, для геоэкологического анализа целесообразно рассматривать только наиболее существенные изменения производства и населения в регионах. Критерием значимости этих изменений служили отклонения региональных показателей от среднероссийских значений, учитывая различную их вариабель-

Таблица 1. Вариабельность индексов промышленности, сельского хозяйства и численности населения по регионам России за 1990–2020 гг. (%)**Table 1.** Variability of indices of industry, agriculture and population by regions of Russia for 1990–2020 (%)

Показатели вариации	Индексы:		
	промышленного производства (Россия = 97.7%)	производства продукции сельского хозяйства (Россия = 115.4%)	численности населения (Россия = 97.4%)
Максимум (регион)	409.7 (Ненецкий АО)	333.5 (Белгородская обл.)	172.0 (Дагестан)
Минимум (регион)	25.3 (Калмыкия)	7.1 (Чукотский АО)	30.6 (Чукотский АО)
Размах вариации	384.4	326.4	141.4
Максимум/Минимум	16.2	47.2	5.6
Коэффициент вариации, %	56.9	55.2	22.1

Составлена по данным [21, 22, 24]. Без учета данных по Республике Крым и г. Севастополю, Чеченской Республике и Республике Ингушетия, а также по четырем субъектам федерации, вошедшим в состав страны в 2022 г.

ность (табл. 1). Коэффициенты вариации региональных индексов промышленности и сельского хозяйства сопоставимы, а динамика численности населения существенно ниже, хотя отношение максимума индекса численности населения к минимуму (5.6 – Дагестан против Чукотского АО) свидетельствует о сильных межрегиональных контрастах и в динамике населения.

В 2020 г. российское промышленное производство в сопоставимых ценах все еще не достигло уровня 1990 г. (в нижней точке, в 1998 г. промышленный выпуск составлял лишь 45.8% позднесоветского), а сельское хозяйство превысило его на 15.4% (в 1998 г. оно опускалось до 55.8% от показателя 1990 г.). В грубом приближении можно утверждать, что за 30 лет в России в целом промышленная нагрузка на природу мало изменилась, а аграрная – несколько возросла.

На основе анализа рядов распределения регионов по динамике социально-экономических показателей за 1990–2020 гг. за среднероссийский уровень (Y) их изменений условно принимается:

80% < Y < 130% – для динамики промышленности и сельского хозяйства;

90% < Y < 110% – для динамики численности населения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Распределение российских регионов по динамике населения, промышленности и сельского хозяйства (а следовательно, и по изменениям антропогенной нагрузки) в 1990–2020 гг. отражено на рис. 1. Видно масштабное расслоение регионов по различным траекториям постсоветского движения с отрывом отдельных лидеров и аутсайдеров от основной массы, при этом группа регионов со среднероссийскими параметрами невелика. Обращает на себя внимание доминирование регионов с сокращающимся населением, а также то, что в регионах с падающим материальным производством (левый нижний квадрант) население не растет (исключение – Карачаево-Черкесия). Практически пустой правый нижний квадрант свидетельствует об отсутствии регионов с растущим сельским хозяйством при промышленном и демографическом спаде.

Рассмотрим сначала изменения отдельных “составляющих” суммарной нагрузки. Население, а следовательно, и демографическое давление на природу, выросло на более чем 10% в 13 регионах (в регионах Северного Кавказа, Москве, Московской, Ленинградской, Белгородской областях и др.) и сократилось более чем на 10% в 46 регионах. Обширный, почти сплошной ареал демографической депрессии локализуется в

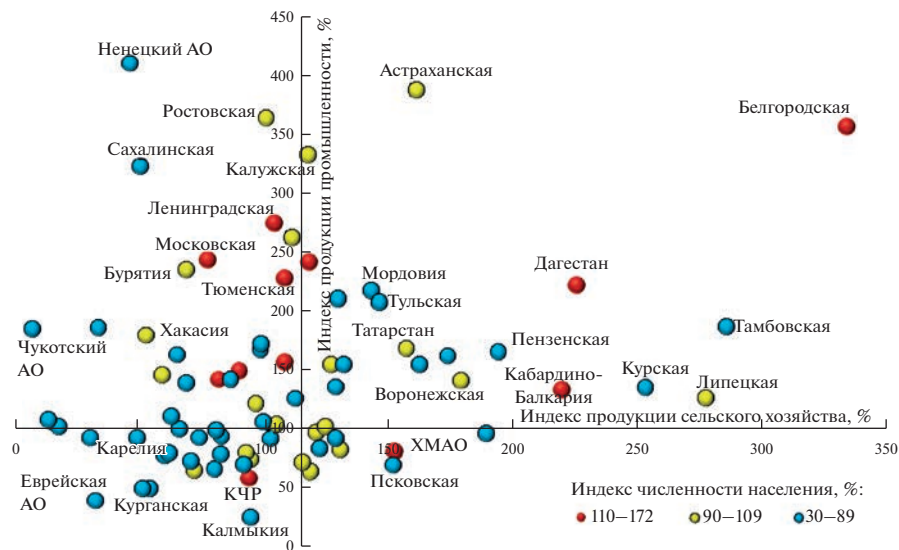


Рис. 1. Распределение регионов России по динамике промышленности, сельского хозяйства и численности населения в 1990–2020 гг. Оси отражают среднероссийские значения: индекс промышленного производства = 97.7%, индекс производства продукции сельского хозяйства = 115.4%.

Fig. 1. Distribution of Russian regions according to the dynamics of industry, agriculture and population in 1990–2020. The axes reflect the average Russian values: industrial production index = 97.7%, agricultural production index = 115.4%.

Европейской России севернее линии Курск – Саратов и на всем Дальнем Востоке. Промышленность выросла на 30% и более в 39 регионах, а в шести из них более чем втрое превысила советский уровень (в Ненецком АО, Астраханской, Ростовской, Белгородской, Калужской и Сахалинской областях). Сокращение выпуска промышленной продукции на более чем 20% фиксируется в 16 регионах, а в Калмыкии, Еврейской АО, Курганской области и Забайкальском крае современная промышленность составляет менее 50% советской.

Существенный рост продукции сельского хозяйства по сравнению с советским периодом наблюдается в 20 регионах (прежде всего в Центральном Черноземье и на Северном Кавказе), оно происходит на фоне сильного ее сокращения в европейском Нечерноземье и на Дальнем Востоке. Подчеркнем, что как значительный рост сельскохозяйственного производства, так и его существенный спад влекут за собой серьезные агроэкологические проблемы [12]. В черноземных районах ужесточается эксплуатация почвенных ресурсов, что угрожает их ускоренной деградацией – “проеданием” почвенного плодородия. В Нечерноземье же пахотные земли выводятся из хозяйственного оборота, происходит ренатурализация агроландшафтов. Но приближение почв к природно-зональному типу в климатических условиях лесной полосы также ведет к их деградации (с позиций сельского хозяйства). Ведь зональные почвы здесь малопродуктивные, их плодородие “сделано” человеком, это продукт искусственного попечения. В лесной зоне дичающие ландшафты подвергаются вторичному заболачиванию, зарастают труднопроходимой растительностью, активно идут процессы оподзолевания, осолодевания, элювиально-глеевые и др. Не только, скажем, агро-дерново-подзолистые, но и более плодородные агросерые почвы после забрасывания деградируют по гумидному типу.

Таблица 2. Группировка регионов России по динамике промышленности, сельского хозяйства и населения в 1990–2020 гг.**Table 2.** Grouping of Russian regions by the dynamics of industry, agriculture and population in 1990–2020

Группа	Подгруппа	Индексы (%):			Количество регионов	Доля в территории РФ, %	Доля в населении РФ
		промышленности	сельского хозяйства	населения			
1	1а	> 130	> 130	> 110	3	0.5	3.8
	1б	> 130	> 130	90–110	5	1.8	7.7
	1в	> 130	80–130	> 110	6	2.9	9.0
	1г	80–130	> 130	> 110	1	3.1	1.2
2		> 130	> 130	<90	11	2.5	8.8
3		> 130	<80	> 110	1	0.3	5.3
4	4а	> 130	<80	<90	7	28.0	3.9
	4б	> 130	<80	90–110	2	2.4	1.0
5	5а	<80	<80	<90	8	9.5	4.1
	5б	<80	<80	90–110	1	1.0	0.2
	5в	<80	80–130	<90	7	10.9	6.5
6	Прочие варианты				29	37.1	48.5

Примечание. Среднероссийские параметры показаны обычным шрифтом. **Жирным** шрифтом показаны параметры, превышающие среднероссийские; *курсивом* (и выделено цветом) – параметры ниже среднероссийских. В таблице не учитывались данные по Республике Крым и г. Севастополю, Чеченской Республике и Республике Ингушетия, а также по четырем субъектам федерации, вошедшим в состав страны в 2022 г.

Соотношения количества регионов сильного роста/падения изучаемых индексов показывают, что демографическая депрессия затрагивает более половины регионов страны, то же можно сказать и о промышленном ренессансе, а в сельском хозяйстве примерно в четверти регионов производство заметно выросло, а в четверти – заметно сократилось.

Расчет социально-экономических индексов позволяет провести *группировку* регионов по их постсоветской динамике, при этом прежде всего учитывались экстремальные (наибольшие и наименьшие) значения региональных индексов, namного отличающиеся от среднероссийских (табл. 2, рис. 2 – на картосхеме в целях генерализации отражены только группы регионов). Особый интерес представляют регионы, в которых произошли крупные изменения по меньшей мере двух видов нагрузок (из трех рассматриваемых – промышленной, сельскохозяйственной и демографической). Рассмотрим выделенные группы регионов.

1. Рост социально-экономических показателей, трактуемый как позитивное с экономических позиций изменение, с экологической точки зрения означает увеличение “давления” на природу.

Существенный рост и промышленных, и аграрных, и демографических нагрузок (подгруппа 1а) наблюдается в Белгородской области, Дагестане и Кабардино-Балкарии. Обращает на себя внимание, что если Белгородская область является благополучной в социально-экономическом отношении по сравнению с другими регионами, то северо-кавказские республики, наоборот, относятся к числу неблагополучных.

Рост материального производства при среднероссийской динамике населения (подгруппа 1б) отмечается в Татарстане, Башкортостане, Воронежской и Астраханской областях.

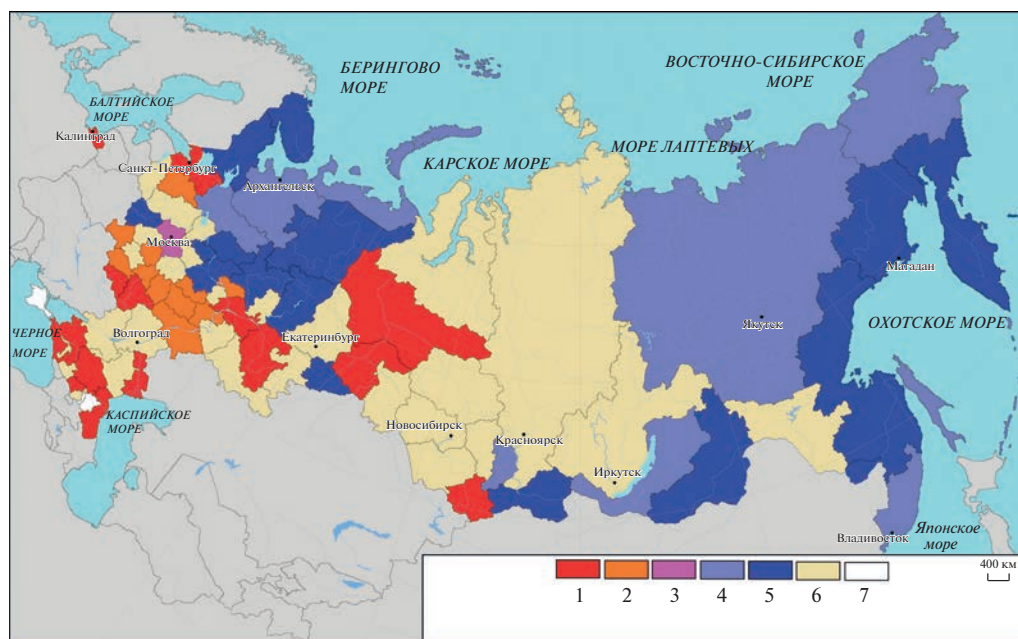


Рис. 2. Группы российских регионов по типу совокупной динамики промышленности, сельского хозяйства и населения в 1990–2020 гг. 1–6 – Группы регионов указаны в тексте и табл. 2. 7 – Нет данных.

Fig. 2. Groups of Russian regions by type of aggregate dynamics of industry, agriculture and population in 1990–2020. 1–6 – Groups of regions are indicated in the text and Tab. 2. 7 – No data.

В Ленинградской, Калининградской, Тюменской (без округов) областях, Ставропольском и Краснодарском краях и Республике Алтай (подгруппа 1в) *среднероссийская аграрная динамика сопровождается значительным ростом населения и промышленности.*

В Ханты-Мансийском АО (ХМАО) *существенный прирост населения и сельского хозяйства* происходит на фоне *среднероссийской промышленной динамики* (подгруппа 1г).

2. *Рост материального производства при сильном сокращении населения* (Тамбовская, Курская, Пензенская и др. области, всего 11 регионов). Такая динамика может быть обусловлена ростом производительности труда, появлением новых отраслей, использованием новых технологий и форм организации производства и другими факторами. Подобные региональные социально-экономические и экологические диссонансы требуют детальных развернутых обследований. Регионы данной группы образуют компактный ареал в Центральном Черноземье и на прилегающих территориях.

3. В Московской области *существенный рост промышленности и населения* произошел при *сельскохозяйственном спаде.*

4. *Промышленный рост при сокращении сельскохозяйственной деятельности и численности населения* (подгруппа 4а) (в Бурятии и Хакасии *среднероссийская динамика населения* – подгруппа 4б) наблюдается в основном в ресурсных регионах с малоблагоприятными агроклиматическими условиями.

5. В восьми регионах (Ивановская, Костромская, Курганская области, Забайкальский край и др.) зафиксировано *заметное сокращение всех трех видов нагрузок:* промышленной, аграрной и демографической (подгруппа 5а). В Тыве *спад промышленности и сельского хозяйства сопровождается среднероссийской динамикой населения* – подгруппа 5б. Подгруппа 5в характеризуется *сокращением населения и выпуска продукции промышлен-*

Таблица 3. Регионы, максимально увеличившие и сократившие объемы промышленного производства за 1990 – 2020 гг. (% от объема промышленного производства РСФСР в 1990 г.)**Table 3.** Regions that maximized and reduced the volume of industrial production in 1990–2020 (% of the volume of industrial production of the RSFSR in 1990)

Регионы, максимально увеличившие объемы производства	Увеличение, %	Регионы, максимально сократившие объемы производства	Сокращение, %
Московская область	6.65	Нижегородская область	–0.22
Ростовская область	6.20	г. Санкт-Петербург	–0.24
Белгородская область	2.09	Курганская область	–0.25
Ленинградская область	1.83	Удмуртская Республика	–0.28
Республика Татарстан	1.74	Кировская область	–0.31
Республика Башкортостан	1.38	Свердловская область	–0.32
Тульская область	1.38	ХМАО	–0.32
Калужская область	1.32	Ивановская область	–0.33
Иркутская область	1.17	Волгоградская область	–0.59
Краснодарский край	1.15	Челябинская область	–0.77

Составлено по данным [21, 22, 24].

ности при *среднероссийской аграрной динамике* (Нижегородская и Смоленская области, Пермский край и др.).

Проанализированные социально-экономические индексы показывают прирост или спад производственной и демографической нагрузки в регионе относительно ее уровня в базисном году (назовем эти сдвиги *относительными*), но они ничего не говорят о *величине* произошедших сдвигов – в силу огромных различий между регионами по количеству населения, объемам промышленного и сельскохозяйственного производства. Например, промышленность Адыгеи выросла даже больше, чем промышленность Московской области (262 и 243% соответственно), но индустрия Московской области в 58 раз превышает адыгейскую (2020 г.), т.е. по величине прироста промышленной нагрузки столичная область на порядок опережает Адыгею.

По величине прироста объема промышленного производства с большим отрывом лидируют Московская и Ростовская области, значимый прирост также в Белгородской и Ленинградской областях и Татарстане. А наибольшие промышленные потери фиксируются в Челябинской и Волгоградской областях (табл. 3). Максимальный прирост величины сельскохозяйственной нагрузки наблюдается во всех центрально-черноземных областях, в Дагестане и Татарстане. Максимальные в масштабе страны потери продукции сельского хозяйства – в Московской области (табл. 4).

По величине прироста демографического “давления” на природу безусловный лидер – Москва (табл. 5). С экологических позиций важно, что “давление” здесь растет в компактном городском ареале (пусть и увеличившемся из-за расширения территории столицы в 2.4 раза). Прирост величины демографической нагрузки существенен в северо-кавказских республиках и в Московской области. Максимальное сокращение населения наблюдается в ряде регионов Центра, европейского Севера, Сибири, Урала, а лидирует по данному параметру Нижегородская область. Заметим, что эта область входит в топ-10 регионов, где сильно сократились нагрузки всех трех видов.

Таблица 4. Регионы, максимально увеличившие и сократившие объемы сельскохозяйственного производства за 1990–2020 гг. (% от объема сельскохозяйственного производства РСФСР в 1990 г.)
Table 4. The regions that maximized and reduced the volume of agricultural production in 1990–2020 (% of the volume of agricultural production of the RSFSR in 1990)

Регионы, максимально увеличившие объемы производства	Увеличение, %	Регионы, максимально сократившие объемы производства	Сокращение, %
Белгородская область	3.68	Вологодская область	–0.34
Тамбовская область	2.49	Смоленская область	–0.39
Курская область	2.41	Хабаровский край	–0.39
Липецкая область	2.04	Архангельская область (без АО)	–0.43
Воронежская область	1.64	Забайкальский край	–0.46
Республика Дагестан	1.54	Ставропольский край	–0.54
Республика Татарстан	1.54	Пермский край	–0.57
Пензенская область	1.34	Нижегородская область	–0.58
Брянская область	0.96	Курганская область	–0.66
Орловская область	0.92	Московская область	–0.75

Составлено по данным [21, 22, 24].

Таблица 5. Регионы максимального прироста и сокращения численности населения за 1990–2020 гг., тыс. чел.

Table 5. Regions of maximum population growth and decline in 1990 – 2020, thousand people

Регионы максимального прироста населения	Увеличение	Регионы максимального сокращения населения	Сокращение
г. Москва	3747.1	Тульская область	–406.9
Республика Дагестан	1311.3	Иркутская область	–418
Краснодарский край	1043.9	Тверская область	–421.4
Московская область	1043.5	Архангельская область (без АО)	–437.3
Чеченская Республика и Республика Ингушетия	737.5	Мурманская область	–440.1
г. Санкт-Петербург	382.3	Республика Коми	–441.4
ХМАО	372.7	Кемеровская область	–462.6
Ставропольский край	354.8	Пермский край	–462.8
Ленинградская область	236.7	Свердловская область	–484
Республика Татарстан	232.1	Нижегородская область	–608.5

Составлено по данным [21, 22, 24].

ОБСУЖДЕНИЕ

Как видим, наиболее заметное сокращение антропогенных нагрузок (холодные тона на рис. 2, группы 4–5) фиксируется на Дальнем Востоке, в ряде южно-сибирских регионов, на европейском Севере, включая ближний Север. А значительный прирост нагрузок (теплые тона на рис. 2, группы 1–3) характерен для регионов Северного Кавказа, российской Прибалтики, субширотного ареала регионов, протянувшегося от Брянской области до Башкортостана, а также Тюменской области. Легко видеть, что усиление нагрузки произошло прежде всего в пределах степной и лесостепной зон, в наибольшей степени трансформированных антропогенной деятельностью [25]. А на

Северном Кавказе возрастающая нагрузка ухудшает напряженную водохозяйственную ситуацию.

В 26 регионах, занимающих 11.2% территории страны, где проживает 35.6% ее населения, наблюдается существенный рост антропогенной нагрузки, а ее сокращение отмечается в 25 регионах (51.7% территории и 15.7% населения). “Давление” на природу увеличивается прежде всего на высокоосвоенной территории страны, а уменьшается — на обширной слабоосвоенной территории, где сосредоточены основные российские территориальные, водные и минеральные ресурсы.

Проведенное исследование подтвердило высокую степень инерционности территориальной макроструктуры хозяйства страны, выражающейся в сосредоточении хозяйства и населения на территории с высоким антропогенным “прессом” на природу [5]. Об этом говорит и распределение по регионам инвестиций в промышленность — будущих антропогенных нагрузок. Коэффициент парной корреляции между долей регионов в инвестициях (за 1996–2019 гг.) и их долей в промышленной продукции страны (в 2019 г.) составляет +0.66, а без учета Москвы и Санкт-Петербурга (их показатели искажаются особенностями статистического учета) — даже +0.88. Чем больше по объему региональная промышленность, тем больше в нее направляется инвестиций. Уместно вспомнить, что конце 1990-х годов отдельные исследователи отмечали “как долговременную тенденцию рост станового хребта экономики — оси Сибирь–Урал–Поволжье” [27, с.11]. Однако к настоящему времени этого не наблюдается: среди лидеров промышленного спада четыре уральских региона и даже ХМАО. А максимальные приросты аграрной продукции показывают регионы, которые и в советский период были в сельскохозяйственном авангарде.

В ходе реформирования страны население, а следовательно, и демографическая нагрузка на природу, смещается в Московский столичный регион и на Северный Кавказ. Если исключить внезональную во всех отношениях Москву и тюменские автономные округа, можно сказать, что население сдвигается в зону с оптимальным соотношением тепла и влаги и максимальной биологической продуктивностью ландшафтов. Это движение внешне выглядит как тяготение населения к экологически благоприятным местам, но оно обусловлено социально-экономическими и природно-ресурсными, а не природно-экологическими факторами.

Относительный рост антропогенной нагрузки в центральной и юго-западной России ухудшает экологическую обстановку, а сокращение населения и производства на севере и востоке страны, снижающее нагрузку на природу, ухудшает социальную ситуацию, поскольку рабочие места и высокие доходы “мигрируют” на запад. Убыль населения на малозаселенной территории, ее “убывающие” города и села (форпосты освоения) — это еще и потеря контроля над пространством (в том числе экологического контроля), что напрямую относится к вопросам устойчивости и безопасности страны. В нашей крайне неравномерно освоенной стране такой вектор ее территориального развития не оправдан и с социальных, и геополитических, и экологических позиций. Заметим, что не все авторы разделяют эту точку зрения. Так, в [19] отстаивалась идея “компактизации” российского хозяйства и запрета на хозяйственное освоение “диких земель” с целью их сохранения в качестве экологического резерва человечества. А отдельные зарубежные исследователи предлагали даже свернуть хозяйство на уже освоенных территориях с суровыми климатическими условиями и эвакуировать оттуда население [28].

Новый постсоветский экологически неблагоприятный тренд в динамике нагрузок на природу — их сосредоточение в приморских регионах. Эта тенденция, вызванная усилением “мореориентации” страны [7] вследствие государственной политики, отдающей приоритет внешнему, а не внутреннему рынку [18], обуславливает рост разнообразных нагрузок на уязвимые к воздействиям побережья внутриматериковых атлантических морей, а также Каспийского моря. Растущая нагрузка на Черноморском по-

бережье плохо совместима с его главной, рекреационной функцией, учитывая дефицит в России ресурсов пляжного отдыха у теплых морей. Азовское море — самое проблемное в экологическом плане из всех российских морей. Балтийское море уязвимо ко все увеличивающимся антропогенным нагрузкам из-за малых глубин и слабого водообмена с Мировым океаном. К тому же оно давно и интенсивно используется (а значит, и загрязняется) сопредельными странами. А в замкнутой акватории Каспийского моря-озера обитает главное на Земле стадо осетровых рыб. Для нашей страны самовоспроизводящиеся биологические ресурсы Каспия не менее важны, чем его углеводороды.

На этом фоне приморские регионы европейского Севера и Дальнего Востока поражены трансформационной депрессией. Это отнюдь не способствует декларируемому на высшем государственном уровне геополитическому “развороту на Восток” и развитию Северного морского пути, потенциально способным обеспечить независимость России в пространственном отношении, ведь ее главные морские фасады обращены к Северному Ледовитому и Тихому океанам.

При сравнении результатов настоящей работы с результатами, полученными ранее по региональной динамике в 1990–2005 гг. [11], виден очень сильный рост аграрной нагрузки в Центральном Черноземье и на Северном Кавказе, который связан с российским сельскохозяйственным ренессансом, начавшимся с конца “нулевых” годов. В то же время территориальная дифференциации динамики промышленности в целом сохраняется, хотя есть и исключения — например, серьезный промышленный рост в последнее пятилетие показывает Москва (после ее заметной деиндустриализации ранее).

Примечательно, что рост всех видов нагрузок в регионах-лидерах намного существеннее, чем их сокращение в регионах максимального спада. К примеру, у лидера промышленного роста Московской области — плюс 6.65% прироста объема производства, а у лидера промышленного спада Челябинской области — минус 0.77%; у лидера сельскохозяйственного роста Белгородской области — плюс 3.68%, у лидера сельскохозяйственного спада Московской области — минус 0.75%. Поэтому ухудшение экологической обстановки в регионах сильного роста нагрузок вероятнее ее улучшения в регионах-лидерах их спада.

Налицо разнонаправленная и очень разнообразная региональная социально-экономическая динамика, лишь пять регионов более-менее соответствуют среднероссийскому тренду: Новосибирская, Томская, Самарская, Оренбургская области и Красноярский край. Это — свидетельство внушительного социально-экономического (а следовательно, и геоэкологического) расслоения российских регионов в результате 30-летних преобразований.

Следует еще раз подчеркнуть условность геоэкологической трактовки региональной социально-экономической динамики. Она лишь в самых общих чертах, на высоком уровне обобщения отражает динамику антропогенной нагрузки и должна дополняться анализом отдельных воздействующих факторов. Так, на территории производственного спада и сокращения населения антропогенная нагрузка тоже может усиливаться. В условиях низких доходов и безработицы бедное население выживает за счет чрезмерной эксплуатации биологических ресурсов [26] — почвенного плодородия, браконьерства, незаконных рубок леса, самозаготовок дров, самозахвата земель и т.п. Но такого рода нагрузка не улавливается используемой нами методикой ее оценки.

Интересный сюжет дальнейшей разработки темы — сравнить результаты исследования с аналогичными, полученными на базе интегральных индексов воздействий, которые рассчитываются по данным официальной экологической статистики. Очень важным представляется рассмотреть производственную и демографическую динамику

ку более дробных, чем регионы, территориальных единиц, а в идеале — на ландшафтной основе, что позволит сопоставить нагрузку с устойчивостью разных природных комплексов к антропогенным воздействиям. Но такая задача наталкивается на серьезные трудности информационного и методического характера. Учитывая высокий темп изменчивости российского хозяйства, особенно в условиях нынешней геополитической турбулентности, результаты настоящего исследования подлежат периодической верификации на новой информационной базе. Так, антироссийские санкции, ведущие к переориентации экспортно-импортных потоков с запада на восток, уже снижают нагрузку на балтийскую портовую инфраструктуру и увеличивают ее в дальневосточных портах. В связи с планами сформировать международный транспортный коридор “Север—Юг”, соединяющий Санкт-Петербург с Мумбаи через Иран, возможно усиление антропогенной нагрузки на каспийском побережье.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совместный анализ региональной динамики производства и населения России выявил основные сдвиги в территориальной структуре антропогенной нагрузки на природу, произошедшие за 1990—2020 годы. Зоны, наиболее сильно пораженные трансформационной депрессией, охватывают практически все европейское Нечерноземье, юг Восточной Сибири и Дальний Восток. А значительный прирост производственных и демографических нагрузок отмечается на Северном Кавказе, в российской Прибалтике, субширотном ареале регионов, протянувшимся от Брянской области до Башкортостана, а также Тюменской области. В целом “давление” на природу увеличивается на хорошо освоенной территории (примерно 1/10 часть территории страны, где проживает около трети населения), а сокращается — на обширной слабоосвоенной территории (около половины территории и 1/6 населения России).

Значительное сокращение демографической нагрузки затрагивает более половины регионов страны. Так же более половины из них испытывают существенный рост промышленной нагрузки. Примерно в четверти регионов сельскохозяйственная нагрузка заметно растет, а в четверти — заметно падает.

Поскольку увеличение всех видов нагрузок в регионах-лидерах намного существеннее, чем их сокращение в регионах максимального спада, ухудшение экологической обстановки в регионах сильного роста нагрузок более вероятно, чем ее улучшение в регионах-лидерах их спада.

Разнонаправленная и очень разнообразная региональная динамика свидетельствует о внушительном росте в результате 30-летних преобразований межрегиональных контрастов, что требует регионализации экологической политики.

Исследование подтвердило: за постсоветские годы отнюдь не наблюдается сдвига производительных сил на восток, необходимого для обеспечения геополитической устойчивости страны и экологического оздоровления главной полосы расселения страны. Преодоление негативных тенденций требует всестороннего учета социально-экологических и геополитических факторов при разработке стратегии территориального развития России.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в Институте географии РАН по теме гос. задания FMGE-2019-0008 (AAAA-A19-119022190170-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Битюкова В.Р. Экономико-географическая оценка экологических последствий трансформации отраслевой структуры хозяйства регионов и городов России в 2000–2020 гг. // Изв. РАН. Сер. геогр. 2022. № 3. С. 416–434.
2. Геоэкологическая характеристика городов Сибири. Иркутск: ИГ СО АН СССР, 1990. 222 с.
3. Государственный доклад “О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2018 году”. М.: НИА-Природа, 2019. 290 с.
4. Водные ресурсы России и их использование / Под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: ГГИ, 2008. 600 с.
5. Данилов-Данильян В.И., Ключев Н.Н. Природно-ресурсная сфера России: тенденции развития и желательные стратегии // Вызовы и политика пространственного развития России в XXI веке. М.: КМК, 2020. С. 111–147.
6. Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения. М.: Институт водных проблем РАН, 2020. 512 с.
7. Дружинин А.Г., Лачининский С.С. Россия в мировом океане: геоэкономические и геополитические интересы, масштаб и форматы “присутствия” // Изв. РГО. 2019. Т. 151. вып. 6. С. 1–19.
<https://doi.org/10.31857/S0869-607115161-19>
8. Зеленов А.С., Зеленова М.С. Высокие уровни загрязнения поверхностных вод Российской Федерации // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2010. № 4. С. 50–53.
9. Израэль Ю.А. Роль мониторинга для оценки реальной обстановки и обеспечения экологического баланса // Научные аспекты экологических проблем России. М., 2006. С. 12–16.
10. Исаченко А.Г. Экологическая география России. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2001. 328 с.
11. Ключев Н.Н. Пореформенная трансформация экологического облика российских регионов // Изв. РГО. 2009. Т. 141. Вып. 3. С. 1–8.
12. Ключев Н.Н. Аграрное природопользование в российских регионах: эколого-ресурсный “диссонанс” // Изв. РГО. 2017. Т. 149. Вып. 3. С. 4–15.
13. Коммерсантъ. 21 января 2013 г.
14. Коммерсантъ-Регенерация. № 177. 30 сентября 2021 г.
15. Корниенко С.Г. Оценка трансформаций природных ландшафтов Тазовского полуострова по данным космической съемки // География и природные ресурсы. 2011. № 1. С. 67–73.
16. Котляков В.М., Лосев К.С., Суэтова И.А. Вложение энергии в территорию как экологический индикатор // Изв. РАН. Сер. геогр. 1995. № 3. С. 70–75.
17. Кочуров Б.И. Экодиагностика и сбалансированное развитие. М.–Смоленск: Маджента, 2003. 384 с.
18. Лажнецов В.Н. Север России: вопросы пространственного и территориального развития. Сыктывкар: ИСЭиЭПС, 2015. 176 с.
19. Лосев К.С., Ананичева М.Д. Экологические проблемы России и сопредельных территорий. М.: Ноосфера, 2000. 283 с.
20. Обзор фоновое состояние окружающей природной среды на территории стран СНГ за 2013–2014 гг. М.: Институт глобального климата и экологии, 2015. 138 с.
21. Приложение к Ежегоднику “Социально-экономические показатели Российской Федерации” Социально-экономические показатели Российской Федерации в 1991–2020 гг. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13396> (дата обращения: 31.10.2022).
22. Приложение к сборнику “Регионы России. Социально-экономические показатели” Социально-экономические показатели по субъектам Российской Федерации. 2000–2020. URL: <http://rosstat.gov.ru/folder/210/document/47652> (дата обращения: 31.10.2022).
23. Природопользование в территориальном развитии современной России. М.: Медиапресс, 2014. 360 с.
24. Российский статистический ежегодник. 1994. М.: Госкомстат России, 1994. 799 с.
25. Тишков А.А. Биосферные функции природных экосистем России. М.: Наука, 2005. 309 с.
26. Тишков А.А., Ключев Н.Н. Экосистемы в условиях постсоветской трансформации природопользования // Рациональное природопользование: международные программы, российский и зарубежный опыт. М.: КМК, 2010. С. 342–370.
27. Трейвиш А.И. География российских кризисов // Изв. АН. Сер. геогр. 1999. № 2. С. 7–16.
28. Hill F., Gaddy C.G. The Siberian curse: How communist planners left Russia out in the cold. Washington: Brookings Institution Press, 2003. 327 p.
29. Mata F.J., Onisto L.J., Vallentyne J.R. Consumption: The other side of population for development // Ethics in science and environmental politics. 2012. №1. P. 15–20.
<https://doi.org/10.3354/esep00122>

Regional Dynamics of Industry, Agriculture and Population in Russia in 1990–2020: Geocological Interpretation

N. N. Klyuev*

Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

**E-mail: klyuev@igras.ru*

Abstract—The grouping of Russian regions by the type of conjugate dynamics of industry, agriculture and population for 1990–2020, indirectly reflecting the dynamics of the integral anthropogenic load on nature, is carried out. The zones most severely affected by the transformational depression have been identified, which cover practically the entire European Non-Chernozem region, south of Eastern Siberia and the Far East. And a significant increase in loads is observed in the North Caucasus, the Russian Baltic States, the sub-latitude area of the regions stretching from the Bryansk region to Bashkortostan, as well as the Tyumen region. The increase in load occurred primarily within the steppe and forest-steppe zones, which were most transformed by anthropogenic activity. In general, “pressure” on nature increases in a well-developed territory (about 1/10 of the country, where about a third of the population lives), and decreases in a vast poorly developed territory (about half of the territory and 1/6 of the population of Russia). A new environmentally unfavorable trend in the dynamics of pressures on nature is their relative shift to coastal regions, to vulnerable to impacts and scarce in the country recreationally attractive coasts of the Atlantic seas, as well as the Caspian Sea-lake. It has been established that the increase in all types of loads in the leading regions is much more significant than their reduction in the regions of maximum decline. Therefore, the deterioration of the environmental situation in the regions of strong growth in loads is more likely than its improvement in the regions leading their decline. The increase in the load occurred primarily within the steppe and forest-steppe zones, most transformed by anthropogenic activity. In general, the “pressure” on nature increases in a well-developed area (about 1/10 of the country, where about a third of the population lives), and decreases in a vast underdeveloped area (about half of the territory and 1/6 of the population of Russia). A new environmentally unfavorable trend in the dynamics of loads on nature is their relative shift to the coastal regions, to the recreationally attractive coasts of the Atlantic seas, as well as the Caspian Sea—lakes, vulnerable to impacts and scarce in the country. It has been established that the increase in all types of loads in the leading regions is much more significant than their reduction in the regions of maximum recession. Therefore, the deterioration of the environmental situation in the regions of a strong increase in loads is more likely than its improvement in the regions-leaders of their decline.

Keywords: anthropogenic load, industry, agriculture, population, Russian regions, post-Soviet dynamics

REFERENCES

1. Bitjukova V.R. Ekonomiko-geograficheskaya ocenka ekologicheskikh posledstvij transformacii otraslevoj struktury hozyajstva regionov i gorodov Rossii v 2000–2020 gg. // *Izv. RAN. Ser. geogr.* 2022. № 3. S. 416–434.
2. *Geoekologicheskaya karakteristika gorodov Sibiri.* Irkutsk: IG SO AN SSSR, 1990. 222 s.
3. Gosudarstvennyj doklad “O sostoyanii i ispol’zovanii vodnyh resursov Rossijskoj Federacii v 2018 godu”. M.: NIA-Priroda, 2019. 290 s.
4. *Vodnye resursy Rossii i ih ispol’zovanie* / Pod red. I.A. SHiklomanova. SPb.: GGI, 2008. 600 s.
5. Danilov-Danil’yan V.I., Klyuev N.N. Prirodno-resursnaya sfera Rossii: tendencii razvitiya i zhela-tel’nye strategii // *Vyzovy i politika prostranstvennogo razvitiya Rossii v XXI veke.* M.: KMK, 2020. S. 111–147.
6. *Diffuznoe zagryaznenie vodnyh ob’ektov: problemy i resheniya.* M.: Institut vodnyh problem RAN, 2020. 512 s.
7. Druzhinin A.G., Lachinskij S.S. Rossiya v mirovom okeane: geoeconomicheskie i geopolitiches-kie interesy, masshtab i formaty “prisutstviya” // *Izv. RGO.* 2019. T. 151. Vyp. 6. S. 1–19. <https://doi.org/10.31857/S0869-607115161-19>
8. Zelenov A.S., Zelenova M.S. Vysokie urovni zagryazneniya poverhnostnyh vod Rossijskoj Federacii // *Iskol’zovanie i ohrana prirodnyh resursov v Rossii.* 2010. № 4. S. 50–53.

9. Izrael' Yu.A. Rol' monitoringa dlya ocenki real'noj obstanovki i obespecheniya ekologicheskogo balansa // Nauchnye aspekty ekologicheskikh problem Rossii. M., 2006. S. 12–16.
10. Isachenko A.G. Ekologicheskaya geografiya Rossii. SPb.: Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 2001. 328 s.
11. Klyuev N.N. Poreformennaya transformaciya ekologicheskogo oblika rossijskikh regionov // Izv. RGO. 2009. T. 141. Vyp. 3. S. 1–8.
12. Klyuev N.N. Agrarnoe prirodopol'zovanie v rossijskikh regionah: ekologo-resursnyj "dissonans" // Izv. RGO. 2017. T. 149. Vyp. 3. S. 4–15.
13. Kommersant". 21 yanvarya 2013 g.
14. Kommersant"-Regeneraciya. № 177. 30 sentyabrya 2021 g.
15. Kornienko S.G. Ocenka transformacij prirodnyh landshaftov Tazovskogo poluostrova po dannym kosmicheskoy s"emki // Geografiya i prirodnye resursy. 2011. № 1. S. 67–73.
16. Kotlyakov V.M., Losev K.S., Suetova I.A. Vlozhenie energii v territoriyu kak ekologicheskij indikator // Izv. RAN. Ser. geogr. 1995. № 3. S. 70–75.
17. Kochurov B.I. Ekodiagnostika i sbalansirovannoe razvitie. M.-Smolensk: Madzhenta, 2003. 384 s.
18. Lazhencev V.N. Sever Rossii: voprosy prostranstvennogo i territorial'nogo razvitiya. Syktyvkar: ISEiEPS, 2015. 176 s.
19. Losev K.S., Ananicheva M.D. Ekologicheskie problemy Rossii i sopredel'nyh territorij. M.: Noosfera, 2000. 283 s.
20. Obzor fonovogo sostoyaniya okruzhayushchej prirodnoj sredy na territorii stran SNG za 2013–2014 gg. M.: Institut global'nogo klimata i ekologii, 2015. 138 s.
21. Prilozhenie k Ezhegodniku "Social'no-ekonomicheskie pokazateli Rossijskoj Federacii" Social'no-ekonomicheskie pokazateli Rossijskoj Federacii v 1991–2020 gg. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13396> (data obrashcheniya: 31.10.2022).
22. Prilozhenie k sborniku "Regiony Rossii. Social'no-ekonomicheskie pokazateli" Social'no-ekonomicheskie pokazateli po sub"ektam Rossijskoj Federacii. 2000–2020. URL: <http://rosstat.gov.ru/folder/210/document/47652> (data obrashcheniya: 31.10.2022).
23. Prirodopol'zovanie v territorial'nom razvitii sovremennoj Rossii. M.: Mediapress, 2014. 360 s.
24. Rossijskij statisticheskij ezhegodnik. 1994. M.: Goskomstat Rossii, 1994. 799 s.
25. Tishkov A.A. Biosfernye funkcii prirodnyh ekosistem Rossii. M.: Nauka, 2005. 309 s.
26. Tishkov A.A., Klyuev N.N. Ekosistemy v usloviyah postsovetskoj transformacii prirodopol'zovaniya // Racional'noe prirodopol'zovanie: mezhdunarodnye programmy, rossijskij i zarubezhnyj opyt. M.: KMK, 2010. S. 342–370.
27. Trejvish A.I. Geografiya rossijskikh krizisov // Izv. AN. Ser. geogr. 1999. № 2. S. 7–16.
28. Hill F., Gaddy C.G. The Siberian curse: How communist planners left Russia out in the cold. Washington: Brookings Institution Press, 2003. 327 p.
29. Mata F.J., Onisto L.J., Vallentyne J.R. Consumption: The other side of population for development // Ethics in science and environmental politics. 2012. № 1. P. 15–20. <https://doi.org/10.3354/esep00122>

ЛАНДШАФТНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕРРИТОРИИ СУРГУТСКОГО РАЙОНА ХМАО-ЮГРЫ

© 2023 г. Э. А. Кузнецова^а, *, М. А. Кичикова^а

^а Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

*E-mail: e.a.kuznesova@utmn.ru

Поступила в редакцию 06.11.2023 г.

После доработки 10.11.2023 г.

Принята к публикации 22.11.2023 г.

Ландшафтно-экологический анализ проведен на примере Сургутского района Ханты-Мансийского автономного округа-Югры, где главным фактором деградации природных объектов является загрязнение территории в результате добычи полезных ископаемых, на которую приходится до 80% выбросов. Для анализа использовались ландшафтные провинции, как узловые геосистемы. Проведена общая структурно-морфологическая оценка ландшафтов, оценка неблагоприятных эколого-географических процессов, антропогенной трансформации и экологической инфраструктуры ландшафтов, выделены экологически значимые факторы территории. В результате проведенного исследования была составлена карта, отражающая пространственную дифференциацию состояния ландшафтных провинций с учетом антропогенного воздействия. Установлено, что наилучшим ландшафтно-экологическим благополучием обладает южная территория района (Юганско-Ларьеганской провинции), для которой характерно сдерживание антропогенной деятельности благодаря созданию Юганского заповедника. Вандрас-Юганская провинция служит буфером между антропогенными и наименее изменёнными естественными ландшафтами, занимая промежуточное положение в оценке. На центральную часть Сургутского района пришелся наиболее массивный «удар» по ландшафтам, так как здесь сосредоточены основные транспортные магистрали, трубопроводы, селитебные поселения. Для северной части Сургутского района характерны процессы заболачивания, высокая степень заозеренности и средняя степень преобразования естественных ландшафтов.

Ключевые слова: ландшафт, Сургутский район, эколого-географический анализ

DOI: 10.31857/S0869607123030096, **EDN:** YKZOOP

ВВЕДЕНИЕ

Антропогенное освоение ландшафтов характеризуется экстенсивным неблагоприятным воздействием на все составляющие окружающей среды [14, 15]. В настоящее время акцентируется внимание на использование ландшафтных подходов в системе экологического мониторинга и контроля техногенных процессов [12, 13]. Все чаще возникает потребность в информации об экологических особенностях ландшафтной составляющей территории. Для выявления устойчивости ландшафтов к антропогенному влиянию и определению их современного состояния производится эколого-географическая оценка ландшафтов.

Существует многообразие подходов к ландшафтно-экологическому анализу территории. Согласно И.А. Самофаловой, М.А. Кондратьевой целью ландшафтного анали-

за территории является оценка всех природных компонентов и подготовка, составление различных видов карт в зависимости от их целевого назначения. Особое внимание уделяется характеристике экологического состояния ландшафтов в зависимости от техногенного и агрогенного воздействия и разработке мероприятий по их рекультивации, стабилизации и рациональному использованию [10]. Анализ связей внутри гео(эко-)системы и между системами составляет суть самого ландшафтно-экологического исследования утверждает Э.Г. Коломыц [6].

На сегодняшний день ландшафтно-географический анализ является важнейшим методом изучения природно-экологического потенциала территории, который рассматривает структурные и функционально-динамические особенности природных комплексов различного таксономического ранга.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Ландшафтно-экологический анализ территории Сургутского района был выполнен по методике В.Б. Михно, В.Н. Бевз, А.С. Горбунова, О.П. Быковской [8] с учетом границ ландшафтных провинций. Данная методика была избрана нами как наиболее комплексная. Расчеты исследования выполнены на основе карты ландшафтного районирования ХМАО – Югры [9].

Основной целью работы является эколого-географический анализ ландшафтных провинций Сургутского района с выявлением местных условий, процессов, факторов (как естественных, так и антропогенных). Исследование строилось на оценке природно-экологического потенциала территории, которая учитывает структурные и функционально-динамические особенности природных комплексов. Она направлена на изучение сложившейся в ландшафтных провинциях Сургутского района экологической ситуации, которая предопределяет современное состояние ландшафтных комплексов и зависит от естественных свойств ландшафтных комплексов, их устойчивости.

Ландшафтная структура Сургутского района хорошо изучена [2, 3, 7, 9, 11]. По ландшафтному районированию в Сургутский район входит 9 ландшафтных провинций: Нумтовская, Пику-Тромьеганская, Ляминско-Аганская, Назым-Ляминская, Аганская, Среднеобская, Салымско-Обская, Вандрас-Юганская и Юганско-Ларьеганская.

На территории района расположены в основном болотные массивы, лесные сообщества приурочены к долинам рек и к их террасам. Наиболее типичными ландшафтами района являются верховые сфагновые грядово-мочажинные и низинные болота, на которые приходится до 80% площади. На дренированных пространствах располагаются сосновые боры, среднетаежные темнохвойные леса из пихты, кедра и ели.

Избыточное увлажнение, слабая дренированность территорий, континентальность климата, наличие обширных плоских междуречных пространств обусловили следующую особенность ландшафтов Сургутского района – зональные типы болот. На севере района преобладают крупнобугристые в сочетании с плоскобугристыми и грядово-мочажинными болотными массивами, южнее – в пойме р. Оби располагаются евтрофные болотные массивы – болотистые и настоящие луга. Юг района занимают грядово-мочажинно-озерковые и грядово-озерковые болота.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По итогам ландшафтно-экологического анализа наибольшим баллом (4.1 балла) обладает Юганско-Ларьеганская ландшафтная провинция. Это объясняется наименьшей ее заселенностью, расположением на большей ее части площади охранной территории – Юганского заповедника, где запрещена антропогенная деятельность. Вандрас-Юганская провинция имеет среднюю оценку экологического состояния – 3.36 балла – это менее заселенная территория с невысокой степенью антропогенной нагрузки.

Таблица 1. Общая структурно-морфологическая оценка ландшафтов
Table 1. General structural and morphological assessment of landscapes

Ландшафтная провинция	Коэффициент ландшафтно-экологического благополучия	Индекс репрезентативности (представительности) вариантов типов местности	Индекс общего разнообразия Шеннона	Средний балл оценки
Нумтовская	2	1	1	1.3
Пяку-Верхнетромъеганская	3	1	2	2
Назым-Ляминская	2	2	1	1.6
Ляминско-Аганская	1	4	5	3.3
Аганская	1	1	1	1
Среднеобская	1	3	1	1.6
Салымско-Обская	1	2	4	2.3
Вандрас-Обская	1	3	3	2.3
Юганско-Ларьеганская	5	5	5	5

Нумтовская, Ляминско-Аганская, Назым-Ляминская, Пяку-Верхнетромъеганская, Аганская, Салымско-Обская ландшафтные провинции имеют от 2 до 2.9 баллов, и относятся к неблагоприятным по экологическому состоянию территориям с интенсивной добычей и переработкой нефти и газа, развитой транспортной инфраструктурой. Наименьшую оценку 1.9 балла имеет Среднеобская ландшафтная провинция. Это обусловлено развитием здесь топливно-энергетического комплекса, транспортных магистралей, селитебных территорий (г. Сургут, п. Солнечный, п. Лямино, п. Тундрино), которые существенно преобразовали и нарушили ландшафтные комплексы.

ОБСУЖДЕНИЕ

Ландшафтно-экологический анализ проводился по следующим признакам:

- структурно-морфологический;
- неблагоприятные эколого-географические процессы;
- антропогенная трансформация ландшафтов;
- экологическая инфраструктура ландшафтов;
- экологически значимые факторы.

В структурно-морфологическую оценку ландшафтов включены коэффициент ландшафтно-экологического благополучия, индекс репрезентативности (представительности) вариантов типов местности, индекс общего разнообразия Шеннона, также рассматривалась морфоструктура ландшафтов на уровне типов местности и их вариантов [8].

Широкое распространение болотных ландшафтов способствует аккумуляции комплексу загрязняющих веществ, поступающих благодаря поверхностным водотокам и талым снеговым водам. Пять баллов соответствует лучшему ландшафтно-экологическому благополучию (табл. 1).

Наибольший коэффициент ландшафтно-экологического благополучия приходится на Юганско-Ларьеганскую провинцию (табл. 1). Это можно объяснить площадью провинций, которые они занимают в районе. Юганско-Ларьеганская провинция занимает большую часть района, в отличие от Салымско-Обской, Вандрас-Обской, Аганской и Ляминско-Аганской провинций, имеющих намного меньшую площадь территории в границах Сургутского района, а также большей степенью заболоченности и заозеренности в северной части района (Аганская, Ляминско-Аганская провин-

Таблица 2. Оценка неблагоприятных эколого-географических процессов
Table 2. Assessment of unfavorable ecological and geographical processes

Ландшафтная провинция	Среднее многолетнее загрязнение поверхностных вод нефтепродуктами, балл оценки	Среднее содержание гумуса в почвах, балл оценки	Степень заболоченность ландшафтных провинций, балл оценки	Потенциальная активность самоочищения почв	Доля смытых почв	Максимальные превышения водоразделов над урезами рек и озер	Угол наклона рельефа	Доля склонов крутизной более 5°	Средний балл оценки
Нумтовская	4	3	2	2	5	5	4	5	3.75
Пяку-Верхнетромьеганская	3.5	3	2	2	4	5	4	5	3.56
Назым-Ляминская	5	2	2	1	4	4	4	5	3.25
Ляминско-Аганская	2	5	1	1	4	3.5	4	5	3.25
Аганская	2	3.5	3	3	3.5	4	2	5	3.25
Среднеобская	2	3	3	3	1	3	2	5	2.75
Салымско-Обская	3	2	3	4	5	3.5	2	4	3.37
Вандрас-Обская	2	2	3	3	4	4	3	4	3.50
Юганско-Ларьеганская	5	3	2.5	4	2.5	2.5	3.5	1	3.00

ции) где находится Сургутское полесье, где более 80% территории занято водой — это реки, озера, болота. Наибольший индекс репрезентативности (представительности) типов местности имеет Юганско-Ларьеганская провинция, благодаря наибольшему разнообразию ландшафтов, в отличие от других провинций. Индекс общего разнообразия Шеннона отображает количество местностей, их встречаемость и равномерность распределения в пределах ландшафтных провинций. Согласно данному индексу наибольшим разнообразием обладает Ляминско-Аганская и Юганско-Ларьеганская провинции, это можно объяснить тем, что провинции занимают наибольшие территории в пределах Сургутского района. В Юганско-Ларьеганской провинции распространены елово-кедровые, иногда с пихтой, среднетаежные леса, сосновые среднетаежные и южнотаежные леса, а также сфагновые таежные болота.

При оценке неблагоприятных эколого-географических процессов исследовались такие показатели как среднее многолетнее загрязнение поверхностных вод ландшафтных провинций нефтью и нефтепродуктами по источникам [4], содержание гумуса в почвах, потенциал самоочищения почв от нефти и нефтепродуктов и другие факторы по картографическим источникам [1] (табл. 2).

Анализируя табл. 2, можно сказать, что в целом для почв района характерна незначительная мощность гумусового горизонта (3–10 см). Содержание гумуса варьирует в широких пределах — от 1.724 до 4.65%. Максимальная оценка по содержанию гумуса в почвах присвоена Ляминско-Аганской провинции, поскольку сверхвысокий уровень запасов органического углерода имеют торфяные и торфяно-болотные почвы. Назым-Ляминская и Ляминско-Аганская провинции имеют заторможенную потенциальную активность самоочищения почв, где преобладают болотные почвы и проходит

Таблица 3. Оценка антропогенной трансформации ландшафтов
Table 3. Assessment of anthropogenic transformation of landscapes

Ландшафтная провинция	Вид промышленности	Степень антропогенного воздействия	Уровень антропогенной нагрузки	Средний балл оценки
Нумтовская	Нефтегазодобывающая	3	4	3.5
Пяку-Верхнетромъеганская	Нефтегазодобывающая	2	4	3
Назым-яминская	Нефтегазодобывающая	2	4	3
Ляминско-Аганская	Нефтегазодобывающая, электро-энергетика, нефтеперерабатывающая и газоперерабатывающая, лесная, промышленность строительных материалов, агропромышленный комплекс	1	1	1
Аганская	Нефтегазодобывающая	4	4	4
Салымско-Обская	Нефтегазодобывающая	2	1	1.5
Вандрасс-Юганская	Нефтегазодобывающая	4	4	4
Среднеобская	Нефтегазодобывающая, лесная, агропромышленный комплекс, электро-энергетика, нефтеперерабатывающая и газоперерабатывающая, промышленность строительных материалов	1	4	2.5
Юганско-Ларьеганская	Нефтегазодобывающая	4	4	4

южная граница многолетней мерзлоты. Большая доля смытых почв наблюдается в Среднеобской провинции, где развита боковая эрозия в пойме р. Оби. Нумтовская и Пяку-Верхнетромъеганская провинции обладают наибольшей степенью вертикального расчленения благодаря Сибирским Увалам, протянувшимся на севере Сургутского района с высотой от 200 до 500 м. Большая часть исследуемого района имеет поверхность, практически не имеющие наклона (до 0.5 градусов). Крутые склоны (более 6 градусов) приурочены к лесным долинам рек Большого и Малого Югана (Юганско-Ларьеганская провинция), где они протягиваются узкими полосами до 1 км. В целом, неблагоприятные эколого-географические процессы в большей степени наблюдаются в Среднеобской ландшафтной провинции. Это обусловлено нахождением здесь большинства нефтедобывающих месторождений, крупных населенных пунктов и крупнейшей тепловой электростанции России в г. Сургуте.

Степень антропогенной трансформации ландшафтов оценивалась по структуре основных видов промышленности, степени антропогенного воздействия и уровню антропогенной нагрузки на ландшафты (табл. 3). Оценка строится на методе взвешенных оценок (долевых показателей), где анализируется вес естественных ландшафтов (ООПТ), промышленных ландшафтов (территории месторождений, места прорыва трубопроводов) и территории, полностью или частично трансформированных в результате антропогенной деятельности. Степень антропогенного воздействия на ландшафтные провинции определена как произведение экологической плотности населения на этих территориях и величины отрицательного воздействия отраслей промышленности. В Ляминско-Аганской и Салымско-Обской, Среднеобской ландшафтных провинциях высокая степень антропогенного воздействия и уровня антропогенной нагрузки, по сравнению с другими территориями. Это можно объяснить наибольшей

Таблица 4. Оценка экологической инфраструктуры ландшафтов
Table 4. Assessment of ecological infrastructure of landscapes

Ландшафтная провинция	Группы экосистем	Балл оценки по структуре функциональных типов ландшафтов	Коэффициент экологической стабилизации ландшафтов, балл оценки	Средний балл
Нумтовская	Долины рек, группа болотных экосистем, дренированные озерно-болотные водоразделы, холмистые подболоченные леса	2.4	1	1.7
Пяку-Верхнетро-мьеганская	Долины рек, группа болотных экосистем	2.4	1	1.7
Назым-Ляминская	Группа болотных экосистем, озерково-болотные комплексы, сосново-березовые леса	1.8	2	2.4
Ляминско-Аганская	Группа болотных экосистем, русла рек, сосново-лишайниковое редколесье, заболоченные леса, минеральные острова, дренированные участки леса	3.5	4	2.75
Аганская	Долина реки, дренированные поверхности, занятые березово-осиновыми лесами, озера, травяно-моховые леса	3.3	1	2.15
Салымско-Обская	Озера, долины рек, разнотравно-злаковые луга, елово-березово-кедровые леса	2.8	2	2.4
Вандрасс-Юганская	Группа болотных экосистем, долины рек, озера, озерково-болотные комплексы, елово-березовые леса	3.3	2	2.6
Среднеобская	Группа болотных экосистем, заболоченные елово-кедровые леса, озерково-болотные комплексы	3.2	2	2.65
Юганско-Ларьеганская	Озера, группа болотных экосистем, заболоченные леса, озерково-болотные комплексы	4.2	5	4.6

заселенностью территории и видами промышленности, развивающимися на этих территориях (добыча полезных ископаемых, сенокосы и пастбища в пойменных землях Оби и др.). Согласно табл. 3, наибольший балл антропогенной трансформации ландшафтов принадлежит Аганской, Вандрасс-Юганской и Юганско-Ларьеганской провинциям благодаря наименьшей доле промышленных ландшафтов в общей структуре территории.

Оценка экологической инфраструктуры ландшафтов складывалась из функциональных типов ландшафтов, выполняющих средостабилизирующие функции и соотношения площади средостабилизирующих угодий к площади дестабилизирующих угодий (табл. 4). Функции ландшафтов определялись по методике В.В. Козина [5].

Из табл. 4 можно сделать вывод, что наибольший коэффициент экологической стабилизации ландшафтов принадлежит Юганско-Ларьеганской провинции, имеющей большую площадь стабилизирующих угодий Юганского заповедника.

При проведении количественной (балльной) оценки экологически значимых факторов были выявлены как благоприятные, так и неблагоприятные (табл. 5).

Таблица 5. Экологически значимые факторы
Table 5. Environmentally significant factors

Ландшафтная провинция	Неблагоприятные экологически значимые факторы	Благоприятные экологически значимые факторы	Балл оценки экологически значимых факторов
Нумтовская	Сильно льдистые грунты (льдистость более 0.4%)	Наличие ягодных дикоросов, древесных, водных ресурсов, высокий индекс общего разнообразия Шеннона	4
Пяку-Верхнетромьганская	Сильно льдистые грунты, высокая заболоченность и заозеренность территории	Наличие ягодных, дикоросов, водных ресурсов	3
Назым-Ляминская	Термокарст, заболоченность местности	Наличие ягодных дикоросов, водных ресурсов	3
Ляминско-Аганская	Термокарст и бугры пучения, сильно льдистые грунты; большая антропогенная нагрузка вследствие наличия нефтяных залежей, селитебная нагрузка, заболоченность местности	Наличие ягодных дикоросов, водных ресурсов	2
Аганская	Заболоченность местности	Наличие ягодных дикоросов, ландшафтов, которые лучше всего поддаются восстановлению в естественное состояние (пойменные)	3
Среднеобская	Большая антропогенная нагрузка вследствие наличия нефтяных залежей, селитебная нагрузка, абразионные процессы	Наличие ландшафтов, которые лучше всего поддаются восстановлению в естественное состояние (пойменные)	1
Вандрас-Обская	Селитебная нагрузка, заболоченность местности	Наличие ягодных дикоросов, водных ресурсов	3
Салымско-Обская	Селитебная нагрузка, наличие оползней	Наличие ягодных дикоросов, водных ресурсов	3
Юганско-Ларьеганская	Сильная овражная расчлененность, заболоченность местности	Наличие ягодных дикоросов; большое разнообразие видов животных	4

Неблагоприятные экологически значимые факторы связаны с морфологическими, геологическими, климатическими, гидрологическими условиями развития ландшафтов, на которые накладывается антропогенная составляющая. Наименьший балл оценки экологически значимых факторов у Среднеобской провинции, что обусловлено большой антропогенной нагрузкой, разрушением берегов у Сургутского водохранилища.

Были определены и сгруппированы по вышеперечисленным факторам оценочные показатели (табл. 6).

На рис. 1 можно увидеть, что провинции в соответствии с полученными баллами были поделены на 4 группы (5 баллов соответствует лучшему экологическому состоя-

Таблица 6. Суммарная эколого-географическая оценка ландшафтов Сургутского района
Table 6. Summary ecological and geographical assessment of the landscapes of the Surgut district

Ландшафтная провинция	Оценка в баллах
Нумтовская	2.85
Пяку-Верхнетромъеганская	2.65
Назым-Ляминская	2.65
Ляминско-Аганская	2.46
Аганская	2.68
Среднеобская	1.85
Вандрас-Обская	3.05
Салымско-Обская	2.79
Юганско-Ларьеганская	4.12

нию территории). В группу с оценкой от 1 до 1.9 балла входит одна провинция — Среднеобская, обладающей наиболее неблагоприятной экологической ситуацией. Нумтовская, Ляминско-Аганская, Назым-Ляминская, Пяку-Верхнетромъеганская, Аганская, Салымско-Обская ландшафтные провинции, имеющие баллы от 2 до 2.9, так же



Рис. 1. Эколого-географическая оценка ландшафтных провинций Сургутского района.

Fig. 1. Ecological and geographical assessment of landscape provinces of Surgut district.

относятся к неблагоприятным территориям с интенсивной добычей и переработкой нефти и газа, значительной транспортной инфраструктурой. В последние две группы входят по одной провинции. Вандрас-Юганская провинция имеет удовлетворительное экологическое состояние, оцененное в 3.05 балла. Юганско-Ларьеганская ландшафтная провинция обладает наиболее благоприятной экологической обстановкой. Это объясняется наименьшей ее заселенностью, расположением на большей части площади охранной территории – Юганского заповедника, где запрещена антропогенная деятельность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эколого-географический анализ ландшафтных провинций Сургутского района показал, что на его территории можно выделить 4 кластера с учетом факторов, характерных для ландшафтов исследуемой территории (заболоченности, заозеренности, развития нефтедобывающей промышленности, природоохранного фактора и др.). Первый кластер с высоким баллом по итогам эколого-географической оценки расположен на юге района (Юганско-Ларьеганской провинции), для которого характерно сдерживание антропогенной деятельности благодаря созданию здесь Юганского заповедника площадью 648636 га, развитию дренированных ландшафтов. Второй кластер занимает Вандрас-Юганская провинция, которая служит буфером между антропогенными и наименее измененными естественными ландшафтами, занимая промежуточное положение в оценке. К третьему кластеру оценкой от 2 до 2.9 баллов относится Салымско-Обская ландшафтная провинция (переходная территория между 4 и 2 кластером) и северная часть Сургутского района, для которой характерны процессы заболачивания, высокая степень заозеренности и средняя степень преобразования естественных ландшафтов. На центральную часть Сургутского района пришелся наиболее массивированный “удар” по ландшафтам, так как здесь сосредоточены основные транспортные магистрали, трубопроводы, селитебные поселения и как следствие, самый низкий балл по эколого-географической оценке (4 кластер).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00354, <https://rscf.ru/project/24-27-00354/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Ханты-Мансийского автономного округа-Югры. Т. 2. Природа и экология. Ханты-Мансийск: ОАО НПЦ “Мониторинг”, 2004. 152 с.
2. Бардасова С.С. Структурно-функциональный анализ полесских ландшафтов Западной Сибири // Вестник Тюменского государственного университета. 2013. № 4. С. 76–86.
3. Большаник П.В. Уровни антропогенной нагрузки и эколого-географическое районирование территории ХМАО-Югры // Вестник Томского государственного университета. 2008. № 317. С. 253–257.
4. Доклад об экологической ситуации в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре в 2021 году: Служба по контролю и надзору в сфере охраны окружающей среды, объектов животного мира и лесных отношений Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. URL: <https://prirodnadzor.admhmao.ru/doklady-i-otchety/otchety-o-deyatelnosti-prirodnadzora/itogi-ser/2021/6570493/sostoyanie-okruzhayushchey-sredy-na-territorii-khanty-mansiyskogo-avtonomnogo-okruga-yugry-za-3-kvar/> (дата обращения 01.02.2023).
5. Козин В.В. Проблема определения ценности и устойчивости экосистем // Природопользование на северо-западе Сибири: опыт решения проблем. Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 1996. С. 36–48.
6. Коломыц Э.Г. Избранные очерки географической экологии: часть I. Базовый ландшафтно-экологический анализ // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2018. Т. 27. Вып. 1. С. 15–29.
7. Кузнецова Э.А. Функции экосистем в зоне инженерного освоения // Экологическое равновесие: природное и историко-культурное наследие, его сохранение и популяризация. Материалы VI международной научно-практической конференции. 2015. С. 133–136.

8. Мухно В.Б., Бевз В.Н., Горбунов А.С., Быковская О.П. Ландшафтно-экологический анализ территорий муниципальных образований // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2014. № 3. С. 40–48.
9. Москвина Н.Н., Козин В.В. Ландшафтное районирование Ханты-Мансийского автономного округа. Ханты-Мансийск: Полиграфист, 2001. 40 с.
10. Самофалова И.А., Кондратьева М.А. Ландшафтоведение: ландшафтно-экологический анализ территории. Пермь: ИПЦ “Прокрость”, 2021. 99 с.
11. Хорошев А.В. Полимасштабная организация ландшафтов Среднего Приобья // Окружающая среда и менеджмент природных ресурсов. Тезисы докладов III Международной конференции, г. Тюмень, 6–8 ноября 2012 г. Тюмень: Изд-во Тюменского государственного университета, 2012. С. 245–247.
12. Хорошев А.В. XII ландшафтная конференция // Изв. Русского географического общества. 2018. Т. 150. № 1. С. 87–90.
13. Belote R. T., Barnett K., Zeller K., Brennan A., Gage J. Examining local and regional ecological connectivity throughout North America // Landscape Ecology. 2022. V. 37. P. 2977–2990. <https://doi.org/10.1007/s10980-022-01530-9>
14. Raven P.H. Science, sustainability, and the human prospect // Science. 2002. Т. 297. V. 5583. P. 954–958. <https://doi.org/10.1126/science.297.5583.954>
15. Rodrigo-Comino J., Bandala E.R., Latif M.T. Relevance of Integrated Air, Soil and Water Research Studies for the New Millennia // Air, Soil and Water Research. 2022. V. 15. <https://doi.org/10.1177/11786221221086256>

Landscape and Ecological Analysis of the Territory of the Surgut District of Khmao-Yugra

E. A. Kuznetsova¹, * and M. A. Kichikova¹

¹Tyumen State University, Tyumen, Russia

*E-mail: e.a.kuznecova@utmn.ru

Abstract—The landscape and environmental analysis was carried out on the example of the Surgut district of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug-Yugra, where the main factor in the degradation of natural objects is pollution of the territory as a result of mining, which accounts for up to 80% of emissions. Landscape provinces as nodal geosystems were used for the analysis. A general structural and morphological assessment of landscapes, an assessment of unfavorable ecological and geographical processes, anthropogenic transformation and ecological infrastructure of landscapes were carried out, and ecologically significant factors of the territory were identified. As a result of the conducted research, a map was compiled reflecting the spatial differentiation of the state of landscape provinces, taking into account anthropogenic impact. It has been established that the best landscape and ecological well-being is possessed by the southern territory of the district (Yugansk-Laryegan province), which is characterized by the containment of anthropogenic activity due to the creation of the Yugansk Nature Reserve. The Vandras-Yugan province serves as a buffer between anthropogenic and least modified natural landscapes, occupying an intermediate position in the assessment. The central part of the Surgut district received the most massive “blow” to the landscapes, as the main transport routes, pipelines, and residential settlements are concentrated here. The northern part of the Surgut district is characterized by waterlogging processes, a high degree of overgrowth and an average degree of transformation of natural landscapes.

Keywords: landscape, Surgut district, ecological and geographical analysis

REFERENCES

1. Atlas Hanty-Mansijskogo avtonomnogo okruga-Yugry. Т. 2. Priroda i ekologiya. Hanty-Mansijsk: OAO NPC “Monitoring”, 2004. 152 s.
2. Bardasova S.S. Strukturno-funkcional’nyj analiz polesskih landshaftov Zapadnoj Sibiri // Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. 2013. № 4. S. 76–86.
3. Bol’shanik P.V. Urovni antropogennoj nagruzki i ekologo-geograficheskoe rajonirovanie territorii HMAO-Yugry // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. 2008. № 317. S. 253–257.

4. Doklad ob ekologicheskoy situacii v Hanty-Mansijskom avtonomnom okruge – Yugre v 2021 godu: Sluzhba po kontrolyu i nadzoru v sfere ohrany okruzhayushchej sredy, ob"ektov zhivotnogo mira i lesnyh otnoshenij Hanty-Mansijskogo avtonomnogo okruga – Yugry. URL: <https://prirodnadzor.admhmao.ru/doklady-i-otchyety/otchety-o-deyatelnosti-prirodnadzora/itogi-ser/2021/6570493/sostoyanie-okruzhayushchey-sredy-na-territorii-khanty-mansiyskogo-avtonomnogo-okruga-yugry-za-3-kvar/> (data obrashcheniya 01.02.2023).
5. Kozin V.V. Problema opredeleniya cennosti i ustojchivosti ekosistem // Prirodopol'zovanie na severo-zapade Sibiri: opyt resheniya problem. Tyumen': Izd-vo TyumGU, 1996. S. 36–48.
6. Kolomyc E.G. Izbrannye ocherki geograficheskoy ekologii: chast' I. Bazovyy landshaftno-ekologicheskij analiz // Samarskaya Luka: problemy regional'noj i global'noj ekologii. 2018. T. 27. Vyp 1. S. 15–129.
7. Kuznecova E.A. Funkcii ekosistem v zone inzhenernogo osvoeniya // Ekologicheskoe ravновесie: prirodnoe i istoriko-kul'turnoe nasledie, ego sohranenie i populyarizaciya. Materialy VI mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2015. S. 133–136.
8. Mihno V.B., Bezv V.N., Gorbunov A.S., Bykovskaya O.P. Landshaftno-ekologicheskij analiz territorij municipal'nyh obrazovaniy // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya. 2014. № 3. S. 40–48.
9. Moskvina N.N., Kozin V.V. Landshaftnoe rajonirovanie Hanty-Mansijskogo avtonomnogo okruga. Hanty-Mansijsk: Poligrafist, 2001. 40 s.
10. Samofalova I.A., Kondrat'eva M.A. Landshaftovedenie: landshaftno-ekologicheskij analiz territorii. Perm': IPC "Prokrost", 2021. 99 s.
11. Horoshev A.V. Polimasshtabnaya organizaciya landshaftov Srednego Priob'ya // Okruzhayushchaya sreda i menedzhment prirodnih resursov. Tezisy dokladov III Mezhdunarodnoj konferencii, g. Tyumen', 6–8 noyabrya 2012g. Tyumen': Izd-vo Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta, 2012. S. 245–247.
12. Horoshev A.V. XII landshaftnaya konferenciya // Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva. 2018. T. 150. № 1. S. 87–90.
13. Belote R.T., Barnett K., Zeller K., Brennan A., Gage J. Examining local and regional ecological connectivity throughout North America // Landscape Ecology. 2022. Vol. 37. P. 2977–2990. <https://doi.org/10.1007/s10980-022-01530-9>
14. Raven P.H. Science, sustainability, and the human prospect // Science. 2002. T. 297, vol. 5583. P. 954–958. <https://doi.org/10.1126/science.297.5583.954>
15. Rodrigo-Comino J., Bandala E.R., Latif M.T. Relevance of Integrated Air, Soil and Water Research Studies for the New Millennia // Air, Soil and Water Research. 2022. Vol. 15. <https://doi.org/10.1177/11786221221086256>

МОРФОДИНАМИКА РУСЛА р. КОСА КАК ОТРАЖЕНИЕ НАПРАВЛЕННОСТИ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ДОЛИНАХ РАЗВИТИЯ ОЗЕРНО-ЛЕДНИКОВЫХ ТЕРРАС (БАССЕЙН ВЕРХНЕЙ КАМЫ)

© 2023 г. Н. Н. Назаров^{а, *}, В. И. Петрова^{б, **}, И. В. Фролова^{б, ***}

^аТихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

^бПермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

*E-mail: nikolainazarovpsu@gmail.com

**E-mail: verapetrova182000@gmail.com

***E-mail: irvik13@gmail.com

Поступила в редакцию 10.05.2023 г.

После доработки 23.10.2023 г.

Принята к публикации 22.11.2023 г.

Статья посвящена выявлению особенностей развития русловых процессов в речных долинах с распространением озерно-ледниковых террас. В качестве примера выбран р. Коса — крупнейший правобережный приток верхнего течения Камы. Для дешифрирования космических снимков и получения количественной информации использовались ресурсы GoogleEarthPro и Яндекс Карты. На основе анализа элементов пойменно-русловых комплексов проведена морфодинамическая типизация русла. В качестве особенностей развития русловых процессов на участках распространения озерно-ледниковой террасы рассматривался показатель соотношения ширины поймы к ширине долины. В верхнем течении Косы (за пределами Косинской низменности) это соотношение составляет 1 : 1, в среднем — 1 : 9, в нижнем — 1 : 3. К особенностям развития русловых процессов относится расположение пояса меандрирования строго в левой прибортовой части долины, что указывает на наличие в прошлом устойчивого и продолжительного по времени смещения русла с востока на запад. Для верхнего течения реки ведущими морфодинамическими типами русла являются свободные сегментные излучины и адаптированное прямолинейное русло. В среднем течении Косы, в котором большая часть долины представлена озерно-ледниковой террасой, при сохранении ведущей роли сегментных излучин значимую роль в структуре морфодинамических типов русел уже играют вынужденные излучины. При этом наблюдается высокая доля распространения адаптированного прямолинейного русла.

Ключевые слова: надпойменная терраса, русловые процессы, морфодинамическая классификация русел, озерно-ледниковая терраса, приледниковый подпрудный водоем

DOI: 10.31857/S0869607123030102, **EDN:** NWDGJF

ВВЕДЕНИЕ

Выявление особенностей развития русловых процессов в долинах распространения озерно-ледниковых террас, кроме теоретического значения, имеет перспективы решения и ряда региональных вопросов. В частности, у геоморфологов и гидрологов-русловиков так и не сформировалось единое мнение о причинах существования явных различий в морфолого-морфометрических характеристиках элементов рельефа

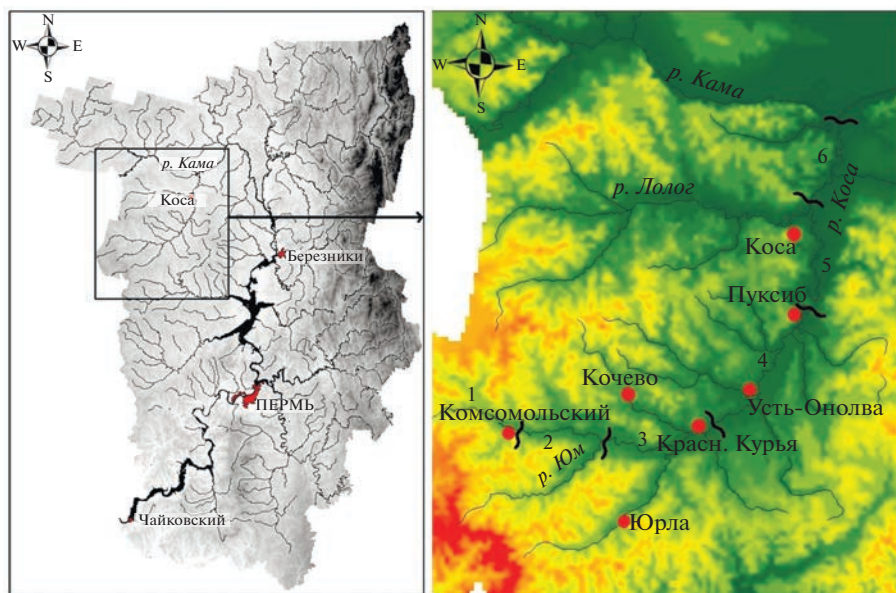


Рис. 1. Схема расположения р. Коса.

Fig. 1. The location of the Kosa river.

между пойменно-русовыми комплексами речных долин, формировавшихся в европейской части России к северу от 59° с.ш. — зоны преимущественного распространения озерно-болотных, ледниковых и водно-ледниковых отложений, и территорий, расположенных к югу от этой широты [1, 4, 7, 11]. Отличительными особенностями речных долин в бассейнах Вычегды, Печеры, верхнего течения Камы и некоторых других рек, в которых происходило образование приледниковых подпрудных водоемов, как известно, служат их значительная ширина и высокая степень заболоченности.

Для большей части долин таких рек характерным признаком также является частое развитие односторонней поймы, при которой некоторые участки коренного склона долины при наличии извилистого русла становятся морфологическими элементами излучин. Расположение одного из крыльев излучины вдоль борта долины, следуя морфодинамической классификации русел МГУ [13], служит основанием для отнесения их к элементам адаптированного русла, чаще всего к сочетанию вынужденных и собственно адаптированных (с верхним крылом у коренного берега и нижним — в пойменных берегах) излучин. Вторым примером прямого влияния коренного склона на дифференциацию русел по морфодинамическим признакам является формирование прямолинейных широкопойменных нетрансформирующихся (адаптированных) русел. В этом случае односторонняя пойма и примыкающие к ней надпойменные террасы обычно находятся в состоянии активного заболачивания, что часто становится одним из главных факторов ограничения воздействия боковой эрозии на данные геосистемы. В настоящее время у рек приледниковых областей место и роль адаптированных излучин и прямолинейных широкопойменных нетрансформирующихся русел в формировании структуры морфодинамических типов русла не определены и данный вопрос требует специального изучения.

В Пермском крае одной из таких рек, бассейн которой располагается в пределах ландшафтов, сложенных ледниковыми, водно-ледниковыми и озерно-ледниковыми

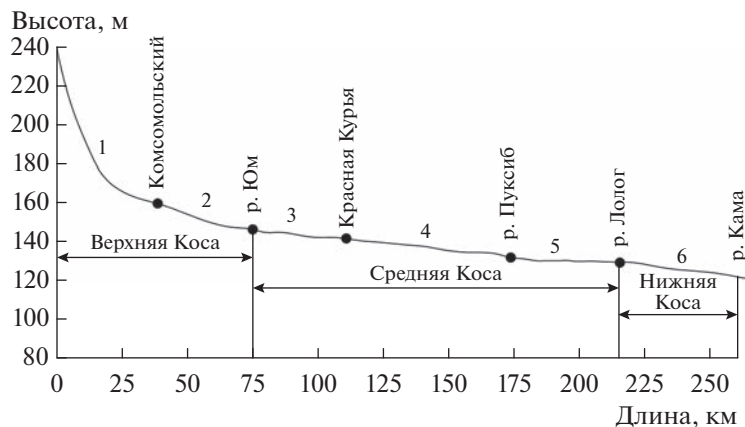


Рис. 2. Дифференциация р. Коса на верхнее, среднее и нижнее течения с выделением на продольном профиле реки геоморфологических участков: 1, 2 ... 6.

Fig. 2. The upper stream, middle stream, and downstream of the Kosa river with geomorphological sections on the longitudinal profile of the river: 1, 2 ... 6.

отложениями, а днище речной долины кроме аллювиальных комплексов представлено озерно-ледниковой террасой, является р. Коса — крупнейший правобережный приток верхнего течения Камы (рис. 1).

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДЫ

Истоки Косы расположены на восточном склоне Верхнекамской возвышенности. Продольный профиль русла реки, выработанный и на всем протяжении не имеет резких перегибов (рис. 2). В своей верхней части река имеет субширотное (восточное) направление и по мере постепенного перехода в Косинскую низменность меняет направление на меридиональное (северное). На основе учета уклона русла, а также вклада основных притоков в объемы стока, выделяется верхнее, среднее и нижнее течения. *Верхняя Коса* ограничивается устьем р. Юм, ниже которого происходит быстрое выполаживание уклонов до значений, характерных практически для всей остальной части реки ($\approx 0.1\text{‰}$). *Среднее* течение протягивается до устья крупнейшего левобережного притока — Лолога, ниже которого, кроме весомой прибавки объема стока (более 20%), происходит небольшое увеличение уклона реки. *Нижнее* течение Косы, по сравнению с расположенными выше участками реки, отличается резким снижением количества притоков при одновременном расширении днища долины за счет увеличения ширины надпойменных террас.

Среднегодовой расход воды в Косе — $43.9 \text{ м}^3/\text{с}$. Питание бассейна преимущественно снеговое, что приводит к высоким половодьям, сменяющимся относительно низкими уровнями в меженный период. Ширина русла в среднем течении составляет 30–50 м, в нижнем течении — 70–90 м. При подъеме воды на 5 м над межнным урезом (м. у.) начинается затопление поймы и заполнение стариц на правом берегу. В долине Косы выделяется два уровня поймы, отличающихся как относительной высотой, так и характером растительности. В пределах низкой поймы, ежегодно затопляемой, широкое распространение получили молодые еще не заросшие старицы и заливные луга. Ее высота составляет 2–3 м над м. у. Высокая пойма, покрытая в основном лесом, ослож-

нена гривистым рельефом и возвышается на 4–5 м над м. у. Мощность пойменных отложений достигает 16–17 м [10].

Анализ отложений Косинской низменности указывает на то, что современная (позднеплейстоцен-голоценовая) долина Косы в среднем и нижнем течении вложена в верхнекамскую озерную террасу низкого уровня [8]. В микулинской палеодолине контуры русловых образований древнего водотока в виде прирусловых валов и грив древних больших излучин от современного русла удалены на расстояние 10–15 км. В среднем и нижнем течении Косы кроме поймы фиксируются две надпойменные террасы. Ширина первой (аллювиальной) достигает 0.5–1.5 км, второй (озерно-ледниковой), не занятой верховым болотом – 0.5–1.2 км. С учетом заболоченной части ширина второй террасы в среднем составляет 3.0–4.0 км. Отложения плейстоцена и голоцена подстилаются песчаниками, глинами и мергелями пермского возраста. Относительная высота первой надпойменной террасы 7–8 м над м. у., второй – 17–19 м над м. у. [3]. Мощность отложений первой террасы – 20–22 м. Для второй террасы данный показатель изменяется в диапазоне от 1 до 20 м.

Установлено, что прохождение руслоформирующих расходов воды (Q_{ϕ}) в реке (с. Коса) происходит в трех интервалах: два в пределах русла – нижний 406 м³/с и средний 576 м³/с, при затопленной пойме – верхний 576 м³/с. Примечательно, что для всех интервалов характерна низкая обеспеченность Q_{ϕ} – 1.2, 0.45 и 0.001%, соответственно [16].

В процессе дешифрирования космических снимков и получения количественной информации (абсолютные отметки рельефа, протяженность) были задействованы ресурсы GoogleEarthPro, Яндекс Карты и топографические карты масштаба 1 : 25000. Высокая степень разрешения материалов, находящихся в свободном доступе, позволила осуществить визуальное распознавание элементов пойменно-русловых комплексов и провести морфодинамическую типизацию русел. Все измерения проводились

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как показало дешифрирование космических снимков, основными морфодинамическими типами русла в верхнем, среднем и нижнем течении Косы, являются свободные и вынужденные излучины, а также участки с относительно прямолинейным руслом. Пойменно-русловые разветвления фиксировались в основном в верхнем течении. По преобладанию тех или иных разновидностей русла в пределах верхнего течения было выделено два участка (I, II), в среднем – три (III, IV, V), в нижнем – один (VI) (рис. 2).

Первый участок (I) включает в себя отрезок Косы с 15 по 35 км (от истока), а именно с места, где заканчивается объединение притоков по своим гидрологическим параметрам и характеристикам, близким врезанному руслу главной реки. Ширина русла на первом участке составляет 10–15 м, поймы – 80–150 м, долины – до 300 м. Соотношение ширины поймы с шириной долины составляет примерно 1 : 2, редко – 1 : 3. Уклон реки – 0.75‰. Ведущую роль в структуре морфодинамических типов и их разновидностей, определяющих направленность и активность морфолитогенеза, играют свободные сегментные излучины и участки адаптированного относительно прямолинейного неразветвленного русла (табл. 1). Первые составляют 44%, вторые – 36% всей длины пояса меандрирования. Петлеобразные излучины и пойменно-русловые разветвления составляют соответственно 19 и 1% протяженности участка.

Второй участок (II) является самым нижним в группе участков, относящихся к *верхнему* течению. Средняя ширина поймы (от пос. Комсомольский до устья р. Юм) составляет около 160 м, при ширине долины 0.2–2.0 км. Ведущую роль в структуре морфодинамических типов, как и на первом участке, играют сегментные излучины (64%) и относительно прямолинейное неразветвленное (26%) русло (рис. 3). Вписанные и

Таблица 1. Структура морфодинамических типов русла на участках р. Коса, %
Table 1. The structure of morphodynamic channel type of the Kosa river, %

Разновидности русла	Участок					
	I	II	III	IV	V	VI
Сегментные излучины	44	64	65	61	61	59
Петлеобразные излучины	19	7	—	—	—	—
Адаптированное прямолинейное неразветвленное русло	36	26	27	—	17	—
Широкопойменное прямолинейное неразветвленное русло	—	—	—	25	19	23
Вынужденные излучины	—	—	7	13	3	7
Пойменно-русловые разветвления (пойменная многоруканность)	1	—	—	—	—	11
Вписанные излучины	—	3	—	—	—	—
Излучины с верхним крылом у коренного берега	—	—	1	1	—	—

петлеобразные излучины в сумме составляют только 10% всей длины участка. Староречья в виде прорванных излучин встречаются редко. Пойма, в основном, покрыта лесом. По характеру (морфологии и морфометрии) старичных образований можно предположить, что развитие русловых процессов на втором и первом участках находится в самом начале нового этапа морфогенеза речной долины. Широкое развитие сегментных пологих излучин и прямолинейных участков вдоль пойменных берегов между вынужденными или адаптированными излучинами позволяет по степени развитости отнести их по классификации [14, 15] к III структурному уровню проявлений русловых процессов для данных морфодинамических типов русел. Проявлений ме-



Рис. 3. Относительно прямолинейные участки русла и вынужденные излучины в районе д. Усть-Янчер.
Fig. 3. The straight sections and forced bends in the area of village Ust'-Yancher.



Рис. 4. Система сложных петлеобразных, вписанных и вынужденных излучин ниже устья р. Юм.

Fig. 4. The loop-shaped bends, inscribed bends, and forced bends below the mouth of Yum river.

андрирования на более низком структурном уровне (побочные русла) не зафиксировано.

Третий участок (III) — от устья р. Юм до с. Красная Курья — относится к *среднему* течению Косы и на всем его протяжении характеризуется уклоном 0.08‰. Начиная с устья р. Юм происходят качественные изменения в морфометрии элементов речной долины. Ширина русла увеличивается до 25–30 м, поймы — до 400–600 м, долины в расширениях — до 4.7 км. Соотношение ширины поймы с шириной долины составляет в среднем 1 : 9. Среди разновидностей русел также, как и в верхнем течении Косы, лидируют сегментные излучины (65%). На втором месте находится прямолинейное неразветвленное русло (27%); на вынужденные излучины и излучины с верхним крылом вдоль коренного берега в сумме приходится 8%. Наличие крутых сегментных и сложных петлеобразных излучин позволяет отнести их к более высокому IV структурному уровню развития руслового процесса для данного морфодинамического типа русла (рис. 4). Увеличение развитости речных излучин, по-видимому, обусловлена постепенным выполаживанием уклона продольного профиля русла и, как следствие, снижением активности донной эрозии при одновременном повышении эрозионного воздействия за счет боковой эрозии.

Четвертый участок (IV) — от с. Красная Курья до пос. Пуксиб — характеризуется расширением русла Косы до 40–50 м, поймы — до 700 м. При средней ширине долины около 4.5 км, в устье р. Онолва достигает 6.4 км. Соотношение ширины поймы с шириной долины в среднем составляет 1 : 9. Если на первых трех участках преобладал адаптированный тип русла, то здесь ведущим становится широкопойменный. Из разновидностей русла лидирующими по протяженности остаются сегментные излучины (61%) и прямолинейное неразветвленное русло (25%). Вынужденные излучины составляют 13%. Доля излучин с верхним крылом вдоль коренного берега не превышает 1%. По сравнению с третьим участком свободные сегментные излучины здесь более пологие, а петлеобразные и прорванные встречаются реже (рис. 5). Практически на

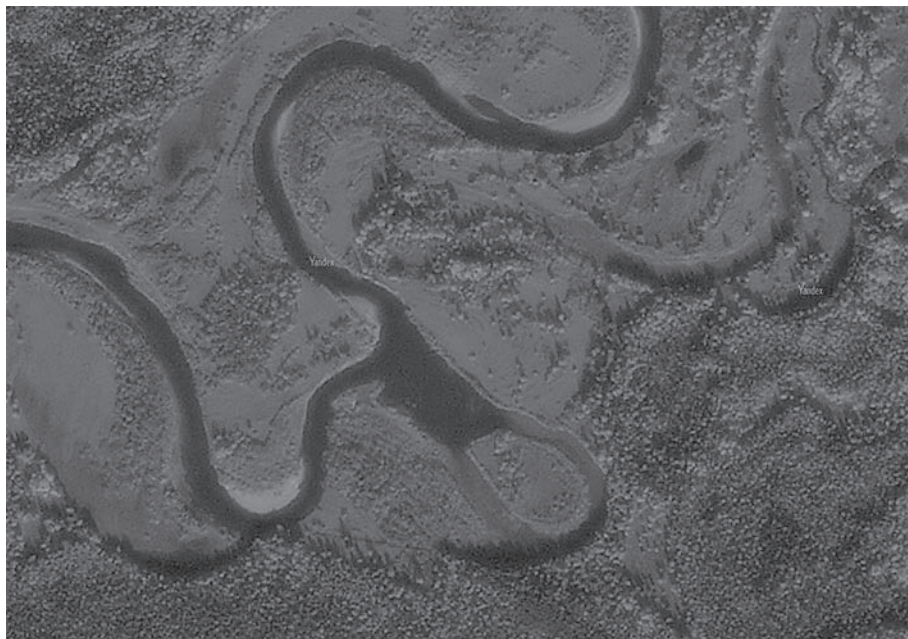


Рис. 5. Образование затона в месте прорыва петлеобразной вписанной излучины ниже с. Усть-Онолва.

Fig. 5. The formation of a backwater in the place at the avulsion of a loop-shaped inscribed bend below village Ust'-Onolva.

всем протяжении участка поймы является односторонней, а левый борт долины становится склоном, вдоль фронта которого происходит расширение долины в результате воздействия русловой (боковой) эрозии. С противоположной правой стороны поймы на поверхности первой надпойменной террасы в некоторых местах хорошо читаются очертания палеорусел Косы в виде пологих спаренных гряд с признаками первичного заболачивания между ними. Значительно масштабней процесс активного заболачивания наблюдается в пределах второй надпойменной террасы. Обширные по площади минеральные острова среди верхового болота, часто имеющие дугообразную форму с одной из сторон, указывают на местоположение древних староречий, контуры которых из-за локальной смены степени увлажнения и состояния болотной растительности часто “просвечивают” через торфяные толщи (рис. 6).

Пятый участок (V) — от пос. Пуксиб до устья р. Лолог — при сохранении средних параметров русла в 40–50 м отличается от выше расположенного участка резким приростом средней ширины поймы — 1.5 км. Ширина долины реки в этом месте колеблется в пределах 4.5–8.0 км. Соотношение ширины поймы с шириной долины в среднем составляет 1 : 7. Сегментные излучины, как и на всех других участках Косы, лидируют среди основных разновидностей морфодинамических типов (61%). Широкопойменные и адаптированные прямолинейные неразветвленные русла по своей протяженности имеют примерно равное соотношение — 19 и 17% соответственно. Замыкают список основных разновидностей русла вынужденные излучины (3%). В отличие от четвертого участка на пятом участке наблюдается более высокая степень развитости излучин. Пойменные староречья часто имеют петлеобразную форму и представляют собой очень молодые старицы, еще сравнительно недавно являвшиеся действующими излучинами реки. Древние элементы русловой сети в пределах надпойменных террас

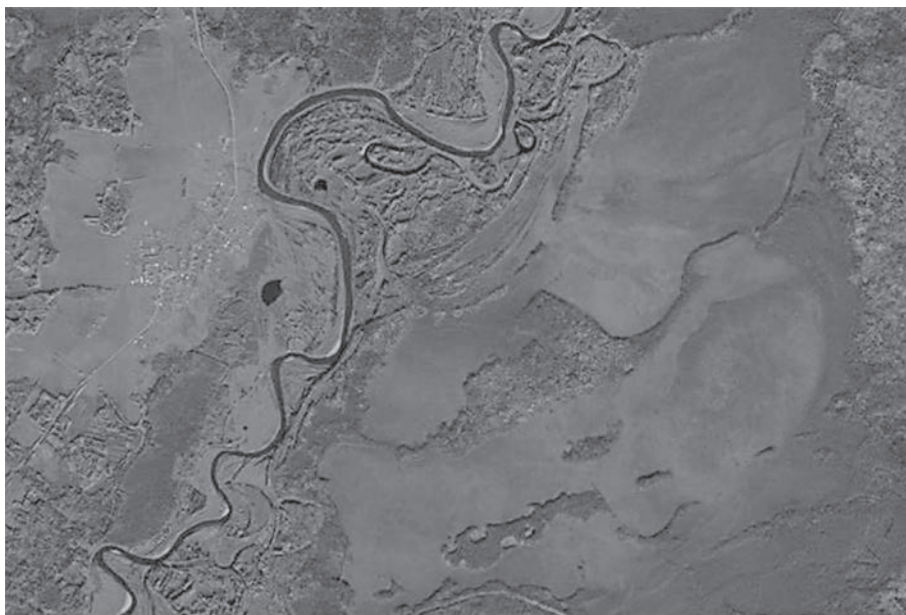


Рис. 6. Фрагменты(контуры) староречий в пределах надпойменных террас у с. Пуксиб.

Fig. 6. The fragments (contours) of old channel within the fluvial terrace above floodplain near the village Puksib.

по своей морфологии и морфометрии в целом соответствуют параметрам, характерным и для четвертого участка. В пределах надпойменных террас верховое болото является ведущей геосистемой в структуре природных комплексов долинного ландшафта.

Шестой участок (VI) — от устья р. Лолог до устья р. Камы — характеризуется увеличением значений параметров морфометрических характеристик речного русла и элементов речной долины. Ширина русла Косы колеблется в интервале 85–100 м, поймы — 2.0–3.0 км, речной долины — 6.0–9.0 км. Соотношение ширины поймы с шириной долины в среднем составляет 1 : 3. Ширина пояса меандрирования здесь практически двукратно превышает этот параметр на пятом участке и достигает 1.5–2.5 км. Ведущее положение в структуре разновидностей русла ожидаемо занимают сегментные излучины (59%) и широкопойменное прямолинейное неразветвленное русло (23%). Вынужденные излучины составляют всего 7%. Отличительной чертой в структуре морфодинамических типов по сравнению со всеми другими участками верхнего и среднего течения Косы является достаточно высокая доля пойменно-русловых разветвлений (11%). Самая нижняя часть участка, в отличие от расположенных выше по течению пойменных геосистем, располагается уже в пределах двухсторонней поймы. При этом большая часть правобережного участка дна долины вплоть до соединения с пойменно-русловыми комплексами Камы представлена массивом верхового болота, на поверхности которого хорошо опознаются элементы древней эрозионной сети и располагаются “остаточные” озера (рис. 7).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ распределения морфодинамических типов русла Косы на отдельных участках реки указывает на неоднородность их состава в верхнем, среднем и нижнем тече-

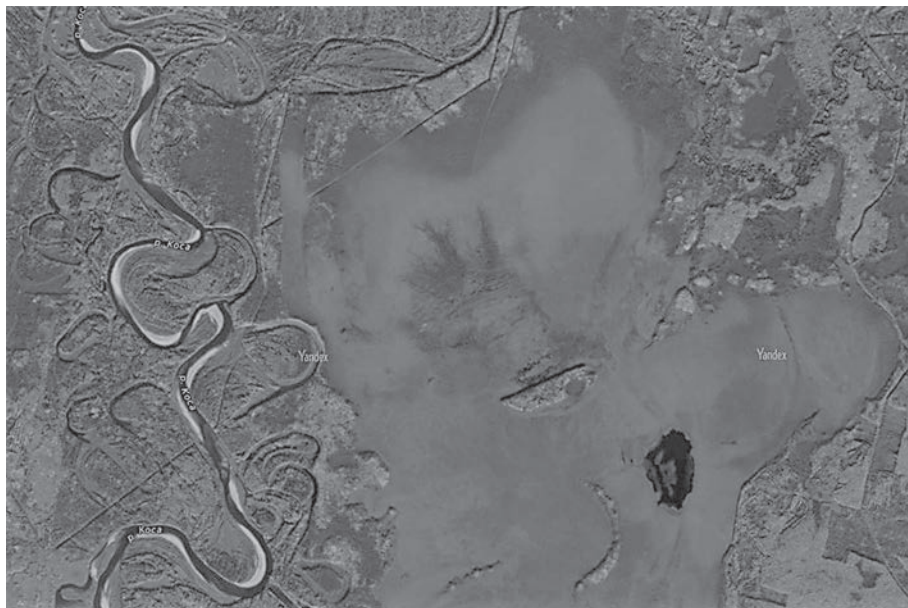


Рис. 7. Проявления элементов староречий Косы в болотном массиве палеодолины.

Fig. 7. The manifestation of Kosa old channels in the swamp area of the paleovalley.

нии. Объединяющим моментом в структуре русел реки на всех ее участках является безусловное лидерство свободных сегментных излучин.

Основное отличие всех трех участков среднего течения от участков верхнего течения состоит в резком смещении пояса меандрирования в сторону левого борта долины и активном заболачивании правобережной и центральной зон дна долины. Характерным признаком третьего и пятого участков является широкое распространение в них односторонней поймы. Примечательно, что резкое возрастание ширины долины в пределах четвертого и пятого участков, расположенных уже в пределах Косинской низменности, по-видимому, стало одной из причин резкого возрастания доли отрезков реки с широкопойменным прямолинейным неразветвленным руслом.

В среднем течении Косы пойма в отличие от залесенной поймы в ее верхнем течении представлена в основном лугами и староречьями в виде петлевидных прорванных и крутых спрямленных излучин. Размеры излучин, образование которых, по-видимому, относится к предыдущему этапу развития речной долины, в целом, меньше современных, но при этом пояс их меандрирования в 2–3 раза превышает его современные параметры.

Для шестого участка, который в единственном числе представляет нижнее течение реки, главной особенностью является резкое возрастание доли пойменно-русловых разветвлений. Логично предположить, что основной причиной их образования (через спрямление свободных излучин при затопленной пойме) является подпруживающий эффект Камы на приустьевом участке Косы, возникающий в периоды половодья. В остальном же набор разновидностей русла в основном соответствует структуре четвертого участка. Кроме староречий, относящихся к предшествующему и современному этапам формирования долины Косы, под толщей торфяника довольно четко проявляются фрагменты палеорусла шириной около 500 м, что в 3–5 раз превышает современные параметры русла (рис. 6, 7).

Принимая во внимание расположение бассейна Косы в непосредственной близости от границ распространения плейстоценовых покровных оледенений, одностороннее развитие долины реки в среднем и нижнем течении можно объяснить сложностью и многоэтапностью ее моделировки озерными, болотными и флювиальными процессами, включая деятельность как постоянных, так временных водотоков [8]. Сформированная в микулинское межледниковье верхнекамская озерно-ледниковая терраса в дальнейшем испытала не один этап эволюционной перестройки пойменно-русловых комплексов. Местоположение следов прирусловых глив и пойменных староречий, контуры прямолинейного русла, “просвечивающие” через толщу торфяника, четко указывают на этапность направленного смещения русла в сторону левого борта долины. Механизм скатывания русла Косы в западном направлении, при котором происходило преодоление силы Кориолиса (сила, отклоняющая реки северного полушария вправо), можно объяснить продолжительной и эффективной деятельностью эоловых процессов. Судя по размерам макроизлучин и ширине палеорусел максимальные расходы потока в отдельные периоды формирования речной долины достигали более $1000 \text{ м}^3/\text{с}$ (современные значения максимального расхода воды в с. Коса составляют $453 \text{ м}^3/\text{с}$), которые являются граничным значением проявления эффекта (закона) Бэра–Бабины [2]. По заключению Р.С. Чалова [12], проанализировавшего направленность развития береговых геосистем на поймах сибирских рек, развевание (дефляция) песчаного материала на подветренной части речных долин долины способствует его переносу через водную поверхность и отложению на наветренных берегах долины. Как следствие, на них формируются эоловые формы, постепенно отжимающие русло в сторону противоположного коренного берега, что в свое время было отмечено и другими исследователями пойменных процессов [5, 6, 9]. Принимая во внимание наличие неограниченного количества песчаного материала на прилегающей к долине поверхности водораздела, перекрытого флювиогляциальными отложениями песчаного состава, и песка на прирусловых отмелях, механизм направленного развития долины по односторонней модели формирования поймы в позднем плейстоцене и начале голоцена становится вполне реалистичным. Кроме того, эоловому переносу, перерапределявшему песок с подветренной части долины на наветренную, благоприятствовали периоды активной ветровой обстановки с преобладанием восточной составляющей в регионе [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К особенностям изменения значений морфолого-морфометрических характеристик пойменно-русловых комплексов и надпойменных террас в долине р. Коса от верховьев к устью следует отнести, во-первых, соотношения ширины поймы с шириной долины на разных участках реки — в верхнем течении оно составляет 1 : 1 или близкое к этому значению, в среднем — 1 : 9, в нижнем — 1 : 3. Во-вторых, при достижении рекой Косинской низменности (среднее течение), где пойма и первая надпойменная терраса начинают врезаться в озерно-ледниковую террасу, пояс меандрирования располагается в левой прибортовой части долины, что указывает на наличие в прошлом этапа устойчивого и продолжительного по времени смещения русла в западном направлении.

Анализ и типизация морфологических различий в плановой конфигурации русла р. Коса показали наличие особенностей в структуре морфодинамических типов на участках распространения озерно-ледниковой террасы (Косинская низменность) и участках с ее отсутствием. Для верхнего течения реки (участки первый и второй), пересекающего восточные отроги Верхнекамской возвышенности, ведущими разновидностями русла являются свободные сегментные излучины и адаптированное относи-

тельно прямолинейное неразветвленное русло. В сумме их длина составляют 80–90% всей протяженности этих участков. От 7 до 19% в них приходится на петлеобразные излучины. Среднее течение Косы, в котором большая часть долины представлена озерно-ледниковой террасой, при сохранении ведущей роли сегментных излучин значимую роль в структуре морфодинамических типов русел начинают играть вынужденные и собственно адаптированные (с верхним крылом у коренного берега и нижним — в пойменных берегах) излучины — 3–14%. При этом сохраняется высокая доля адаптированного относительно прямолинейного неразветвленного русла — до 27%. Отличительной чертой участка, относящегося к нижнему течению, в котором активность и направленность русловых процессов определяется гидрологической связью с Камой (подпруживающий эффект, возникающий в устьевой части Косы в периоды половодий), является высокая доля пойменно-русловых разветвлений (11%).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Большаинов Д.Ю., Веркулич С.Р.* Каналы стока талых ледниковых вод и возможности палеогеографических реконструкций // Изв. РГО. 1990. Т. 122. Вып. 1. С. 58–64.
2. *Дедков А.П.* Экзогенное рельефообразование в Казанско-Ульяновском Поволжье. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1970. 255 с.
3. *Демаков Д.А., Лычагина Е.Л., Зарецкая Н.Е.* и др. Косинские мезолитические стоянки в контексте истории природной среды Верхнего Прикамья в позднеледниковье и раннем голоцене // Геоморфология. 2023. № 1. С. 91–106.
4. *Зайцев В.К.* К истории современных долин рек Вишерки и Березовки (правых притоков Колвы) // Известия Всесоюз. геогр. общ-ва. 1941. Т. 73. Вып. 2. С. 287–291.
5. *Земцов А.А., Бураков Д.А.* Современные геоморфологические процессы в центральной части Западно-Сибирской равнины // Проблемы геоморфологии и неотектоники платформенных областей Сибири. Новосибирск: Наука, 1970. С. 87–99.
6. *Коротаев В.Н., Михайлов В.Н., Бабич Д.Б. и др.* Гидролого-морфологические процессы, динамика гидрографической сети и русловые деформации в дельте р. Лены // Земельные и водные ресурсы: противозерозионная защита и регулирование русел. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. С. 120–144.
7. *Лавров А.С., Потапенко Л.М.* Неоплейстоцен Печерской низменности и Западного Прикамья (стратиграфия, палеогеография, хронология). М.: ОАО “Можайский полиграфический комбинат”, 2012. 191 с.
8. *Лавров А.С., Потапенко Л.М.* Неоплейстоцен северо-востока Русской равнины. М.: Аэрогеология, 2005. 348 с.
9. *Махинов А.Н.* Эоловые формы рельефа в пойме реки Амур // Геоморфология. 2017. № 2. С. 52–62.
10. *Назаров Н.Н., Егоркина С.С.* Реки Пермского Прикамья: Горизонтальные русловые деформации. Пермь: Изд-во “Звезда”, 2004. 155 с.
11. *Рябков Н.В.* Перестройка речных систем северо-востока Русской равнины в связи с древними оледенениями этого района // Проблемы перестройки и перехвата речных долин. М., 1975. С. 59–70.
12. *Чалов Р.С.* Влияние эоловых процессов (фактора ветра) на формирование и морфологию русел и пойм равнинных рек // Географический вестник. 2022. № 2 (61). С. 6–16. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2022-2-6-16>
13. *Чалов Р.С.* Русловедение: теория, география, практика. Т. 2: Морфодинамика речных русел. М.: КРАСАНД, 2011. 960 с.
14. *Чалов Р.С., Чалов С.Р.* Структурные уровни и морфодинамическая классификация русловых разветвлений // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 3. С. 259–271.
15. *Чалов Р.С., Чалов С.Р.* Структурные уровни русловых процессов и морфодинамические типы русла // Тридцать седьмое пленар. межвуз. координац. совещание по проблемам эрозионных, русловых и устьевых процессов. М., 2022. С. 170–173.
16. *Чалов Р.С., Штанкова Н.Н.* Сток наносов, руслоформирующие расходы воды и морфодинамические типы русел рек бассейна Камы // Вопросы физической географии и геоэкологии Урала. Пермь, 2000. С. 99–116.

17. Heggen M.P., Birks H.H., Heiri O., Grytnes J.A., Birks H.J.B. Are fossil assemblages in a single sediment core from a small lake representative of total deposition of mite, chironomid, and plant microfossil remains? // *Journal of Paleolimnology*. 2012. 48: 669–691.

Morphodynamic of the Kosa River Channel as a Reflection of the Direction of the Channel Processes in the Development Valleys of Glaciolacustrine Terraces (Upper Kama Basin)

N. N. Nazarov¹, *, V. I. Petrova², **, and I. V. Frolova², ***

¹*The Pacific Geographical Institute of the Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia*

²*Perm State university, Perm, Russia*

*E-mail: nikolainazarovpsu@gmail.com

**E-mail: verapetrova182000@gmail.com

***E-mail: irvik13@gmail.com

Abstract—The article is devoted to identification of peculiarities of development of channel processes in river valleys with distribution of glaciolacustrine terraces. Kosa river was chosen as the largest right tributary of the upper Kama. The resources of GoogleEarthPro and Yandex Maps were used in the process of interpretation of space images and obtaining quantitative information. The morphodynamic types of a river channel was made on the basis of the analysis of elements of floodplain-channel landscape complexes. The indicator of the ratio of the width of the floodplain to the width of the valley was considered as a feature of the development of channel processes in the areas of the distribution of the glaciolacustrine terrace. This ratio is 1 : 1 at the upper Kosa river outside the Kosinskaya Lowland. It is 1 : 9 at the middle Kosa river, and 1 : 3 at the Kosa downstream. The location of the meander belt in the left of the valley side is a feature of the development of channel processes. This indicates the presence of a stable and long-term planform channel changes from the east to the west in the past. The leading morphodynamic channel types are free meanders and confined straight channel for the Kosa upper stream. In the Kosa middle stream, in which most of the valley is represented by a glaciolacustrine terrace, confined bends already play a significant role in the structure of morphodynamic types of a river channel, while maintaining the leading role of free meanders. At the same time, a high proportion of the distribution of the straight confined channel is observed.

Keywords: fluvial terrace above floodplain, channel processes, morphodynamic classification of river channels, glaciolacustrine terrace, proglacial lake

REFERENCES

1. Bol'shiyanov D.Yu., Verkulich S.R. Kanaly stoka talyx lednikovyx vod i vozmozhnosti paleogeograficheskix rekonstrukcij // *Izvestiya RGO*. 1990. T. 122. Vyp. 1. S. 58–64.
2. Dedkov A.P. Ekzogennoe rel'efoobrazovanie v Kazansko-Ul'yanovskom Povolzh'e. Kazan': Izd-vo Kazan. un-ta, 1970. 255 s.
3. Demakov D.A., Lychagina E.L., Zareczkaya N.E. i dr. Kosinskie mezoliticheskie stoyanki v kontekste istorii prirodnoj sredy Verhnego Prikam'ya v pozdnelednikov'e i rannem golocene // *Geomorfologiya*. 2023. № 1. S. 91–106.
4. Zajcev V.K. K istorii sovremennykh dolin rek Visherki i Berezovki (pravyykh pritokov Kolvy) // *Izvestiya Vsesoyuzn. geogr. obshh-va*. 1941. T. 73. Vyp. 2. S. 287–291.
5. Zemczov A.A., Burakov D.A. Sovremennyye geomorfologicheskie processy v central'noj chasti Zapadno-Sibirskoj ravniny // *Problemy geomorfologii i neotektoniki platformnykh oblastey Sibiri*. Novosibirsk: Nauka, 1970. S. 87–99.
6. Korotaev V.N., Mixajlov V.N., Babich D.B. i dr. Gidrologo-morfologicheskie processy, dinamika gidrograficheskoy seti i ruslovyje deformacii v del'te r. Leny // *Zemel'nye i vodnye resursy: protivoprotivopozitsionnaya zashhita i regulirovanie rusel*. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1990. S. 120–144.
7. Lavrov A.S., Potapenko L.M. Neoplejstocen Pecherskoj nizmennosti i Zapadnogo Pritiman'ya (stratigrafiya, paleogeografiya, xronologiya). M.: OAO "Mozhayskij poligraficheskij kombinat", 2012. 191 s.
8. Lavrov A.S., Potapenko L.M. Neoplejstocen severo-vostoka Russkoj ravniny. M.: *Arheologiya*, 2005. 348 s.

9. Maxinov A.N. Eolovye formy rel'efa v pojme reki Amur // *Geomorfologiya*. 2017. № 2. S. 52–62.
10. Nazarov N.N., Egorkina S.S. Reki Permskogo Prikam'ya: Gorizontal'nye ruslovyje deformacii. Perm': Izd-vo "Zvezda", 2004. 155 s.
11. Ryabkov N.V. Perestrojka rechnyx sistem severo-vostoka Russkoj ravniny v svyazi s drevnimi oledeneniyami etogo rajona // *Problemy perestrojki i perexvata rechnyx dolin*. M., 1975. S. 59–70.
12. Chalov R.S. Vliyanie eolovyh processov (faktora vetra) na formirovanie i morfologiyu rusel i pojm ravniny rek // *Geograficheskij vestnik*. 2022. № 2 (61). S. 6–16.
<https://doi.org/10.17072/2079-7877-2022-2-6-16>
13. Chalov R.S. Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika. T. 2: Morfodinamika rechnyx rusel. M.: KRASAND, 2011. 960 s.
14. Chalov R.S., Chalov S.R. Strukturnye urovni i morfodinamicheskaya klassifikaciya ruslovyx razvetvlenij // *Vodnye resursy*. 2020. T. 47. № 3. S. 259–271.
15. Chalov R.S., Chalov S.R. Strukturnye urovni ruslovyx processov i morfodinamicheskie tipy rusla // *Tridezat' sed'moe plenar. mezhvuz. koordinacz. soveshhanie po problemam erozionnyx, ruslovyx i ust'evyx processov*. M., 2022. S. 170–173.
16. Chalov R.S., Shtankova N.N. Stok nanosov, rusloformiruyushhie rasxody vody i morfodinamicheskie tipy rusel rek bassejna Kamy // *Voprosy fizicheskoy geografii i geoekologii Urala*. Perm', 2000. S. 99–116.
17. Heggen M.P., Birks H.H., Heiri O., Grytnes J.A., Birks H.J.B. Are fossil assemblages in a single sediment core from a small lake representative of total deposition of mite, chironomid, and plant macrofossil remains? // *Journal of Paleolimnology*. 2012. 48: 669–691.

КАРСТ СТЕРЛИТАМАКСКИХ (БАШКИРСКИХ) ШИХАНОВ И ИХ ОКРЕСТНОСТЕЙ В ЮЖНОМ ПРЕДУРАЛЬЕ

© 2023 г. А. И. Смирнов*

Институт геологии УФИЦ РАН, Уфа, Россия

**E-mail: smalil@mail.ru*

Поступила в редакцию 12.09.2023 г.

После доработки 28.09.2023 г.

Принята к публикации 22.11.2023 г.

Шиханы, или горы-одиночки, — местное название островных гор в равнинных предгорьях Южного Урала. Шиханы представляют собой денудационные останцы, иногда с сохранившимися остатками миоцен-плиоценовой поверхности выравнивания на их вершинах, что позволяет оценивать общее время развития карстовых процессов не менее чем в 5 млн лет. Несмотря на более чем 200-летний период исследований шиханов, карсту и его проявлениям до настоящего времени практически не уделялось внимания. По стандартной методике карстологической съемки составлена карта карста территории шиханов и приведены ее природные условия, определяющие развитие карста. Охарактеризованы традиционные и уникальные формы карбонатного карста шиханов и сульфатного карста их ближайших окрестностей. Установлено, что наряду с широко распространенными и известными умеренных широтах карстопроявлениями, в гипсах кунгурского яруса в районе исследований развиты очень редко встречающиеся коррозионные колодцы, образующие карстовые поля с самой высокой плотностью карстовых форм, известной на Восточно-Европейской равнине. Зафиксированы гипсовые пещеры на различных стадиях формирования, а также полуслепые карстово-эрозионные лога не типичные для равнинного сульфатного карста региона. Для карбонатного карста шиханов в известняках сакмарского яруса установлено самое высокое местоположение карстовых пещер в равнинных предгорьях Южного Урала и древний (ранний неоплейстоцен) возраст их заложения. Главной особенностью распространения как поверхностных, так и подземных карстопроявлений является четко выраженная зависимость форм и частоты их встречаемости от хода формирования элементов рельефа в неоген-четвертичное время. Наличие на небольшой площади двух типов карста по составу карстующихся пород с очень редко встречающимися карстовыми формами предопределяет высокую научно-практическую и учебно-познавательную значимость шиханов и их окрестностей.

Ключевые слова: карст сульфатный, карст карбонатный, пещера, грот, коррозионные колодцы, понор, карстовый лог, карстовое озеро

DOI: 10.31857/S0869607123030114, EDN: YLNAWO

ВВЕДЕНИЕ

Шиха́н (оди́ночный холм, тюрк.) — одиночная гора, хорошо выделяющаяся в рельефе. Именно этим признаком знамениты Башкирские (известные также и как Ишимбайские и Стерлитамакские) шиханы, представляющие собой горы-одиночки (островные горы) среди окружающих равнинных предгорий Южного Урала. Шиханы

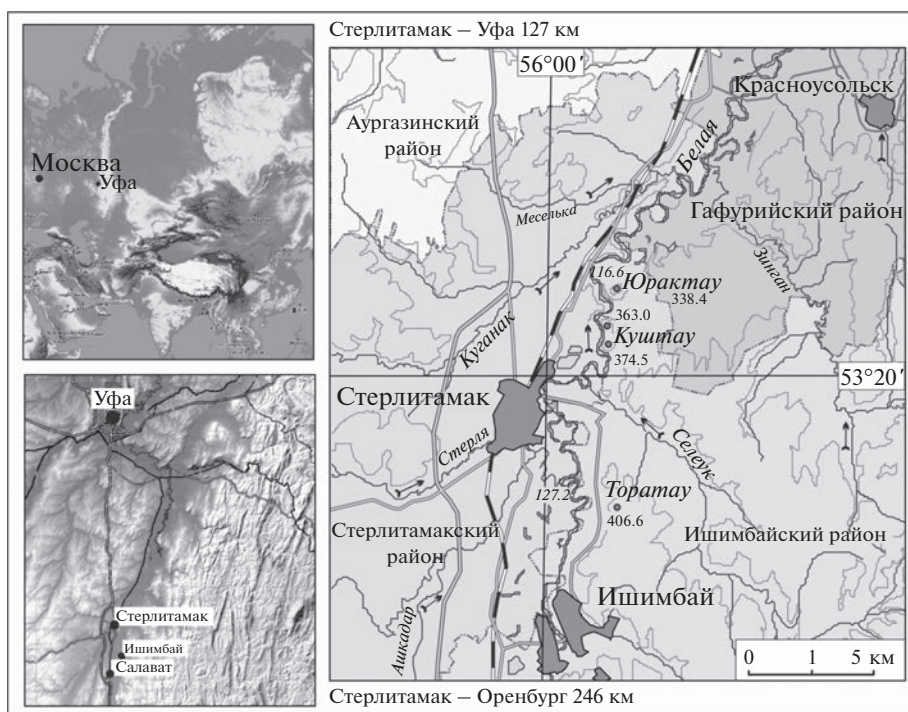


Рис. 1. Обзорная карта Стерлитамакских шиханов.

Fig. 1. Overview map of Sterlitamak shikhans.

находятся внутри Евразийского континента, а в административном отношении расположены на территории Стерлитамакского и Ишимбайского муниципальных районов Республики Башкортостан (РБ) и представлены хорошо известными горами-одиночками (рис. 1), вершины которых возвышаются над современным базисом эрозии р. Белой на 220–280 (!) м. Это шиханы: Юрактау (Йөрәктау – “сердце-гора”, башк.), Куштау (Куштау – “парная гора”, башк.) или гора Долгая, Шахтау (Шахтау – “шах-гора”, “царь-гора”, башк.), Торатау – “крепость-гора”, башк.). В ряде публикаций можно встретить и другие толкования названий шиханов. Так, шихан Торатау иногда называют еще Конь-гора, а шихан Куштау – Птица-гора [1]. Ранее существовал еще один шихан – Шахтау, “срезанный” при добыче известняка, для химической промышленности и цементного сырья, продолжавшейся с начала 1940-х гг. В настоящее время месторождение Шах-Тау эксплуатируется АО “Башкирская содовая компания” по лицензии УФА02290ТЭ, действующей до 31.12.2026.

Шиханы Торатау и Юрактау еще с прошлого века являются комплексными памятниками природы республиканского значения: постановления Совета Министров (СМ) Башкирской АССР от 17 августа 1965 г. № 465 и от 26 декабря 1985 г. № 212 соответственно. Шихан Куштау недавно также объявлен комплексным памятником природы республиканского значения, образованным Постановлением Правительства РБ от 2 сентября 2020 г. № 529 [9]. Кроме того, все упомянутые шиханы и прилегающие к ним территории входят в состав одноименного геопарка, основанного Указом Главы РБ Р. Хабировым 12.12.2018 № УН-308, который с марта 2021 г. является кандидатом на включение в Глобальную сеть геопарков ЮНЕСКО. В декабре 2022 г. шиханы То-

ратау, Куштау и Юрактау внесены в предварительный список ЮНЕСКО Центром Всемирного наследия ЮНЕСКО в Париже под общим наименованием – “Башкирские шиханы”.

Начало изучения Стерлитамакских шиханов автор относит ко второй половине XVIII века, когда русский ученый-энциклопедист и путешественник академик Петербургской академии наук Иван Иванович Лепехин в 1770 г. посетил шихан Торатау и описал пещеру Ханскую [6]. Позже, уже в XIX веке шиханы исследовали геологи: Р.И. Мурчисон и Э. Вернейль (1841–1842 гг.), фон Квален (1842 г.), Нешель (1853 г.), А.Е. Васильева (1854 г.), Ф.И. Кандыкин (1907 г.), М.Э. Ноинский (1910–1927 гг.), Н.П. Герасимов (1929–1934 гг.). С открытием в 1932 г. Ишимбайского нефтяного месторождения интерес к шиханам повысился, начали проводиться работы, направленные на исследования их генезиса, литологии, стратиграфии: В.А. Сулина, А.А. Варова, Г.В. Вахрушева, А.А. Блохина (1932–1934 гг.), А.А. Трофимука и А.Н. Дубровина (1934–1936 гг.), М.Ф. Микрюкова (1937 г.), Д.Ф. Шамова (1938 г.) [3, 15], Л.М. Федоренко (1957 г.), И.И. Сеницына, (1962 г.), Е.А. Имаева (1963 г.) и мн. др. Интерес к Стерлитамакским шиханам вновь заметно возрос в связи с поисками карбонатного сырья для АО “Башкирская содовая компания” и их номинацией в Глобальную сеть геопарков ЮНЕСКО. Не снижается он и в настоящее время. Только за последние 20 лет шиханам посвящено не менее 100 публикаций. Между тем, карсту до не давнего времени практически не уделялось должного внимания. Лишь в последние годы появились единичные сводные работы по карсту и пещерам геопарка Торатау [13–15], но не дающие целостного представления о развитии карстовых форм на шиханах и в их ближайших окрестностях.

Актуальность исследований определяется слабой изученностью карста Стерлитамакских шиханов и их окрестностей.

Целью исследований является сводная характеристика карста Стерлитамакских шиханов, установление основных закономерностей распространения и развития форм его проявлений и оценка их научной и учебно-познавательной значимости.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Исходные данные и методика работ

Базовыми материалами для исследований послужили производственные отчеты: по разведке карбонатного сырья (Федоренко Л.М., 1957 г.); геологической (Сеницын И.И., 1962 г.; Имаева Е.А., 1963 г.; Князев Ю.Г., 2020 г.; Утаев М.Ф., 2021 г.) и гидрогеологической съемкам (Верзаков М.С., Постникова Л.М., 1964 г.), а также изучению экзогенных геологических процессов (Смирнов А.И. и Ткачев В.Ф., 1986 г.).

На основе анализа собранного материала, дешифрирования аэро- и космоснимков в мае–июне 2022 г. автором при участии члена туристического клуба г. Стерлитамака “Глобус” Трибунского Д.С. (проводник) было проведено обследование поверхностных карстовых форм шиханов Торатау, Куштау, Юрактау и прилегающих к ним территорий, а также рекогностировочное обследование спелеологических объектов шиханов Торатау (пещеры Гипсовая, Торатау 1 и 2) и Юрактау (гrotы Юрактау 2 и 3). Позже по данным автора Соколовым Ю.В. (Институт геологии УФИЦ РАН) осуществлена съемка пещеры Гипсовая (8 м), а уфимскими спелеологами Муслуховым Ш.И. и Пименовой Е.Л. произведена детальная съемка самой значительной пещеры шихана Торатау – Торатау 2. В сентябре 2022 г. Яковлевыми Т.И. и А.Г. (Институт геологии УФИЦ РАН) на западном склоне шихана Куштау обследована новая небольшая пещера Чесночная длиной 6 м.

Данные этих полевых обследований и составленная автором по стандартной методике карстологической съемки карта карста района Стерлитамакских шиханов и их окрестностей (см. ниже) послужили основой для настоящей статьи.

2. Краткие сведения о природных условиях развития карста

Наряду с общеизвестными условиями развития карста, общепризнанной является также определяющая роль природных факторов, обуславливающих интенсивность развития и распространение карстопроявлений [4, 7, 19 и др.].

Климат района исследований континентальный со среднегодовой температурой 2.4°C (здесь и далее данные по гидрометеостанции Стерлитамак). Самым жарким месяцем года является июль со средней температурой воздуха 19.0–19.8°C и абсолютным максимумом 40.2°C (1952 г.), а самым холодным – январь с абсолютным минимумом 47.6°C (1943 г.) и средней температурой 15.5–15.7°C. Годовая сумма осадков составляет в среднем 460 мм, из которых 60–70% приходится на теплый период года.

В орографическом отношении Стерлитамакские горы-одиночки и их ближайшие окрестности находятся в пределах холмисто-увалистых предгорий западного склона Урала [11]. В современном рельефе шиханы расположены в подножье правого склона долины р. Белой в ее общем меридиональном течении. Шиханы Юрактау и Куштау находятся непосредственно вблизи современного русла реки, а шиханы Шахтау и Торатау – в 1–1.5 и 1.8–2.3 км от нее у внешних границ правобережных первой и третьей надпойменных террас долины р. Белой соответственно. Формированию скальных, часто обрывистых западных склонов шиханов, в отличие от более пологих восточных, способствовала боковая эрозия р. Белой в голоцен–среднеплейстоценовое время.

В геолого-тектоническом отношении район исследований находится на восточном борту Предуральяского прогиба в пределах Шиханского поднятия, к сводовой части которого приурочен шихан Торатау. Определяющим условием для выделения Стерлитамакских шиханов является их генетическая принадлежность к барьерному рифу раннепермского моря, что признается всеми исследователями региона.

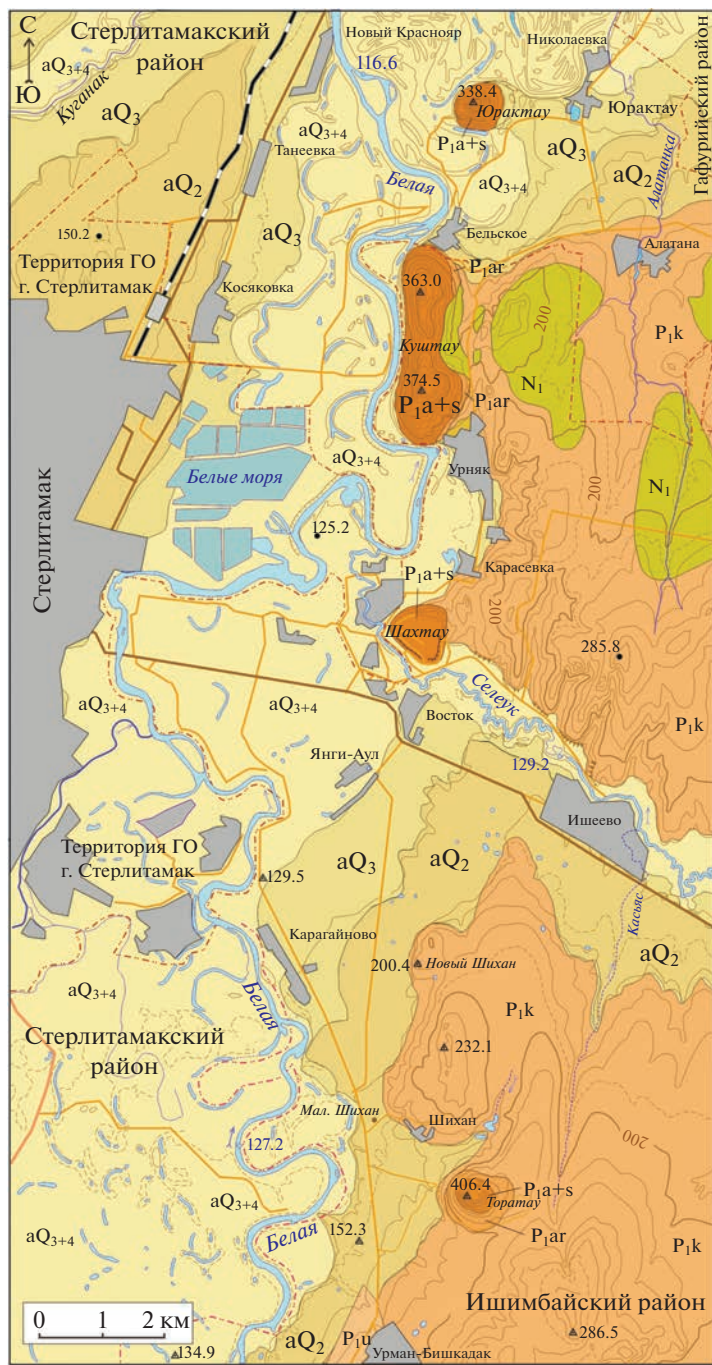
Стерлитамакские шиханы сложены рифогенными известняками ассельского, сакмарского и артинского возраста нижней перми общей мощностью не менее 700–800 м. По этому признаку в районе исследований, кроме них, выделяется также Малый Шихан, который представлен невысоким, но четко выраженным в рельефе холмом. Он возвышается над поверхностью III надпойменной террасы долины р. Белой на 10–35 м. Если вершины гор-одиночек сложены серыми и светло-серыми известняками сакмарского яруса, то Малый Шихан на уровне современного эрозионного вреза сложен серыми и буровато-серыми верхнеартинскими органогенными известняками.

Биогермные известняки шиханов содержат многочисленные фаунистические остатки (мшанок, брахиопод, криноидей, аммонитов, водорослей и др.), что и предопределяет их высокую палеонтологическую значимость.

К западу от шиханов развиты аллювиальные голоцен–среднеплейстоценовые образования, верхняя часть которых мощностью до 8 м представлена супесями, суглинками и глинами, нижняя – песчано-гравийными и гравийно-галечными отложениями мощностью около 10 м. К востоку от гор-одиночек развиты породы кунгурского яруса мощностью 100–400 м. Представлены они гипсами с тонкими прослоями мергелей и

Рис. 2. Геологическая карта Стерлитамакских шиханов и их окрестностей. (А.И. Смирнов 2022 г. по данным геологических съемок: Синицына И.И., 1962 г.; Имаева Е.А. 1963 г.; Князева Ю.Г. 2020 г.; Утаева М.Ф., 2021 г.).

Fig. 2. Geological map of Sterlitamak shikhans and their surroundings (A.I. Smirnov 2022 according to geological surveys: Sinitsyn I.I., 1962; Imaev E.A. 1963; Knyazev Yu.G. 2020; M.F. Utaev, 2021).



Шихан Юрактау



Шихан Куштау



Карьер Шахтау



Карьер Шахтау



Шихан Торатау



Малый Шихан



Новый Шихан



песчаников. Под гипсами на различной глубине (до 50 м) залегают ангидриты с прослоями доломитов (рис. 2).

Следует особо подчеркнуть, что в 2.5 км к востоку от д. Карагайново находится гора Новый Шихан. Она сложена гипсами кунгурского яруса и сходна с рифогенными шиханами лишь по наименованию и близкой морфологии, но по геологическому строению и палеогеографической принадлежности она не имеет с ними никакого генетического сходства.

Формирование Стерлитамакских гор-одиночек определяется ведущей ролью тектонических поднятий в неоген-четвертичное время, что признается всеми исследователями шиханов. Однако, наряду с неотектоническим фактором главным условием их возникновения в современном рельефе является селективная денудация, обусловленная большей устойчивостью к агентам денудации морских рифогенных карбонатных пород, в сравнении с окружающими их более податливыми разрушению экзогенными процессами, лагунными сульфатными отложениями и нелитифицированными аллювиальными образованиями. То есть, генезис шиханов в региональном плане является структурно-денудационным, а на уровне современного денудационного среза они представляют собой, по мнению автора, денудационно-литоморфные останцы, что ранее не отмечалось.

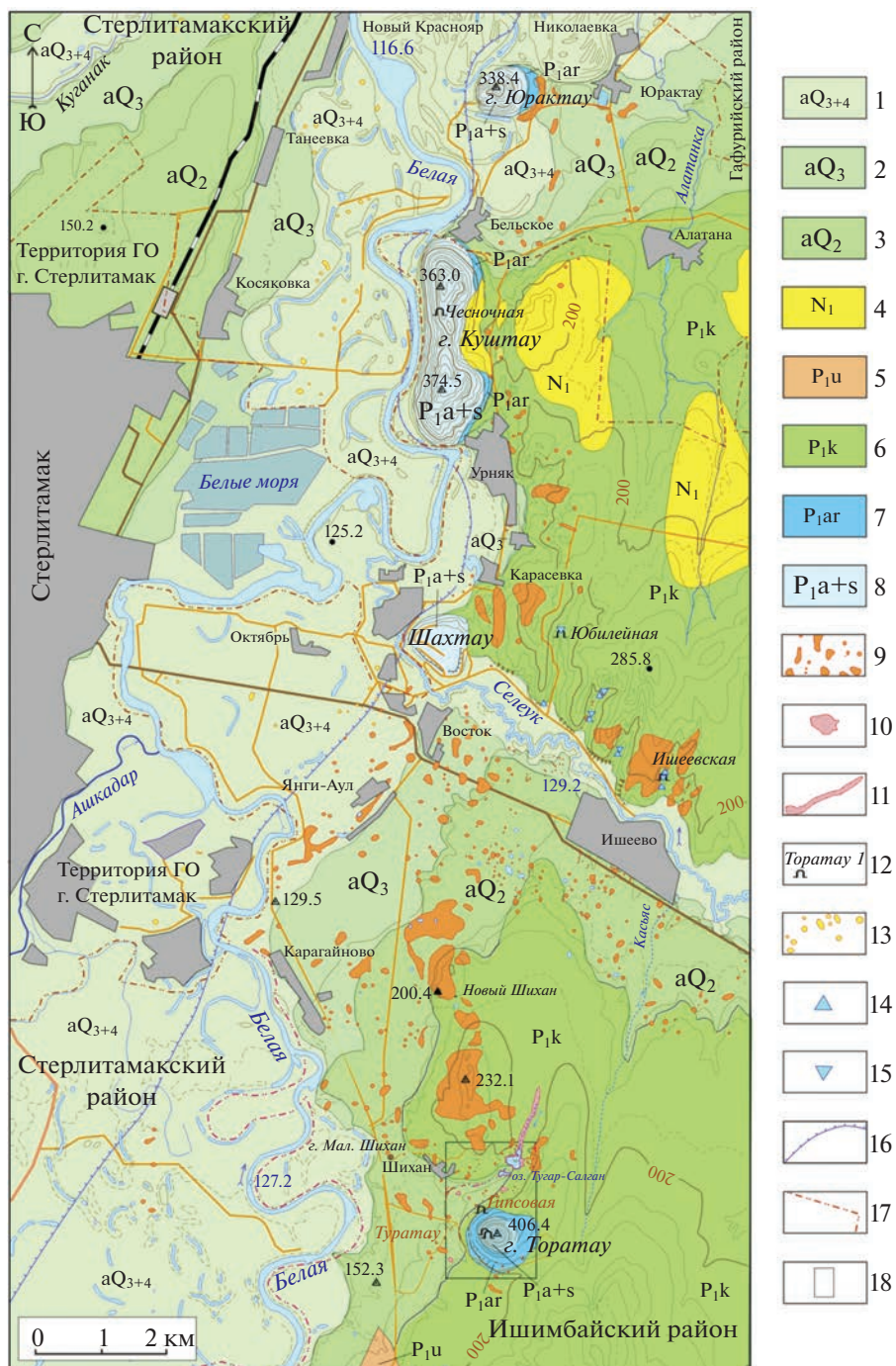
Гидрогеологические условия на уровне современного активного водообмена подземных вод представлены двумя основными водоносными горизонтами: аллювиальным плейстоценовым на западе и кунгурским — на востоке. Первый — приурочен к песчано-галечным и суглинистым отложениям речных террас, второй — к галогенным породам кунгурского яруса и содержит трещинно-карстовые воды.

Воды аллювиального водоносного горизонта в основном соответствует ГОСТ Р 51232–98 “Вода питьевая” и используется для водоснабжения населения, а воды кунгурского горизонта из-за повышенной минерализации (1.9–3.0 г/дм³) [14] не пригодны для питьевого водоснабжения.

Главной особенностью гидрогеологических условий кунгурского водоносного горизонта, оказывающих существенное влияние на развитие карстовых форм, является наличие сосредоточенных нисходящих родников. Наиболее часто они встречаются по правобережью р. Селеук. Дебиты их колеблются от 10–30 до 300–350 дм³/с. Нередко,

Рис. 3. Карта карста Стерлитамакских шиханов и их окрестностей (А.И. Смирнов, 2022 г.). Условные обозначения. Типы карста: по составу карстующихся пород и характеру их перекрытости некарстующимися отложениями. Сульфатный перекрытый (подаллювиальный или камский) в пределах: 1 – поймы и I надпойменной террасы, 2 – II надпойменной террасы, 3 – III надпойменной террасы; сульфатный: 4 – покрытый, 5 – закрытый (русский), 6 – прикрытый (подэлювиально-делювиальный или среднеевропейский); карбонатный 7 – прикрытый (подэлювиально-делювиальный или среднеевропейский), 8 – открытый (средиземноморский или голый). Проявления карста: 9 – карстовые поля и отдельные воронки, 10 – карстовые котловины, 11 – карстовый лог, 12 – пещера и ее название. Прочие обозначения: 13 – суффозионные воронки, 14 – родник, 15 – понор, 16 – правый борт палеодолины, 17 – граница муниципальных образований, 18 – контур врезки более крупномасштабной карты.

Fig. 3. Map of karst of Sterlitamak shikhans and their surroundings (A.I. Smirnov, 2022). Legend. Types of karsts: according to the composition of karst rocks and the nature of their overlapping with non-karst deposits. Sulfate overlain (sub-alluvial or Kama) within: 1 – floodplain and terrace I above the floodplain, 2 – terrace II above the floodplain, 3 – terrace III above the floodplain; sulfate: 4 – covered, 5 – closed (Russian), 6 – covered (sub-eluvial-deluvial or Central European); carbonate 7 – covered (sub-eluvial-deluvial or Central European), 8 – open (Mediterranean or bare). Manifestations of karst: 9 – karsts fields and individual funnels, 10 – karsts basins, 11 – karst log, 12 – cave and its name. Other designations: 13 – suffusion funnels, 14 – spring, 15 – ponor, 16 – right side of the paleovalley, 17 – border of municipalities, 18 – inset contour of a larger map.



из-за присутствия в гипсах прослоев мергелей и песчаников мощностью до 7.0 м, родники являются подвешенными. Превышение их над местными дренами колеблется от 30.0 до 65.0 м. Состав вод сульфатный кальциевый, минерализация — 2.0–2.2 г/дм³. Воды родников по отношению к гипсам не агрессивны [14].

Характерно, что в тальвегах логов родниковые воды нередко поглощаются в понорах, формируя подземные каналы, а затем вновь выходят на поверхность.

Горы-одиночки в гидрогеологическом отношении, по мнению ряда исследователей (Сыров Х.П., 1954 г., Рудченко Л.А., 1964 г., Верзаков М.С., Постникова Л.А., 1964 г. и др.), которое разделяет и автор, представляют собой изолированные гидрогеологические структуры нижнепермских рифов. На уровне современного эрозионного вреза шиханы содержат грунтовые воды. По данным обследования шиханов автора, уровень этих вод летом 2022 г. находился на глубине 2–3 м от подножий шиханов на севере (г. Юрактау) и до 10–15 м на юге (г. Торатау). Грунтовые воды в сакмаро-артинских карбонатах слабоминерализованны (до 0.5 г/дм³) и пригодные для питья.

3. Карст

В общей схеме районирования карста Южного Урала и Предуралья [12]. шиханы находятся на восточной окраине карстовой страны Восточно-Европейской равнины.

Климато-метеорологические факторы района шиханов определяют однотипный характер развития карста по условиям питания карстовых вод. По соотношению осадков и испарения район исследований, как и вся территория Южного Предуралья (за исключением Уфимского плато, входящего в зону избыточного увлажнения), относится к карсту умеренного питания подземных вод с коэффициентом увлажнения около единицы.

Типы карста по составу карстующихся пород и характеру их перекрытости некарстующимися отложениями, поверхностные и подземные формы карста, приведены на рис. 3, из которого видно, что наибольшее распространение на рассматриваемой территории получил сульфатный карст, а наименьшее — карбонатный.

3.1. Сульфатный карст

Сульфатный карст развивается в гипсах кунгурского яруса нижнего отдела пермской системы. Формы его проявления представлены воронками и колодцами, западинами и карстовыми полями, гротами, нишами и пещерами. Кроме того, в районе исследований имеются карстовые родники, а также поноры.

По степени перекрытости карстующихся гипсов некарстующимися породами наибольшее распространение к западу от шиханов получил перекрытый (подаллювиальный или камский) карст, развивающийся под рыхлыми аллювиальными среднеплейстоценовыми—голоценовыми отложениями. К востоку от них, карстующиеся гипсы залегают под маломощным (0–15 м) элювиально-делювиальным покровом щебнисто-суглинисто-глинистых отложений. На севере района исследований ограничено, развит покрытый карст, под суглинисто-глинистыми слабопроницаемыми отложениями миоцена, а на крайнем юге локально развит закрытый карст, где гипсы залегают под породами уфимского яруса с трещиной водопроницаемостью.

Поверхностные карстопоявления района исследований представлены всеми известными в Южном Предуралье карстовыми формами рельефа.

Карстовые воронки в днищах долин рек чаще всего представлены блюдце-, реже чащеобразными воронками с поперечником до 100 и глубиной до 10 м. Хорошо выраженной особенностью характера их распространения на речных террасах является прямая связь частоты встречаемости воронок от возраста поверхностей, на которых они сформированы.

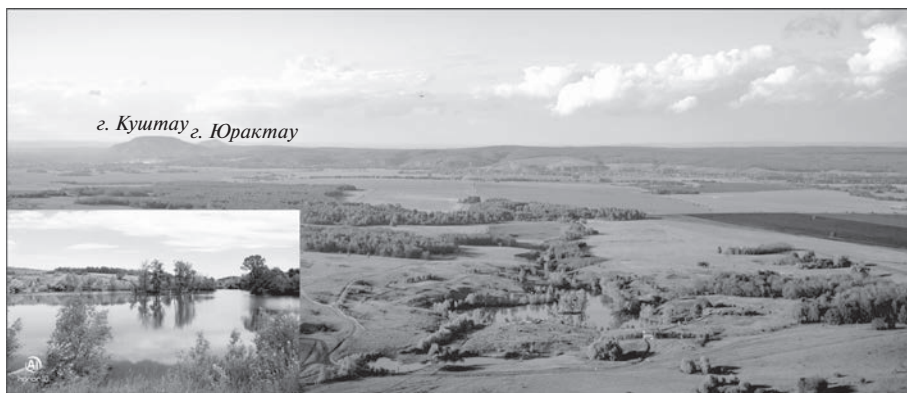


Рис. 4. Озеро Тугар-Салган. Общий вид с северного склона шихана Торатау. На заднем плане — правый склон долины р. Селеук, шиханы Куштау и Юрактау (слева). Фото Ш.И. Муслухова и А.И. Смирнова.

Fig. 4. Tugar-Salgan lake. General view from the northern slope of the Toratau Shikhan. In the background is the right slope of the Seleuk river valley, the Kushtau and Yuraktau Shihans (left). Photo by Sh.I. Muslukhov and A.I. Smirnov.



Рис. 5. Чаше- и конусообразные воронки на западном склоне увала Новый Шихан на широте д. Карагайново. Фото А.И. Смирнова.

Fig. 5. Bowl- and cone-shaped funnels on the western slope of the Novy Shikhan ridge at the latitude of the village of Karagainovo. Photo by A.I. Smirnov.

Повсеместно она минимальна на самых молодых элементах рельефа — поймы и первой надпойменной террасы долины р. Белой ее притоков (голоцен и верхний плейстоцен).

Неглубокие (не более 3 м) и небольшие по размерам (до 20–25 м) карстовые воронки на них встречаются очень редко, а редкие, образованные ими поля тяготеют к тыловым частям первой надпойменной террасы.

На поверхности второй надпойменной террасы (верхний и средний плейстоцен) карстовые поля встречаются более часто, а наиболее значительные из них распространены в границах третьих надпойменных террас (средний плейстоцен). При этом на высоких речных террасах глубины воронок увеличиваются до 15 м, что обусловлено увеличением в их пределах мощности зоны аэрации.

На водораздельных пространствах, формирование которых началось еще в раннем плиоцене [10], карстовые формы рельефа более разнообразны. Несмотря на одинаковый состав карстующихся пород, они резко различаются по морфологии и характеру распространения по лево- и правобережью р. Селеук.

По левобережью р. Селеук выположенное водораздельное пространство плавно переходит в пологую поверхность склона долины реки. На большей ее части мощность

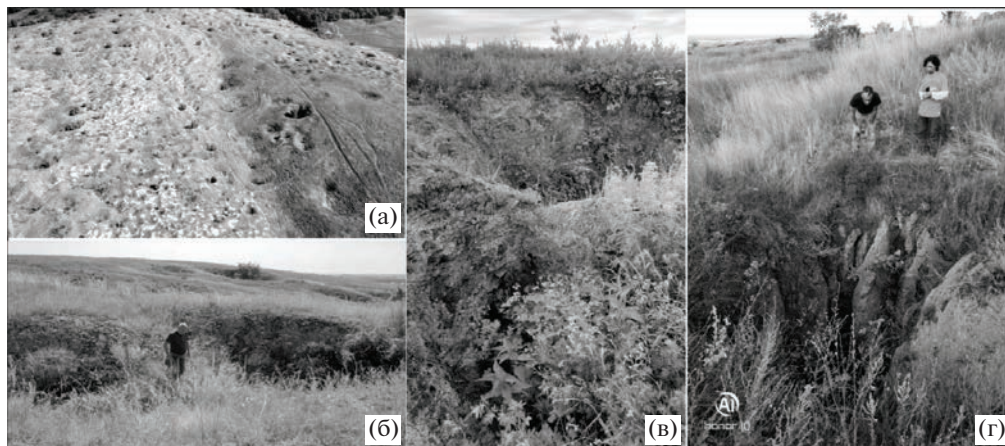


Рис. 6. Коррозионные колодцы в придолинной части водораздельного пространства по правобережью р. Селеук напротив с. Ишеево. Фото А.И. Смирнова и В.Л. Машина.

Fig. 6. Corrosion wells in the marginal part of the divide along the right bank of the Seleuk river opposite the Isheevo village. Photo by A.I. Smirnov.

суглинисто-глинистого элювия-делювия превышает более 10 м и современные карстовые формы рельефа на ней практически не встречаются. Лишен поверхностных карстопоявлений и участок на крайнем юге исследуемой территории в условиях сульфатного закрытого карста, развивающегося под полускальными породами уфимского яруса (см. рис. 3).

В то же время, по левобережью р. Селеук имеется своеобразная карстовая форма, представленная озером Тугар-Салган (“Озеро, которое поглотило лошадь” или “Обернулся и потерял”, башк.). Расположено оно в 1.3 км ССВ от шихана Торатау и образовано в котловине, которое находится в устье полуслепого эрозионно-карстового лога (рис. 4).

Длина озера 385–395 м (СЮ), ширина 260 м (ЗВ), в центре озера имеется небольшой карстово-эрозионный остров-останец. С. Пахотин, А. Беспаятный и Е. Гакашина в августе 2020 г. обследовали дно озера с использованием эхолота и составили карту 3D озера. Глубина его почти повсеместно не превышала 15 м и лишь на небольшом участке в южной части озера достоверно установлена глубина в 28 м. Питание озера атмосферное, дно его заилено [8]. Озеро Тугар-Салган является комплексным памятником природы, образованным Постановлением СМ Башкирской АССР от 26.12.1985 № 212 [9].

На остальной левобережной части р. Селеук поверхностные карстопоявления распространены в придолинной части р. Белой на увале и горе Новый шихан. Гипсы кунгура здесь выведены на поверхность или прикрыты маломощным (не более 5 м) чехлом элювия-делювия (см. рис. 3). Представлены они чаше- и конусообразными воронками диаметром 10–50 м и глубиной до 15 м (рис. 5). Плотностью воронок в пределах образованных ими карстовых полей по данным обследования автора, в среднем составила 200 шт. на 1 км².

По правобережью р. Селеук характерны аналогичные зависимости распространения карстовых форм рельефа от мощности и состава покрывающие карстующиеся гипсы образований. Наиболее четко эта связь проявляется в условиях покрытия гип-

сов глинистыми миоценовыми отложениями, где поверхностные карстопроявления практически отсутствуют (см. рис. 3).

Главной особенностью этого участка района исследований является наличие (наряду с традиционными поверхностными карстопроявлениями) крайне редко встречающихся в Южном Предуралье коррозионных колодцев.

Развиты колодцы в придолинной правобережной части р. Селеук напротив с. Ишеево в условиях сульфатного открытого (голого или средиземноморского) типа карста на абсолютных отметках 180–210 м с превышением над рекой 50–60 м. Этот высотный интервал на широте г. Стерлитамака соответствует уровню V надпойменной террасы долины р. Белой в горной части Южного Урала (ранний–средний неоплейстоцен, ~600–400 тыс. лет) [по 2], но не сохранившейся в современном рельефе на исследуемой территории.

Глубина колодцев относительно одинакова и составляет 10–12 м при диаметре 3–10 м. Они сформированы в сахаровидных гипсах, а глубина их контролируется мощностью этого слоя гипсов. Глубже его подошвы колодцы не развиваются, поскольку ниже залегают плитчатые гипсы с очень тонкими глинистыми прослойками. Дно колодцев плоское с почти горизонтальными щелевидными понорами. Колодцы имеют вертикальные стенки, на которых сформированы эрозионные желоба (рис. 6).

Плотность колодцев в пределах образованных ими карстовых полей в пересчете на 1 км² достигает 4.9 тыс. шт. [14]. По мнению автора, это самый высокий показатель частоты встречаемости карстовых форм рельефа на всей территории Южного Предуралья, а возможно и на всей территории карстовой страны Восточно-Европейской равнины.

Подземные карстопроявления района исследований представлены пещерами, наиболее значительные из них сформированы по правобережью р. Селеук. Это Ишеевская пещерная система и пещера Юбилейная (см. рис. 3).

Ишеевская пещерная система общей протяженностью ходов 1002 м является третьей по длине пещерой в гипсах Южного Предуралья [9]. Ее детальная характеристика с планом и разрезами приведена в статье [14]. Уникальность системы состоит в том, что отдельные ее части находятся на разных стадиях развития: от начальной канальной до заключительной — стадии карстовой долины. В прошлом она представляла собой единую пещеру, которая в процессе спелеогенеза и обрушения сводов в настоящее время разделена на восемь самостоятельных пещер на двух уровнях в высотном интервале 160–180 м [14].

Другой примечательной пещерой в гипсах является пещера Юбилейная. Расположена она в днище лога, в 1.4 км выше его устья, которое открывается в долину р. Селеук в 1.8 км ниже по реке от северо-западной окраины с. Ишеево (см. рис. 3).

Пещера имеет два входа: основной (вход 1) — в тальвеге лога и второстепенный (вход 2) — в северном борту карстовой воронки на левом его склоне и два пещерных уровня в интервале абсолютных отметок 170–180 м (рис. 7).

Верхний этаж пещеры — “нисходяще–восходящий”, нижний — горизонтальный с подземным ручьем (см. рис. 7). Вполне вероятно, что заложение верхнего этажа пещеры началось в период формирования выположенной придолинной части водораздельного пространства р. Селеук в раннем–среднем неоплейстоцене одновременно с формированием коррозионных колодцев. Нижний этаж пещеры заложен позже, предположительно в среднем неоплейстоцене и продолжает активно формироваться в настоящее время подземным ручьем.

Протяженность пещеры по данным ее первой съемки в 1973 г. А.С. Андреевым составляет 170 м. К сожалению, более современные морфометрические параметры пещеры в настоящее время отсутствуют.

Из достопримечательностей пещеры Юбилейной, кроме подземного ручья следует отметить прослой марьиного стекла, прослеживающийся в стенках нижнего этажа.

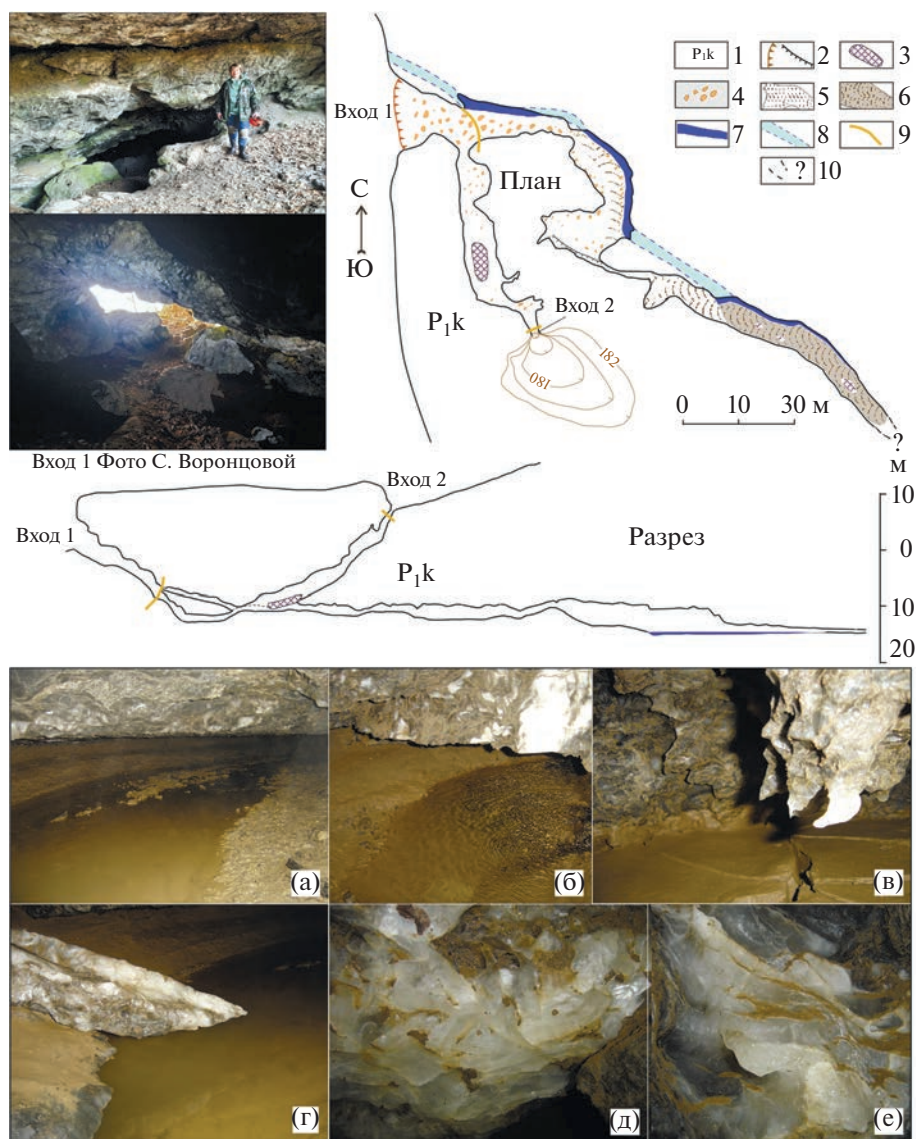


Рис. 7. Пещера Юбилейная Условные обозначения: 1 – геологический индекс вмещающих пещеру карстуемых пород (гипсы кунгурского яруса), 2 – уступы, 3 – глыбы (продукт обрушения свода пещеры), 4 – обломки и щебень гипса, 5 – глинистые сухие покровы, 6 – переувлажненный покров ила и глины, 7 – ручей в пещере, 8 – предполагаемый ручей вне пещеры, 9 – граница проникновения дневного света от входа в пещеру, 10 – непроходимый пещерный ход.

Fig. 7. Jubilee Cave Legend: 1 – geological index of the karstic rocks containing the cave (gypsum of the Kungurian stage), 2 – ledges, 3 – blocks (product of cave vault collapse), 4 – debris and rubble gypsum, 5 – clay dry cover, 6 – over-wetted silt and clay cover, 7 – stream in cave, 8 – supposed stream outside cave, 9 – daylight penetration boundary from cave entrance, 10 – impassable cave passage.



Рис. 8. Поверхностные карстопроявления в нижней части западного склона шихана оратау: а — старые чаше- и конусообразные воронки, б — свежий провал. Фото А.И. Смирнова

Fig. 8. Surface map manifestations in the lower part of the western slope of the Toratau Shikhan: а — old bowls and conical funnels, б — fresh failure. Photo by A.I. Smirnov.

Характерно, что присутствует такой же и в пещерах Ишеевской системы. В целом, пещера Юбилейная и Ишеевская система по морфологии имеют много общего, но главное их сходство заключается в одновозрастном их заложении, о чем свидетельствует почти одинаковое их высотное положение.

Еще одна небольшая нисходящая пещера (Гипсовая) длиной 8 м в гипсах имеется в подножье северного склона шихана Торатау (см. рис. 3 и 5). Вход в нее находится в южном борту карстовой воронки в подножье северного склона горы Торатау. Примечательна эта пещера тем, что сформирована она на контакте сульфатных и карбонатных пород [15]. Она представляет собой пещеру-понор, которая дренирует водоносный горизонт гидрогеологической структуры нижнепермского рифа Торатау и уводит через понор подземный сток инфильтрационных вод в четвертичный аллювий долины р. Белой. Судя по месторасположению пещеры в тыловой части III надпойменной террасы долины р. Белой возраст ее, предположительно составляет 100–150 тыс. лет (средний–поздний неоплейстоцен) [15].

3.1. Карбонатный карст

До глубины активного водообмена карстовых вод (~200 м) карбонатный карст на шиханах развит в асельско-артинских органогенных известняках.

Поверхностные карстопроявления его однообразны и представлены исключительно чаше- и конусообразными воронками поперечником до 100 м (очень часто не более 50 м) и глубиной до 15 м (обычно не более 10 м).

Распространение их в современном рельефе шиханов подчиняется общеизвестной обратной зависимости частоты встречаемости карстовых форм рельефа от уклона дневной поверхности. На крутых (до 40°), а иногда даже обрывистых склонах шиханов карстовые формы рельефа отсутствуют, а наибольшая их встречаемость свойственна для нижних пологих (не более 10°) склонов гор-одиночек и их подножий. При этом, среди них нами наблюдались старые карстовые воронки со сглаженными их очертаниями и свежие провалы с обнаженными бортами (рис. 8).

Подземные карстопроявления на шиханах более разнообразны, чем поверхностные и представлены пещерами, гrotами и нишами. При этом под пещерой автор, как и большинство спелеологов [17], понимает подземную полость любого генезиса, доступную для проникновения человека, которая имеет не освещенные дневным светом

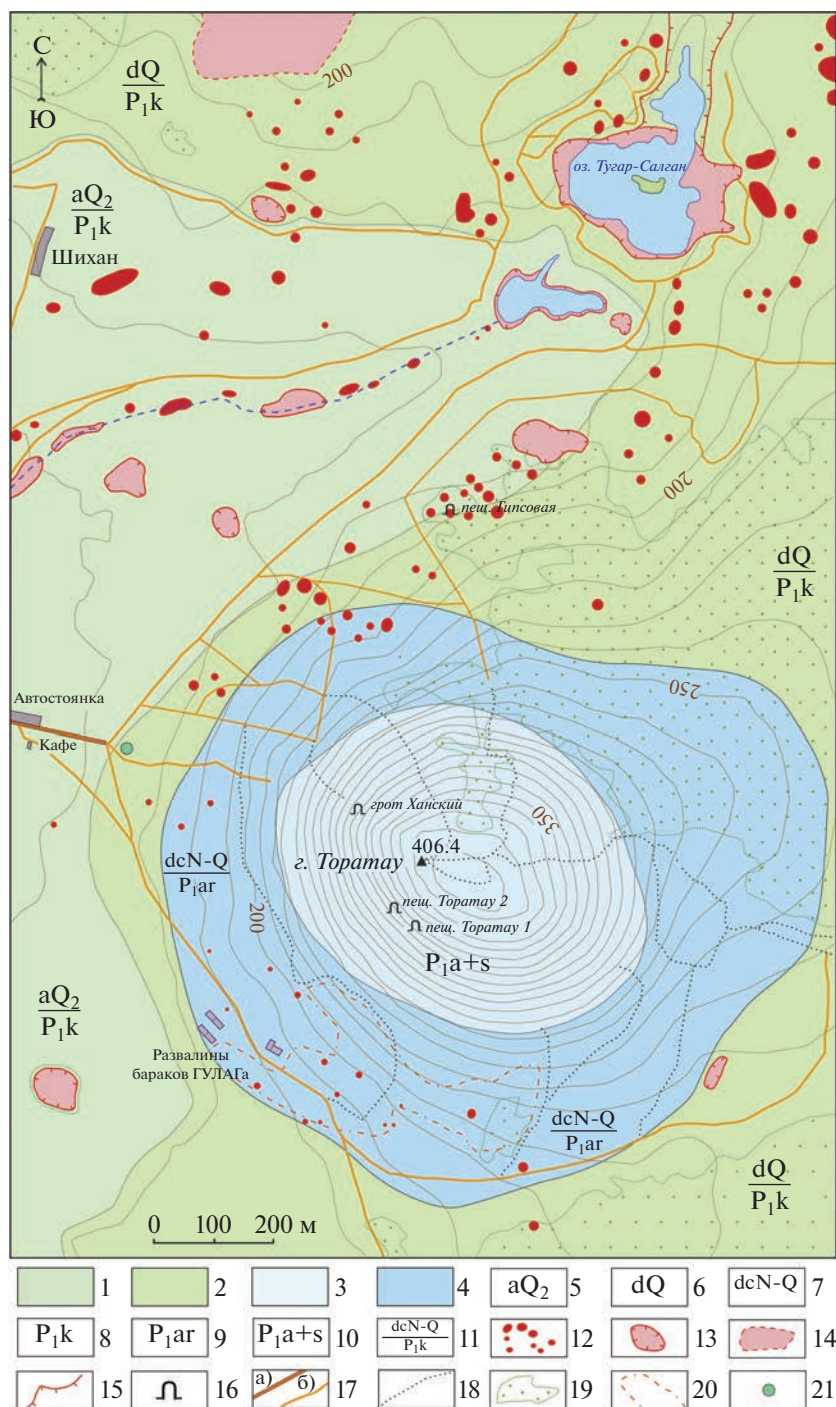


Рис. 9. Карстово-спелеологические объекты шихана Торатау (по: Смирнов, 2022). Условные обозначения. Типы карста: по составу карстующихся пород (1 и 2) и характеру их перекрытости некарстующимися отложениями (3 и 4). Сульфатный: 1 — перекрытый (подаллювиальный или камский), 2 — покрытый (подэлювиальный или среднеевропейский); карбонатный: 3 — открытый (голый или средиземноморский), 4 — прикрытый (подколлювиально-делювиальный). Геологические индексы: 5 — неоплейстоцен среднее звено (аллювий III надпойменной террасы долины р. Белой). 6 — четвертичная система (делювий межхолмистовалистых понижений), 7 — неогеновая и четвертичная системы не нерасчленённые (коллювиально-делювиальные образования средних и нижних частей шихана). Приуральский (ранний) отдел пермской системы: 8 — кунгурский ярус, 9 — артинский ярус, 10 — ассельский и сакмарский ярусы объединённые. 11 — числитель: покровные некарстующиеся, знаменатель: карстующиеся породы. Карстопроявления: 12 — карстовые воронки, 13 — карстовые котловины, 14 — поле карстовых воронок, 15 — вход в грот, пещеру, 16 — бровка склона карстового лога. Пути сообщения: 17 — дороги с асфальтированным покрытием (а), основные проселочные дороги (б), 18 — главные пешеходные тропы. Прочие обозначения: 19 — крупные лесные массивы, 20 — контур копани, 21 — проектируемый мемориал “Ырыузар ташы”, баш. (Камень преткновения).

Fig. 9. Karstic-speleological objects of the Toratau Shikhan (after: Smirnov, 2022). Legend. Karst types: according to the composition of karstic rocks (1 and 2) and the nature of their overlapping with non-karst deposits (3 and 4). Sulfate: 1 — overlapped (sub-alluvial or Kama), 2 — covered (sub-eluvial or Central European); carbonate: 3 — open (naked or Mediterranean), 4 — covered (subluvial-deluvial). Geological indices of rocks: 5 — Neopleistocene middle link (alluvium III of the floodplain terrace of the Belaya River valley). 6 — Quaternary system (slopewash deposits of inter-hill depressions), 7 — Neogene and Quaternary systems not dissected (coluvial-deluvial formations of the middle and lower parts of the shikhan). Cis-Ural (early) section of the Permian system: 8 — Kungurian, 9 — Artinian, 10 — Asselian and Sakmarian stages combined. 11 — fraction: the numerator is cover non-karsting rocks and the denominator is karsting rocks. Karst manifestations: 12 — karst funnels, 13 — karst basins, 14 — field of karst funnels, 15 — entrance to the grotto, cave, 16 — edge of the slope of the karst ravine. Communication routes: 17 — paved roads (a), main country roads (b), 18 — main hiking trails. Other designations: 19 — large forests, 20 — dig contour, 21 — projected memorial “Yryuzar tashy”, bash. (Stumbling block).

части и длину (глубину), превышающую ее входные параметры. Под гротом — подземную полость, у которой ширина или высота входа больше общей ее протяженности и иметь только затемненные части; под нишей — козырьки и навесы, не имеющую неосвещенных дневным светом частей.

Пещеры на территории гор-одинок относительно редки. На 01.01.2023 на их склонах в известняках сакмарского яруса ранней перми известны 3 пещеры. Две из них задокументированы на шихане Торатау (рис. 9, 10) и одна на шихане Куштау (табл. 1).

Самой значительной пещерой в районе исследований является пещера Торатау 2. Подробная характеристика ее с планом, разрезом и поперечными сечениями, а также описание пещеры Торатау 1 приведены в статье [15], в которой методом корреляции пещерных уровней и речных террас предполагается древний возраст их заложения. Гипсометрический интервал пещерных уровней пещер Торатау 1 и 2 соответствует уровням VI (ранний неоплейстоцен) и VII (средний—поздний эоплейстоцен) надпойменных террас долины р. Белой на Южном Урале, но не сохранившихся в Предуралье. То есть, можно предполагать, что формирование коридоров и ходов этих пещер по напластованию известняков началось не менее 600 тыс. лет тому назад [15].

На шихане Куштау задокументирована пока только одна пещера Чесночная (см. рис. 3). Это небольшая по длине горизонтальная пещера с овальным широким (5×2 м), но низким (не более 1 м) входом. Эта пещера, как и пещеры Торатау 1 и 2, сформирована по напластованию сакмарских известняков и представлена низким (до 1 м) кори-

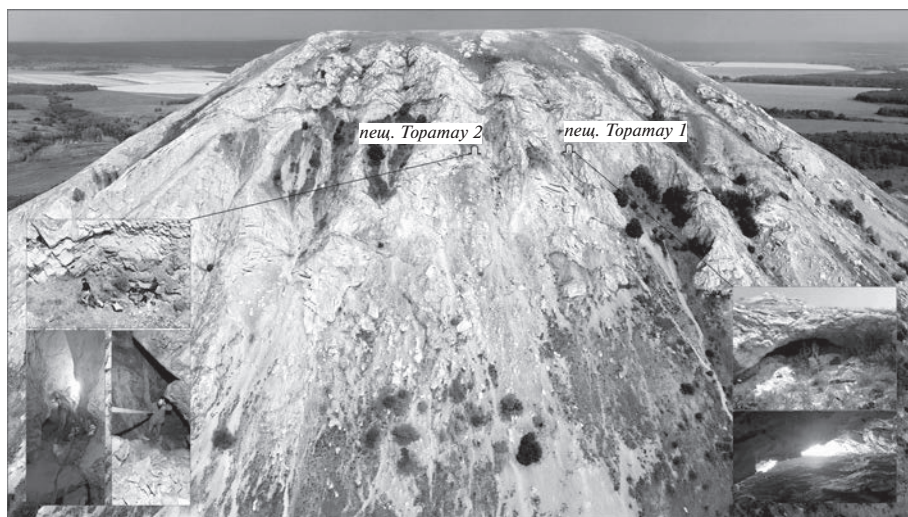


Рис. 10. Местоположений входов пещер Торатау 1 и 2 на шихане Торатау. Фото В.Л. Машина, А.И. Смирнова, Д.С. Трибунского.

Fig. 10. Locations of the entrances of caves Thoratau 1 and 2 on the Thoratau Shikhan Photo by V.L. Machine, A.I. Smirnov, D.S. Tribunsky.

дором, сформированным параллельно западному склону шихана Куштау и заканчивающийся непроходимым ходом.

Гроты карстового происхождения в районе исследований зафиксированы в сакмарских известняках на шиханах Юрактау и Торатау (табл. 2).

Самым примечательным гротом Стерлитамакских шиханов является грот Ханский на шихане Торатау (см. рис. 9), описанный еще в 1770 г. И.И. Лепехиным [6]. К настоящему времени свод грота, сформированный по напластованию известняков, обва-

Таблица 1. Пещеры Стерлитамакских шиханов на 01.01.2023 (по Ю.В. Соколову, 2022 г.)

Table 1. Sterlitamak Shikhans caves on the 01.01.2023 (according to Yu.V. Sokolov, 2022)

№ пп. Пещера (см. рис. 3)	Исследователи, год обследования, съемки	Абс. отм. входа, м	Длина, м	Удельн. объем м/м ³
<i>Шихан Торатау</i>				
1. Торатау 1	Ефремов Г.К., Лионов Б.Н.; 1942; Трибунский Д.С., Смирнов А.И., 2022 (обследование)	338	8	5.6
2. Торатау 2	Ефремов Г.К., Лионов Б.Н., 1942.; Смирнов А.И., Трибунский Д.С., 2022 (обследование); Муслухов Ш.И., Пименова Е.Л. (съемка) 2022	332	67	3.2
<i>Шихан Куштау</i>				
3. Чесночная	Яковлева Т.И., Яковлев А.Г., 2022 (обследование, съемка)	309	9	0.6

Таблица 2. Гроты Стерлитамакских шиханов на 01.01.2023 (по Ю.В. Соколову, 2022 г.)**Table 2.** Grottoes of Sterlitamak shikhans on the 01.01.2023 (according to Yu.V. Sokolov, 2022)

№ пп. Грот (рис. 9, 11)	Исследователи, год обследования, съемки	Абс. отм. входа, м	Длина, м	Удельн. объем, м/м ³
<i>Шихан Торатау</i>				
1. Ханский	Лепехин И.И., 1770; (обследование) Муслухов Ш.И., Пименова Е.Л., 2018; Соколов Ю.В., 2022 (съемка)	309	3	12
<i>Шихан Юрактау</i>				
2. Юрактау 1	Соколов Ю.В., 1995 (обследование)	140	6	28
3. Юрактау 2	Трибунский Д.С., Смирнов А.И. 2022 (обследование)	201	4	4
4. Юрактау 3	Трибунский Д.С., Смирнов А.И. 2022 (обследование)	223	2	3

лился и он представляет собой лишь отрицательную стенку шириной 10 м, высотой 6 м с глубиной нависания ~1 м (рис. 12).

На шихане Юрактау в настоящее время известно 3 грота (см. табл. 2). Самым значительным из них является грот Юрактау 1, сформированный в подножье шихана с поперечником 5.0–5.5 м. Вероятнее всего он представляет собой фрагмент ранее существовавшей пещеры (рис. 12). Грот Юрактау 2 сформирован в вершине расщелины, заложённой по секущей слою тектонической трещины, а грот Юрактау 3 – в южном (левом) ее борту. Оба грота, по мнению автора, также являются остатками древней пещеры.

Кроме пещер и гротов на шиханах имеются многочисленные козырьки и навесы, формированию которых способствует сильная трещиноватость и раздробленность рифовых массивов. Наряду с наличием традиционных трещин напластования горы-одиночки интенсивно разбиты секущими слою тектоническими трещинами, а также трещинами разгрузки донного и бортового отпора [15].

ОБСУЖДЕНИЕ

Стерлитамакские шиханы, представляющие собой денудационно-литоморфные останцы, имеют важную геоморфологическую особенность, которая раскрывает механизм их формирования. Так, горы-одиночки Торатау и Куштау, а также некогда существовавший шихан Шахтау (по фото в сети интернет 1950 гг.), имеют выложенные вершины (см. рис. 10), которые представляют собой “островки”, вероятно, ранне-среднеплиоценовой [15] поверхности выравнивания, сохранившиеся после общей пенеппленизации Южного Урала и Предуралья в конце миоцена и в начале плиоцена всего Южного Предуралья [10]. На вершине самого низкого и наименее приподнятого в неоген-четвертичное время шихана Юрактау остатки миоцен-плиоценового пенеплена не сохранились. Таким образом, можно предполагать, что карстовые формы, выраженные в современном рельефе района исследований, формируются уже не менее 5 млн лет.



Рис. 11. Грот Ханский: а — общий вид (фото Ю.В. Соколова), б — отрицательная стенка грота (фото Ш.И. Муслухова).

Fig. 11. Grot Khansky: а — general view (photo by Yu.V. Sokolov), б — negative wall of the grotto (photo by Sh.I. Muslukhov).

Определяющим фактором интенсивности распространения карстовых форм является литологический фактор, что четко фиксируется по составу карстующихся пород. Вполне естественно, что она повсеместно выше в более растворимых галогенных породах в сравнении с карбонатными (см. рис. 3).

Наибольшее распространение поверхностных карстопоявлений наблюдается на участках открытого и закрытого карста. При этом максимально они развиты в условиях голого (средиземноморского) карста и представлены коррозионными колодцами, развитыми по правобережью р. Селеук напротив с. Ишеево. Главной особенностью этих колодцев является их приуроченность к сахаровидным гипсам. При отсутствии с поверхности в разрезе кунгурского яруса этой разновидности гипсов они не встречаются. Механизм образования колодцев до конца не выяснен. Возможно, они имеют сложный нивально-коррозионный генезис [по 5], чему в неоплейстоцене способствовали периодические значительные похолодания в ход ледниково-межледниковых циклов. Следует особо подчеркнуть, что интенсивность распространения колодцев — самая высокая на всей территории Южного Предуралья [14].

В условиях покрытого и закрытого типов карста частота встречаемости поверхностных карстопоявлений находится в хорошо известной обратной зависимости от мощности покрывающих карстующиеся породы некарстующимися отложениями.

В условиях перекрытого карста интенсивность распространения поверхностных карстопоявлений находится в прямой зависимости от возраста элементов рельефа, на которых они развиты, что является вполне естественным. То есть, частота встречаемости карстовых форм рельефа в районе исследований обусловлена ходом формирования дневной поверхности в плейстоцене. Это четко прослеживается по различиям в интенсивности распространения, морфологии и морфометрии поверхностных карстопоявлений при переходе от молодых речных террас к более древним.

Ярким примером связи формирования поверхностных карстопоявлений с ходом формирования элементов рельефа является также генезис озера Тугар-Салган. Оно образовано в карстовой котловине в устье полуслепого лога, верховье которого находится в 1.6—1.7 км севернее озера (см. рис. 3 и 9). В раннем плиоцене Южное Предуралье испытало значительное региональное поднятие, которое обусловило глубокий врез речных долин и начало формирования палеодолин [10]. Вполне естественно, что устье лога в это время открывалось в палеодолине р. Белой, глубина вреза которой на

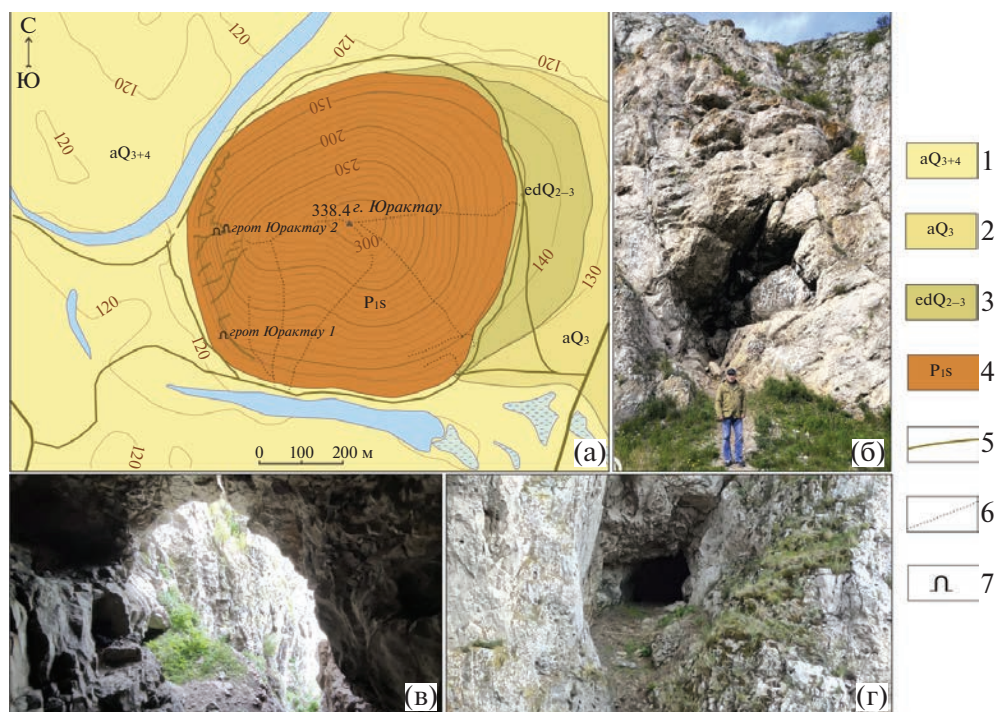


Рис. 12. Гроты шихана Юрактау: а — схема расположения гротов (А.И. Смирнов, 2022 г.), Гроты: б — Юрактау 1, в — Юрактау 2, г — Юрактау 3 (фото А.И. Смирнова и Д.С. Трибунского).

Fig. 12. Grottoes of the Yuraktau Shikhan: а — layout of grottoes (A.I. Smirnov, 2022), б — Yuraktaу 1, в — Yuraktaу 2, г — Yuraktaу 3 (photo by A.I. Smirnov and D.S. Tribunsky).

широте г. Стерлитамака по отношению к ее современному руслу достигало 110 м (Верзаков и др., 1964 г.). После заполнения палеодолины плиоценовыми, а затем и плейстоценовыми осадками средняя и устьевая части лога были погребены четвертичным аллювием. Тальвег погребенного лога, заложенного в раннем плиоцене (2.5–2.6 млн лет), а возможно и много раньше, четко прослеживается цепочкой карстовых воронок, протягивающейся к западу от озера на поверхности третьей надпойменной террасы долины р. Белой (см. рис. 9). В тыловой не погребенной среднеплейстоценовыми осадками части террасы и сформировалось озеро. То есть, возраст озера достаточно древний — не менее 0.7–0.8 млн лет.

Связь распространения карстопоявлений с историей формирования рельефа района исследований в неоген-четвертичное время прослеживается и по подземным карстовым формам, как в гипсах, так и в известняках. Это четко фиксируется по высотному положению спелеобъектов, расположенных в двух гипсометрических интервалах (абс.): 300–330 м (пещеры Торатау 1 и 2, Чесночная и грот Ханский); 160–180 м (Ишеевская пещерная система, пещеры Гипсовая и Юбилейная).

Возраст верхнего пещерного уровня [по 14, 15] можно ориентировочно оценить как средний–поздний эоплейстоценовый (~1.2 млн. лет) — самый древний в Южном Предуралье, нижнего — как ранний–средний неоплейстоценовый (не менее 400 тыс. лет). При этом, пещеры нижнего уровня активно продолжают формироваться карстовым

процессом и в настоящее время с преобладающей деятельностью подземных водотоков. В подземных полостях верхнего уровня, переживающих сейчас сухо-галерейную обвальную-провальную стадию развития, преобладает деятельность гравитационных сил.

Можно предполагать о наличии на шиханах еще одного среднего пещерного уровня в интервале абсолютных отметок 200–230 м, к которому приурочены гроты Юрактау 2 и 3, представляющие собой остатки ранее существовавшей пещеры.

Минимальная встречаемость подземных карстовых полостей на шихане Куштау обусловлена, вероятно, слабой их изученностью, поскольку поиск спелеообъектов на нем затруднен почти сплошной залесенностью. Условия формирования пещер и гротов на шихане Куштау не менее благоприятны, чем на других шиханах и вполне вероятно, что в будущем на нем будут открыты новые спелеологические объекты.

ВЫВОДЫ

Башкирские шиханы имеют структурно-денудационное происхождение, их правомерно считать денудационно-литоморфными останцами.

На небольшой площади расположения Башкирских шиханов развиты два различных типа карста по составу карстующихся пород и представлены все известные типы карста по характеру и степени перекрытости карстующихся пород некарстующимися. В ближайших окрестностях шиханов развиты редко встречающиеся карстовые формы рельефа — коррозионные колодцы, плотность которых самая высокая в карстовой стране Восточно-Европейской равнины. Высокое гипсометрическое положение шиханов, обусловленное неотектоническими понятиями и селективной денудацией в неоген-четвертичное время предопределило образование самых древних в равнинном Южном Предуралье карстовых пещер в известняках, а в гипсах они активно продолжают формироваться и в настоящее время. Подобные карстовые поля колодцев в гипсах имеются в Южном Предуралье только на пологоволнистой Прибельской равнине в долине р. Аургаза (правый приток р. Уршак) и на небольших по площади участках открытого карста в предгорьях Южного Урала. Однако, плотность колодцев на них в два раза меньше, чем в районе Башкирских шиханов.

Подземные карстопроявления приурочены к определенным высотным уровням. При перепаде абсолютных отметок от ~120 до ~400 м, все известные к настоящему времени пещеры и гроты на шиханах сформированы в двух основных гипсометрических интервалах (абс.): 300–330 м (пещеры Торатау 1 и 2, Чесночная и грот Ханский) и 160–180 м (Ишеевская система пещер, пещеры Гипсовая и Юбилейная, грот Шиханский).

В верхнем высотном интервале сформированы спелеообъекты карбонатного карста, в нижнем — сульфатного.

Возраст нижнего пещерного уровня можно ориентировочно оценить как ранний–средний неоплейстоценовый (не менее 400 тыс. лет), верхнего — как эоплейстоцен (~1.2 млн лет) — самый древний в равнинном Южном Предуралье. Кроме того, можно предполагать наличие на шиханах еще одного среднего пещерного уровня в интервале абсолютных отметок 200–230 м, к которому приурочены гроты Юрактау 2 и 3, представляющие собой остатки ранее существовавших пещер.

В настоящее время пещеры нижнего уровня продолжают активно формироваться карстовым процессом с преобладающей деятельностью подземных водотоков, а в подземных полостях верхнего уровня, переживающих сейчас завершающую сухо-галерейную обвальную-провальную стадию развития спелеогенеза, преобладает деятельность гравитационных сил.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает искреннюю признательность члену туристического клуба г. Стерлитамака “Глобус” Д.С. Трибунскому за помощь при обследовании спелеообъектов, а также В.Л. Машину, Ю.В. Соколову и Ш.И. Муслухову за предоставленный фотоматериал. Исследование выполнено по государственной бюджетной теме FMRS-2022-0010.

The author expresses his sincere gratitude to the member of the tourist club of the city of Sterlitamak “Globus” D.S. Tribunsky for help in examining speleological objects, and also to V.L. Mashchin, Yu.V. Sokolov and Sh.I. Muslukhov for providing photographic material. The study was carried out within the framework of the State budget theme FMRS-2022-0010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов К.В., Грабовская А.П. Стерлитамакские шиханы: от истоков геологической истории образования до наших дней В сб.: Молодежная наука в XXI веке: традиции, инновации, векторы развития. Материалы Всероссийской научно-исследовательской конференции. 2019. С. 56–59.
2. Борисевич Д.В. Неотектоника Урала // Геотектоника. 1992. № 1. С 57–67.
3. Галиуллин Р.Х. Краткие сведения об изученности района шиханов и месторождения Шахтау // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий. 2016. № 11. С. 277–279.
4. Гвоздецкий Н.А. Карст. М.: Мысль, 1981. 214 с.
5. Дублянский В.Н. Карстовые пещеры и шахты Горного Крыма. Л.: Наука, 1977. 182 с.
6. Лепёхин И.И. Продолжение Дневных записок путешествия Академика Лепехина // Полное собрание ученых путешествий по России. Т. 4. СПб.: Императорская Академия наук, 1822. 436 с.
7. Максимович Г.А. Основы карстования. Т. 1. Вопросы морфологии карста, спелеологии и гидрогеологии карста. Пермское книжное издательство, Пермь, 1963, 445 с.
8. Пахотин С. Экспедиция на озеро Тугар-Салган и шихан Торатау. Свердловское областное отделение Русского географического общества. URL: <https://www.rgo.ru/ru/article/eks-pediciya-na-ozero-tugar-salgan-i-shihan-toratau>.
9. Реестр особо охраняемых природных территорий республиканского значения: Министерство природопользования и экологии Республики Башкортостан, 2020, ООО “Научно-исследовательский институт безопасности жизнедеятельности”, 2020, ФГБНУ Уфимский институт биологии УФИЦ РАН, 2020. Изд. 4-е, перераб. Воронеж: ИП Коновалов И.С., 2020. 404 с.
10. Рождественский А.П. Новейшая тектоника и развитие рельефа Южного Приуралья. М.: Наука, 1971. 286 с.
11. Смирнов А.И. Генетические типы и формы рельефа // Атлас Республики Башкортостан. Правительство Республики Башкортостан. Уфа, 2005. С. 65.
12. Смирнов А.И. Виды и современная активность развития опасных геологических процессов на Южном Урале и в Предуралье // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2022. № 2. С. 338–347.
13. Смирнов А.И., Соколов Ю.В. Карст и пещеры геопарка “Торатау” Геологический вестник. 2020. № 1. С. 113–132.
14. Смирнов А.И., Соколов Ю.В. Ишеевский участок — уникальный карстово-спелеологический объект Южного Предуралья Известия Русского географического общества. 2021. Т. 153. № 3. С. 63–75.
15. Смирнов А.И., Соколов Ю.В., Муслухов Ш.И. Спелеологические объекты шихана Торатау. Геологический вестник. 2022. № 3. С. 114–127.
16. Соколов Д.С., Основные условия развития карста. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 322 с.
17. Тимофеев Д.А., Дублянский В.Н., Ккикнадзе Т.З. Терминология карста. М.: Наука, 1991. 259 с.
18. Хисматуллин И.Р. Стерлитамакские шиханы: история исследования и научное значение геологических памятников природы // Молодой ученый. 2014. № 4. С. 407–409.
19. Чикишев А.Г. Карст Русской равнины. М.: Наука, 1978. 191 с.

Karst of Sterlitamak (BASHKIR) Shikhans and Their Surroundings in Southern Pre-Ural Area

A. I. Smirnov*

Institute of Geology Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia

**E-mail: smail@mail.ru*

Abstract—Shikhans, or lone mountains, is the local name for island mountains in the flat foothills of the Southern Urals. The shikhans are denudation remnants, sometimes with preserved residuals of Miocene-Pliocene planation surface on their tops, which allows estimating the total time of development of karst processes at least 5 million years. Despite more than 200 years of research on the shikhans, karst and its manifestations have received little attention to date. A map of karst in the shikhan territory was drawn up according to the standard methodology of karstological survey. Widespread and quite rare forms of carbonate karst of the shikhans and sulphate karst of their close vicinities were characterised. It was established that along with widespread and known in temperate latitudes karstic features, very rare corrosion wells are developed in the gypsum of the Kungurian Stage in the study area, forming karst fields with the highest density of karst forms known in the East European Plain. Gypsum caves at various stages of formation, as well as semi-blind karst-erosion gullies not typical for the lowland sulphate karst of the region were recorded. For the carbonate karst of the Shikhans in the limestones of the Sakmarian Stage, the highest location of karst caves in the foothills of the Southern Urals and the oldest (early Middle Pleistocene) age of their foundation were established. The main peculiarity of distribution of both surface and underground karst-holes is a clearly expressed dependence of forms and frequency of their occurrence on the course of formation of relief elements in the Neogene-Quaternary time. The presence in a small area of two types of karst by composition of karst rocks with very rare karst forms predetermines the high scientific, practical and educational significance of the shikhans and their surroundings.

Keywords: sulfate karst, carbonate karst, cave, grotto, corrosion wells, ponor, karst gully, karst lake

REFERENCES

1. Antonov K.V., Grabovskaya A.P. Sterlitamakskie shihany: ot istokov geologicheskoy istorii obrazovaniya do nashih dnei V sb.: Molodezhnaya nauka v XXI veke: tradicii, innovacii, vektory razvitiya. Materialy Vserossiyskoj nauchno-issledovatel'skoj konferencii. 2019. S. 56–59.
2. Borisevich D.V. Neotektonika Urala // Geotektonika. 1992. № 1. S. 57–67.
3. Galiullin R.H. Kratkie svedeniya ob izuchennosti rajona shihanov i mestorozhdeniya Shah-tau // Geologiya, poleznye iskopaemye i problemy geoekologii Bashkortostana, Urala i sopredel'nyh territorij. 2016. № 11. S. 277–279.
4. Gvozdeckij N.A. Karst. M.: Mysl', 1981. 214 s.
5. Dublyanskij V.N. Karstovye peshchery i shahty Gornogo Kryma. L.: Nauka, 1977. 182 s.
6. Lepyohin I.I. Prodolzhenie Dnevnyh zapisok puteshestviya Akademika Lepekhina // Polnoe sobranie uchenykh puteshestvij po Rossii. T. 4. SPb.: Imperatorskaya Akademiya nauk, 1822. 436 s.
7. Maksimovich G.A. Osnovy karstovedeniya. T. 1. Voprosy morfologii karsta, speleologii i gidrogeologii karsta. Permskoe knizhnoe izdatel'stvo, Perm', 1963. 445 s.
8. Pahotin S. Ekspediciya na ozero Tugar-Salgan i shihan Toratau. Sverdlovskoe oblastnoe otdelenie Russkogo geograficheskogo obshchestva. URL: <https://www.rgo.ru/ru/article/ekspediciya-na-ozero-tugar-salgan-i-shihan-toratau>.
9. Reestr osobo ohranyaemyh prirodnyh territorij respublikanskogo znacheniya: Ministerstvo prirodopol'zovaniya i ekologii Respubliki Bashkortostan, 2020, OOO "Nauchno-issledovatel'skij institut bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti", 2020, FGBNU Ufimskij institut biologii UFIC RAN, 2020. Izd. 4-e, pererab. Voronezh: IP Konovalov I.S., 2020. 404 s.
10. Rozhdestvenskij A.P. Novejshaya tektonika i razvitie rel'efa Yuzhnogo Priural'ya. M.: Nauka, 1971. 286 s.
11. Smirnov A.I. Geneticheskie tipy i formy rel'efa // Atlas Respubliki Bashkortostan. Pravitel'stvo Respubliki Bashkortostan. Ufa, 2005. S. 65.

12. Smirnov A.I. Vidy i sovremennaya aktivnost' razvitiya opasnyh geologicheskikh processov na Yuzhnom Urale i v Predural'e // *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2022. № 2. S. 338–347.
13. Smirnov A.I., Sokolov Yu.V. Karst i peshchery geoparka “Toratau” *Geologicheskij vestnik*. 2020. № 1. S. 113–132.
14. Smirnov A.I., Sokolov Yu.V. Isheevskij uchastok — unikal'nyj karstovo-speleologicheskij ob''ekt Yuzhnogo Predural'ya *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*. 2021. T. 153. № 3. S. 63–75.
15. Smirnov A.I., Sokolov Yu.V., Musluhov Sh.I. Speleologicheskie ob''ekty shihana Toratau. *Geologicheskij vestnik*. 2022. № 3. S. 114–127.
16. Sokolov D.S., *Osnovnye usloviya razvitiya karsta*. M.: Gosgeoltekhizdat, 1962. 322 s.
17. Timofeev D.A., Dublyanskij V.N., Kkiknadze T.Z. *Terminologiya karsta*. M.: Nauka, 1991. 259 s.
18. Hismatullin I.R. Sterlitamaskie shihany: istoriya issledovaniya i nauchnoe znachenie geologicheskikh pamyatnikov prirody // *Molodoj uchenyj*. 2014. № 4. S. 407–409.
19. Chikishev A.G. *Karst Russkoj ravнины*. M.: Nauka, 1978. 191 s.

СОВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПОЛЯРНЫХ И ПРИПОЛЯРНЫХ РАЙОНОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

© 2023 г. А. В. Фахретдинов*

Институт проблем освоения Севера, Тюменский научный центр СО РАН, Тюмень, Россия

**E-mail: arthurfahretdinov@gmail.com*

Поступила в редакцию 13.04.2023 г.

После доработки 21.11.2023 г.

Принята к публикации 22.11.2023 г.

По данным вегетационного индекса NDVI, полученных с применением сенсоров спутника MODIS-Terra за период 2000–2020 гг., выявлены тенденции климатогенной динамики фитомассы на участках, расположенных вблизи границ природных зон Западной Сибири (граница мерзлых и немерзлых болот, граница тайги и предтундровых редколесий, северная граница распространения древесной растительности). Оценка динамики растительности и факторов, ее определяющих, производилась по средним и максимальным значениям NDVI и связи индекса с основными климатическими параметрами. Повсеместно отмечен положительный тренд максимальных значений NDVI, вызванный ростом температуры воздуха и количества осадков. Наиболее сильно росла фитомасса предтундровых лиственничных редколесий, здесь же отмечена наибольшая межгодовая изменчивость. Корреляционный анализ, проведенный на основе средних значений NDVI, показал, что улучшение условий произрастания растительности в тундре обусловлено, преимущественно влиянием средних летних температур. В таежных районах рост фитомассы в большей мере связан с наличием древостоя, лучше удерживающим снежный покров, что способствует меньшему промерзанию грунтов в зимний период.

Ключевые слова: тундровая растительность, таежная растительность, северные экотопы, межгодовые изменения фитоценозов, потепление климата, спутниковые методы, NDVI

DOI: 10.31857/S0869607123030059, **EDN:** PGRKPA

ВВЕДЕНИЕ

Современные изменения климата на севере Западной Сибири приводят к росту температуры воздуха и увеличению атмосферных осадков [4, 9]. Это отражается на чувствительных полярных ландшафтах и приводит к трансформации многолетнемерзлых пород (ММП), что увеличивает риск разрушения инженерных сооружений. Климатические воздействия на мерзлые толщи осуществляются через систему покровов (растительный, почвенный, грунт деятельного слоя) [9]. Так, снижение фитомассы мохово-лишайниковой растительности приводит к увеличению глубины сезонного протаивания [17].

Наиболее заметно климатогенное изменение растительности на границах природных зон. На севере Западной Сибири за последние 30 лет отмечено продвижение к северу предтундровых редколесий [8]. В тундровой зоне отмечено улучшение условий произрастания древесной растительности и устойчивое существование отдельных

лесных “островов” в речных поймах с выходом на водораздел [13]. Экосистемы переходных полос — экотонов — нестабильны и требуют тщательного изучения.

Эффективным методом при оценке многолетних изменений растительности выступают данные дистанционного зондирования, преимуществом которых является возможность изучения труднодоступных районов, высокая информативность и доступность. Наибольшее применение в таких исследованиях получил вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), рассчитываемый как разность спектральных яркостей в красной и ближней инфракрасной зонах спектра, деленное на их сумму. Индекс принимает положительные значения от 0 до 1 и пропорционален количеству фитомассы [19]. Использование данного показателя выявило неоднозначность оценок современной динамики полярной растительности. Ряд авторов на основе анализа серии космоснимков отмечают положительный тренд NDVI за последние несколько десятилетий [3, 16]. В тоже время есть работы, свидетельствующие об отсутствии увеличения фитомассы в тундре [18]. Это говорит о многообразии влияющих на растительность климатических условий на фитобиогеоценозе, о многообразии ответных реакций разных фитоценозов на климатические изменения и определяет необходимость углубленного изучения климатогенной динамики растительности. Целью исследования стало выявление современных трендов динамики фитомассы полярных и приполярных районов Западной Сибири в связи с климатическими изменениями по данным индекса NDVI.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Территория исследования охватывает север Западной Сибири от северотаежной подзоны до подзоны южных тундр (63° – 68° с.ш.). Климат района континентальный субарктический с продолжительной зимой и коротким летом. Среднегодовая температура варьирует от -3.5°C в северной тайге до -8.4°C в зоне тундр. Среднее количество осадков за год 455–555 мм, с увеличением на юг. Продолжительность вегетационного периода составляет 90–110 дней [1].

Для исследования были выбраны участки, где в ходе наземных наблюдений отмечено нестабильное состояние геосистем, вызванное климатическими изменениями и трансформацией геоэкологических условий. Участки площадью 4 км^2 ($2 \times 2\text{ км}$) расположены в нескольких природных зонах: в северной тайге (природный парк “Нумто”, ХМАО–Югра), в предтундровых редколесьях Надымского района и в южной тундре (Тазовский полуостров, ЯНАО) (рис. 1). Первый участок расположен в зоне островного распространения многолетнемерзлых пород и находится на границе двух болотных зон — мерзлых бугристых болот и олиготрофных немерзлых сфагновых болот [2]. В ландшафтной структуре доминируют бугристые болота с ерниковыми кустарничково-лишайниково-сфагновыми сообществами мерзлых бугров и осоково-пушицево-сфагновыми немерзлыми мочажинами. В недавнее время здесь отмечена активизация процессов таяния мерзлоты, что вызывает усиление термокарста, деградацию бугристых болот и формирование хасыреев на месте спущенных озер [15]. Второй участок расположен на северном пределе таежной зоны с предтундровыми листовенными редкостойными лесами и редколесьями в комплексе с плоскобугристыми ерnikово-кустарничково-лишайниковыми и низинными травяно-сфагновыми болотами. Здесь острова мерзлоты приурочены к торфяникам и буграм пучения. Современные изменения климата вызвали рост температур корнеобитаемого слоя почв и ММП, смену сосново-кустарничково-сфагновых заторфованных редколесий пушицево-осоково-моховыми тальными болотами [12, 17]. Отмечено увеличение высоты и встречаемости кустарников и покрытия ими поверхности почвы, появление на торфяниках подроста березы, сосны и кедра [10]. Третий участок приурочен к подзоне южных (кустарниковых) тундр со сплошным распространением ММП. В растительном



Рис. 1. Карта-схема размещения ключевых участков: 1 – Природный парк “Нумто”, 2 – Надымский район, 3 – долина р. Монгаюрбей.

Fig. 1. Location of study sites: 1 – Natural park “Numto”, 2 – Nadym region, 3 – Mongayurbey River Valley.

покрове преобладают кустарниковые ивняковые и ерниковые лишайниково-моховые тундры, чередующиеся с полигональными и плоскобугристыми болотами. Особенностью участка является присутствие древесной растительности – разной степени сомкнутости лиственничников лишайниково-кустарничковых и кустарничково-зеленомошных, местами при участии ольхи. Таким образом, данный участок является своеобразным “форпостом” лесной растительности в зоне тундр.

В работе были использованы космоснимки спектрорадиометра MODIS (спутник Terra). Определение NDVI производилось по тематическому продукту MOD13Q1 V6 (16-дневные временные композиты с пространственным разрешением 250 м), что позволяет получить растровое изображение с рассчитанными индексами для каждого пикселя. Для оценки межгодовых изменений фитомассы были подсчитаны $NDVI_{mean}$ – среднее значение индекса за вегетационный период и $NDVI_{max}$ – максимальное значение за этот же временной интервал. Подсчет двух значений NDVI – максимального и среднего за сезон был проведен, поскольку данные индексы отражают разные биологические параметры и факторы температурного режима. Показатель $NDVI_{max}$ показывает наиболее полное развитие надземной фитомассы за вегетационный период [6] и определяется температурой июля. $NDVI_{mean}$ зависит прежде всего от продолжительности вегетационного периода, суммы его температур и от количества осадков, выпадающих в теплый период года. Подсчет $NDVI_{mean}$ и $NDVI_{max}$ осуществлялся для каждого

пиксела выбранных участков за вегетационные периоды (май–сентябрь) по 7–9 компонентам в зависимости от района исследования с 2000 по 2020 гг. Обработка спутниковых изображений выполнялась в программном комплексе (ПК) QGIS 3.10.14.

Для выявления связей индекса NDVI с климатическими условиями были использованы данные наблюдений на ближайших метеостанциях (Юильск – участок 1, Надым – участок 2 и Тазовский – участок 3). В расчет брались такие метеопараметры, как среднегодовая и летняя температура воздуха, сумма осадков за год и за летний период, максимальная высота снежного покрова за предшествующий наблюдениям зимний период.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ метеоданных за период с 2000 по 2020 гг. показал рост среднегодовой температуры воздуха на всех рассматриваемых участках с наибольшим и статистически достоверным трендом ($p < 0.05$) в тундровой зоне ($0.19^\circ\text{C}/\text{год}$). В северотаежной подзоне темпы роста температуры воздуха менее заметны и составляют в среднем 0.06°C в год. Потепление в районе исследований выражено более интенсивно, чем в среднем по России, где линейный тренд среднегодовой температуры составляет в настоящее время $+0.049^\circ\text{C}/\text{год}$ [5]. Наиболее сильно росла температура воздуха в весенний период, тренды летней температуры воздуха не столь выражены и статистически не значимы. Отмечается также увеличение количества атмосферных осадков, как за зимний период, так и за летний.

Растительность изученной территории по значениям $\text{NDVI}_{\text{mean}}$ согласно [14] можно охарактеризовать как “разреженную” – среднее за 20 летний период значение NDVI таежных участков – 0.62 ± 0.019 (№ 1) и 0.62 ± 0.035 (№ 2); тундрового – 0.60 ± 0.028 (№ 3). Небольшие различия между таежными и тундровыми фитоценозами объясняются малой сомкнутостью крон редкостойных северотаежных лесов, схожим флористическим составом травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов. Тем не менее, по t -критерию Стьюдента отмечены значимые различия NDVI между тундровыми и таежными участками ($p < 0.05$).

Внутри изучаемых площадей наибольшая пространственная вариабильность индекса $\text{NDVI}_{\text{mean}}$ отмечается на участке 2 (коэффициент вариации (C_v) – 14.5%), что обусловлено сочетанием нескольких типов растительности (лесной и болотной). Наиболее однородным по показателю $\text{NDVI}_{\text{mean}}$ (C_v на уровне 5%) можно считать участок 1 с выраженным доминированием бугристых болот.

Линейный тренд NDVI_{max} и $\text{NDVI}_{\text{mean}}$ на всех исследуемых территориях положительный (рис. 2). Таким образом, результаты подтверждают тенденцию возрастания значений NDVI в таежной зоне Западной Сибири [7]. Наблюдаются различия в динамике максимальной и средней за вегетационный период фитомассы. Если тренд NDVI_{max} приблизительно одинаков для всех участков, то значения $\text{NDVI}_{\text{mean}}$ изменяются неоднозначно. Наиболее сильно выражен тренд для предтундровых лиственничных редколесий (участок 2), несколько слабее возросло количество фитомассы ерниковых кустарничково-лишайниково-сфагновых сообществ бугристых торфяников (участок № 1). Среднее за вегетационный период количество фитомассы на участке в тундровой зоне изменялось незначительно.

Сравнение величин NDVI_{max} и $\text{NDVI}_{\text{mean}}$ выявило наибольшую разницу в ландшафтах, где присутствуют лиственничные редколесья (участок вблизи Надыма – 0.15, долина р. Монгаюрбей – 0.20). Весьма слабое отличие отмечено для растительности бугристых торфяников (участок 1), где разница между NDVI_{max} и $\text{NDVI}_{\text{mean}}$ всего 0.05. Слабые различия указывают на господство в структуре фитоценозов мхов и лишайни-

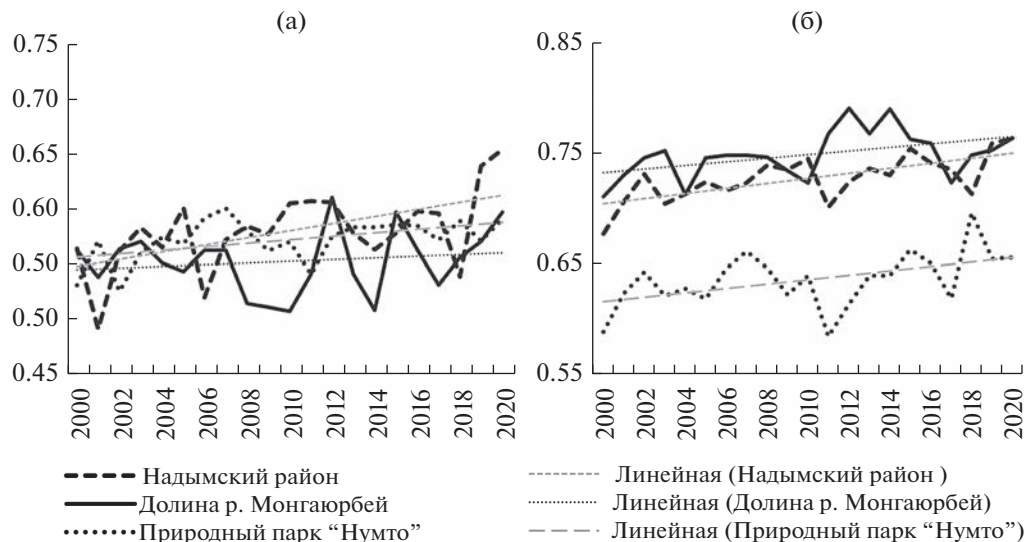


Рис. 2. Хронология средних (а) и максимальных (б) значений NDVI за вегетационные периоды 2000–2020 гг.

Fig. 2. Chronology of mean (a) and maximum (b) NDVI values for the vegetation periods 2000–2020.

ков, спектральные характеристики которых слабо меняются в течение летнего сезона, и малое количество травянистых растений и листопадных кустарников.

Среднегодовые значения NDVI варьируют от года к году в зависимости от изменчивости климатических показателей (рис. 2). При положительных трендах температур воздуха весенне-летнего периода, как для зоны тайги, так и для зоны тундры наблюдается статистически значимое увеличение NDVI [7]. Корреляционный анализ между $NDVI_{mean}$ и температурой за летний период показал снижение силы связи с понижением широты — для лиственничного редколесья в подзоне южных субарктических тундр коэффициент парной корреляции $r = 0.69$ (при $p > 0.01$), для растительных сообществ северотаежной подзоны данный показатель не образует достоверных зависимостей ($r < 0.40$). Такой результат говорит о сильном воздействии летних температур на рост фитомассы на обследованном участке в тундре, в то время как в таежной зоне влияние температурного режима не имеет определяющего влияния. Ранее сходный эффект был отмечен для растительности полуострова Ямал, где NDVI слабо чувствителен к изменению температуры и больше зависит от орографии, типа ландшафта и особенностей почв [18].

Отмечалось, что рост значений NDVI в тундре и лесотундре при потеплении климата связан главным образом с разрастанием кустарников [6, 17]. Кустарники и деревья лучше удерживают снежный покров, что способствует меньшему промерзанию грунтов в зимний период и улучшению термических и влажностных условий для роста и поддержания растений в период вегетации [6, 12]. В нашем исследовании корреляционный анализ показал статистически значимую связь вегетационного индекса с высотой снежного покрова за предшествующий зимний период ($r < 0.47$, при $p > 0.01$) на участке № 2 лиственничного редколесья в Надымском районе, что обусловлено снегозадерживающей ролью древостоя. На остальных участках зависимость не обнаружена.

Следует остановиться на значении трендов NDVI для устойчивости ММП. Растительный покров имеет важнейшее значение для стабилизации температурного режима

грунтов и сохранению мерзлоты. Последствия современных климатических изменений потепления — развитие растительности, накопление органики в почве и увеличение ее влажности стабилизирует ландшафтно-мерзлотные и геоэкологические условия [9]. В этом отношении наиболее неблагоприятны условия на самом северном участке, где потепление проявляется наиболее сильно, но, судя по значениям $NDVI_{mean}$, приводит лишь к небольшому увеличению фитомассы за вегетационный период. Следовательно, функция саморегуляции здесь выражена слабо. Также следует учитывать, что в тундре формирование мерзлых толщ происходит в основном под воздействием климатических факторов, а роль почвенно-растительного покрова существенно снижается по сравнению с более южными территориями [8].

На самом южном участке, где мерзлота наиболее нестабильна, рост фитомассы препятствует деградации ММП. Отмечалось, что здесь регрессивные участки мерзлых бугров, подверженные термокарстовому проседанию и последующей гидроморфизации, сравнительно быстро заселяются растениями-торфообразователями [15]. Увеличение толщины мохово-лишайникового покрова приводит к снижению летнего протаивания и стабилизирует мерзлотные условия. Таким образом, саморегулирующая функция здесь выражена в максимальной степени, а ерниковые кустарничково-лишайниково-сфагновые сообщества бугристых торфяных болот можно считать относительно устойчивыми.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Климатические изменения на севере Западной Сибири проявляются очень интенсивно. Рост температуры воздуха превышает среднероссийские показатели, выявлено увеличение количества осадков. Это приводит к увеличению фитомассы растительности. Тренд $NDVI_{max}$ и $NDVI_{mean}$ за период 2000–2020 положительный как в тундровой, так и в таежной зонах. Влияние температурного режима на величину фитомассы в южной тундре выражено сильнее, чем в таежной зоне, где выявлена статистически достоверная зависимость $NDVI$ от летней температуры. В северной тайге такой связи не отмечено, что свидетельствует о влиянии неклиматических факторов, определяющих устойчивость фитоценозов, а также о воздействии снежного покрова на продуктивность растительных сообществ. В сообществах с развитым кустарниковым или древесным ярусом усиливается снегонакопление, что способствует росту температуры корнеобитаемого слоя, тем самым улучшая условия для вегетации растительности. Наиболее стабильными к колебаниям климата за изученный период (2000–2020 гг.) можно считать ерниковые кустарничково-лишайниково-сфагновые сообщества бугристых торфяных болот (северная тайга).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФ 23-27-00366.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа. Омск: Омская картографическая фабрика, 2004. 303 с.
2. Валеева Э.И., Московченко Д.В., Арефьев С.П. Природный комплекс парка “Нумто”. Новосибирск, 2008. 280 с.
3. Варламова Е.В., Соловьев В.С. Исследование трендов $NDVI$ и фенологических параметров растительности мерзлотного региона Сибири по спутниковым наблюдениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 206–214.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-3-206-214>
4. Васильев А.А., Гравис А.Г., Губарьков А.А., Дроздов Д.С., Коростелев Ю.В., Малкова Г.В., Облогов Г.Е., Пономарева О.Е., Садуртдинов М.Р., Стрелецкая И.Д., Стрелецкий Д.А., Устинова Е.В.,

- Широков Р.С.* Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геокриологического мониторинга в Западном секторе Российской Арктики // Криосфера Земли. 2020. Т. 24. № 2. С. 15–30.
[https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-2\(15-30\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30))
5. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. М.: Государственный гидрологический институт Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Российской Федерации, 2023. 104 с.
 6. *Елсаков В.В., Телятников М.Ю.* Межгодовые изменения индекса NDVI на территории европейского северо-востока России и Западной Сибири в условиях климатических флуктуаций последних десятилетий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 260–271.
 7. *Зуев В.В., Короткова Е.М., Павлинский А.В.* Климатически обусловленные изменения растительного покрова тайги и тундры Западной Сибири в 1982–2015 гг. по данным спутниковых наблюдений // Исследования Земли из космоса. 2019. № 6. С. 66–76.
<https://doi.org/10.31857/S0205-96142019666-76>
 8. Изменения температурного поля мерзлых пород и состояния геосистем на территории Уренгойского месторождения за последние 35 лет (1974–2008) / Д.С. Дроздов, Н.Г. Украинцева, А.М. Царев, С.Н. Чекрыгина // Криосфера Земли. 2010. Т. 14. № 1. С. 22–31.
 9. *Конищев В.Н.* Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Вестник Московского университета. Сер. 5. Геогр. 2009. № 4. С. 10–20.
 10. *Москаленко Н.Г.* Изменение температуры пород и растительности под влиянием меняющегося климата и техногенеза в Надымском районе Западной Сибири // Криосфера Земли. 2009. Т. 13. № 4. С. 18–23.
 11. Растительный покров Западно–Сибирской равнины / И.С. Ильина, Е.И. Лапшина, Н.Н. Лавренко и др. Новосибирск: Наука, 1985. 251 с.
 12. *Тигеев А.А., Московченко Д.В., Фахретдинов А.В.* Современная динамика природной и антропогенной растительности зоны предтундровых лесов Западной Сибири по данным вегетационного индекса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 166–177.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-166-177>
 13. *Фахретдинов А.В., Арефьев С.П., Московченко А.В.* Экологическое состояние лиственничников в экотоне лесотундры Западной Сибири (на примере долины р. Монгаюрбей) // Сибирский экологический журнал. 2022. Т. 29. № 4. С. 464–475.
<https://doi.org/10.15372/SEJ20220407>
 14. *Черепанов А.С., Дружинина Е.Г.* Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геоматика. 2009. № 3. С. 28–32.
 15. *Шишконокова Е.А., Аветов Н.А., Березина Н.А., Толпышева Т.Ю., Шведчикова Н.К.* Проявления регрессивных процессов на болотах южной части природного парка Нумто (Ханты-Мансийский автономный округ – Югра) // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. 2016. Т. 121. № 3. С. 39–50.
 16. Dynamics of aboveground phytomass of the circumpolar Arctic tundra during the past three decades / H.E. Epstein, M.K. Reynolds, D.A. Walker et al. // Environmental Research Letters. 2012. V. 7. № 1. P. 015506.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/015506>
 17. *Moskalenko N.* Impact of climate warming on vegetation cover and permafrost in West Siberia northern taiga // Natural Science. 2013. V. 5. № 1. P. 144–148.
<https://doi.org/10.4236/ns.2013.51A022>
 18. Spatial and temporal patterns of greenness on the Yamal Peninsula, Russia: Interactions of ecological and social factors affecting the Arctic normalized difference vegetation index / D.A. Walker, U.S. Bhatt, M.K. Reynolds et al. // Environmental Research Letters. 2009. Vol. 4, N 4. P. 045004. .
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/045004>
 19. NDVI FAQ: All You Need To Know About Index. 2021. URL: <https://eos.com/blog/ndvi-faq-all-you-need-to-know-about-ndvi/> (Дата обращения 28.10.2021).

Contemporary Dynamics in Vegetation of the Polar and Subpolar Regions of Western Siberia Using Remote Sensing Data

A. V. Fakhretdinov*

Institute of the Problems of Northern Development, Tyumen Scientific Centre SB RAS, Tyumen, Russia

*E-mail: arthurfahretdinov@gmail.com

Abstract—Trends in the climatogenic dynamics of phytomass on the sites located along the borders of Western Siberia's natural zones (the border of frozen and unfrozen bogs, the bor-

der of taiga and open boreal woodlands, and the northern boundary of the distribution of woody vegetation) were spotted based on the vegetation index NDVI derived using the sensors of the MODIS-Terra satellite for the period 2000–2020. The assessment of the vegetation dynamics and the factors that determine it was conducted with the use of the mean and maximum NDVI values and the relation of the index with basic climatic variables. A positive trend of NDVI caused by an increase in air temperature and precipitation was revealed in all the studied areas. The phytomass of open boreal larch woodlands grew the most strongly, and the greatest interannual variability was noted there. A correlation analysis conducted on the basis of the NDVI mean values displayed that improvements in vegetation growth conditions in tundra are mainly caused by the impact of the average summer temperature. The increase in phytomass in taiga is mostly connected with the presence of a tree stand that better retains snow cover, which contributes to less freezing of the ground during the cold season.

Keywords: vegetation dynamics, climate change, ecotones, Western Siberia, remote sensing, NDVI

REFERENCES

1. Atlas Khanty – Mansiiskogo avtonomnogo okruga – Yugry. Tom II. Priroda. Ekologiya. Khanty-Mansiisk. Moskva: OOO NPF “Talka–TDV”, 2004. 152 c.
2. Valeeva E.I., Moskovchenko D.V., Aref'ev S.P. Prirodnyi kompleks parka “Numto”. Novosibirsk, 2008. 280 c.w
3. Varlamova E.V., Solov'ev V.S. Issledovanie trendov NDVI i fenologicheskikh parametrov rastitel'nosti merzlotnogo regiona Sibiri po sputnikovym nablyudeniya // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2017. T. 14. № 3. S. 206–214. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-3-206-214>
4. Vasil'ev A.A., Gravis A.G., Gubar'kov A.A., Drozdov D.S., Korostelev Yu.V., Malkova G.V., Obologov G.E., Ponomareva O.E., Sadurtdinov M.R., Streletskaya I.D., Streletskii D.A., Ustinova E.V., Shirokov R.S. Degradatsiya merzloty: rezul'taty mnogoletnego geokriologicheskogo monitoringa v Zapadnom sektore Rossiiskoi Arktiki // Kriosfera Zemli. 2020. T. 24. № 2. S. 15–30. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-2\(15-30\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30))
5. Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2022 god. M.: Gosudarstvennyi gidrologicheskii institut Federal'noi sluzhby po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchei sredy Rossiiskoi Federatsii, 2023. 104 s.
6. Elsakov V.V., Telyatnikov M.Yu. Mezhdogodnye izmeneniya indeksa NDVI na territorii evropeiskogo severo-vostoka Rossii i Zapadnoi Sibiri v usloviyakh klimaticheskikh fluktuatsii poslednikh desyatiletii // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2013. T. 10. № 3. S. 260–271.
7. Zuev V.V., Korotkova E.M., Pavlinskii A.V. Klimaticheski obuslovlennyye izmeneniya rastitel'nogo pokrova taigi i tundry Zapadnoi Sibiri v 1982–2015 gg. po dannym sputnikovyykh nablyudeniya // Issledovaniya Zemli iz kosmosa. 2019. № 6. S. 66–76. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019666-76>
8. Izmeneniya temperaturnogo polya merzlykh porod i sostoyaniya geosistem na territorii Urengoiiskogo mestorozhdeniya za poslednie 35 let (1974–2008) / D.S. Drozdov, N.G. Ukraintseva, A.M. Tsarev, S.N. Chekrygina // Kriosfera Zemli. 2010. T. 14. № 1. S. 22–31.
9. Konishchev V.N. Reaktsiya vechnoi merzloty na poteplenie klimata // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya. 2009. № 4. S. 10–20.
10. Moskalenko N.G. Izmenenie temperatury porod i rastitel'nosti pod vliyaniem menyayushchegosya klimata i tekhnogeneza v Nadymskom raione Zapadnoi Sibiri // Kriosfera Zemli. 2009. T. 13. № 4. S. 18–23.
11. Pavlov A.V., Malkova G.V. Dinamika kriolitozony Rossii v usloviyakh sovremennykh izmenenii klimata XX–XXI vekov // Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya. 2010. № 5. S. 44–51.
12. Rastitel'nyi pokrov Zapadno-Sibirskoi ravniny / I.S. Il'ina, E.I. Lapshina, N.N. Lavrenko i dr. Novosibirsk: Nauka, 1985. 251 s.
13. Tigeev A.A., Moskovchenko D.V., Fakhretdinov A.V. Sovremennaya dinamika prirodnoi i antropogennoi rastitel'nosti zony predtundrovyykh lesov Zapadnoi Sibiri po dannym vegetatsionnogo indeksa // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2021. T. 18. № 4. S. 166–177. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-166-177>
14. Fakhretdinov A.V., Aref'ev S.P., Moskovchenko A.V. Ekologicheskoe sostoyanie listvennichnikov v ekotone lesotundry Zapadnoi Sibiri (na primere doliny r. Mongayurbei) // Sibirskii ekologicheskii zhurnal. 2022. T. 29. № 4. S. 464–475. <https://doi.org/10.15372/SEJ20220407>

15. Cherepanov A.S. Druzhinina E.G. Spektral'nye svoistva rastitel'nosti i vegetatsionnye indeksy // Geomatika. 2009. № 3. S. 28–32.
16. Dynamics of aboveground phytomass of the circumpolar Arctic tundra during the past three decades / H.E. Epstein, M.K. Raynolds, D.A. Walker et al. // Environmental Research Letters. 2012. Vol. 7. № 1. P. 015506.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/015506>
17. Moskalenko N. Impact of climate warming on vegetation cover and permafrost in West Siberia northern taiga // Natural Science. 2013. Vol. 5. № 1. P. 144–148.
<https://doi.org/10.4236/ns.2013.51A022>
18. Spatial and temporal patterns of greenness on the Yamal Peninsula, Russia: Interactions of ecological and social factors affecting the Arctic normalized difference vegetation index / D.A. Walker, U.S. Bhatt, M.K. Raynolds et al. // Environmental Research Letters. 2009. Vol. 4. № 4. P. 045004.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/045004>
19. NDVI FAQ: All You Need To Know About Index. 2021. URL: <https://eos.com/blog/ndvi-faq-all-you-need-to-know-about-ndvi/> (Data obrashcheniya 28.10.2021).

РАЗВЕТВЛЕНИЯ РЕЧНЫХ РУСЕЛ, ИХ МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ И ТИПИЗАЦИЯ¹

© 2023 г. Р. С. Чалов^a, *, Г. Б. Голубцов^a, **, А. А. Куракова^a, ***

^aМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ), Москва, Россия

*E-mail: rschalov@mail.ru

**E-mail: georgy1995golubcov@yandex.ru

***E-mail: a.a.kurakova@mail.ru

Поступила в редакцию 19.10.2023 г.

После доработки 15.11.2023 г.

Принята к публикации 02.12.2023 г.

На основе многолетних исследований дано обоснование полной классификации разветвлений, образующих морфологически однородные участки в разных геолого-геоморфологических условиях, которые формируются в рукавах разветвлений разных структурных уровней и в руслах других морфодинамических типов. Анализ условий формирования разветвлений речных русел, их морфологии, деформаций и перестроений показал, что в классификации необходимо учитывать структурные уровни разветвлений и их морфодинамические типы; отдельно выделять разнообразие разветвлений в извилистом русле, формирующих типы русла или морфологически однородные участки; учитывать единичные разветвления на излучинах, в прямолинейном русле и в рукавах разветвлений; выделять пойменную многорукавность, второстепенные прибрежные или приостровные разветвления, а также разветвления второго и третьего порядков. Рукава русловых (островных) разветвлений могут представлять собой пологие излучины, шпорами которых являются острова; прямолинейное русло; разветвления второго-третьего порядков, совокупность которых создает в рукавах разные типы разветвления. Разработка классификации разветвлений, как и в целом ранее предложенной авторами морфодинамической классификации речных русел, дает возможность ее дорабатывать по мере изучения разветвлений речных русел, создавать в ней новые уровни (блоки), позволяющие учесть все большее морфологическое и динамическое разнообразие разветвлений и условий их формирования.

Ключевые слова: разветвления, классификация, русловые процессы, структурные уровни, русловые перестроения, пойменная многорукавность, раздвоенные русла

DOI: 10.31857/S0869607123030035, EDN: NZDNow

ВВЕДЕНИЕ

Разветвления речных русел — один из основных процессов их формирования (наряду с меандрированием и развитием относительно прямолинейных неразветвленных

¹ Выполнено по планам НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши и Научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ им. М.В. Ломоносова (№№ 121051400038-1, 121051200166-4 — исходные данные, русловой анализ) при финансовой поддержке РНФ (проект № 23-17-00065 — натурные исследования 2023 г., разработка типизации форм разветвлений; № 23-77-01006 — анализ опасных русловых процессов на реках Западной Сибири (размывы берегов)).

русел), проявляющиеся в образовании островов и разделении потока (рассредоточении стока) по рукавам и протокам, в его специфической гидравлической структуре и режиме русловых деформаций. Разветвленные русла, в первую очередь, характерны для больших и крупнейших рек [4], но встречаются на средних и даже малых реках, различаясь по количеству и форме островов, образующих разветвления, сложности их морфологии и динамики. Они формируются на равнинных и горных реках, в условиях свободного (широкопойменные русла) и ограниченного (врезанные русла) развития русловых деформаций, на реках с устойчивым и слабоустойчивым, песчаным или галечно-валунным руслом. Различная водность и режим стока воды, величина стока наносов, условия прохождения руслоформирующих расходов воды, геоморфологическое строение долины и положение русел относительно их бортов (коренных или террасовых берегов) — все это определяет различные условия формирования и морфологическое разнообразие разветвлений [25] и, соответственно, неодинаковые подходы к управлению русловыми процессами при транспортном и водохозяйственном освоении рек, прокладке через реки коммуникаций и т.д.

Образуя морфологически однородные участки разной протяженности, разветвленные русла (их часто называют многорукавными, что далеко не всегда отражает степень разветвленности — одиночные острова, даже определяющие облик русла, разделяют его на два рукава, и применение к таким разветвлениям приставки “много” искажает реальную картину) лишь во второй половине XX века стали предметом исследований. Это отразилось в классификациях речных русел, в большинстве которых выделяется не более двух–четырех их разновидностей, основывающихся на различных признаках и при этом не учитывающих гидроморфологию разветвлений, их генезис, режим деформаций, рассредоточение стока и сочетание с другими типами русел. Выделяются, например, осередковая или русловая и пойменная многорукавность [1, 10, 38], двуручкавные и многорукавные русла с разделением их на равнинных и горных реках [33]. Д. Росген [37] типизировал разветвления по сочетанию крупности наносов, соотношению ширины и глубины русел b_p/h и ширины поймы и ширины русла B_n/b_p и уклонов, выделив 14 комбинаций таких соотношений. Н.А. Ржаницын [15] противопоставлял разветвления на горных и равнинных реках, в зависимости от ширины поймы и русла, расположения островов в виде отдельных форм или цепочек вдоль реки. Такая же ограниченность свойственна и многим другим исследованиям [34–36].

Исключение представляет подход к типизации русел, развиваемый в МГУ [24, 27], в основу которого положены идеи, высказанные Н.И. Маккавеевым [13, 14], и являющийся, по существу, морфодинамическим. В нем выделение типов разветвлений основывается на взаимном расположении островов, образующих разветвления, сопряженности их развития, рассредоточенности стока по рукавам и протокам, гидравлических и морфологических условий формирования островов. Учитывается степень разветвленности русла (количество островов и рукавов), наличие вторичной разветвленности и, главное, многолетние переформирования — русловой режим разветвлений [27]. Она включает практически все известные разновидности разветвлений: относительно простые типы — одиночные, сопряженные и односторонние, сложные формы разветвлений — чередующиеся односторонние, параллельно-рукавные, сложно-сопряженные, пойменно-русловые, дельтовые, разветвлено-извилистые, разбросанные, разветвления в узлах слияния рек и раздвоенные русла, которые формируются на горных, полугорных и равнинных реках, в различных геолого-геоморфологических условиях (на реках с широкопойменным, адаптированным и врезанным руслом), на малых, больших и крупнейших реках. Однако, структурные уровни проявления процессов разветвления — русловой (островной), пойменно-русловой, пойменный (раздвоенное русло) — в ней также не отражены, а пойменно-русловые разветвления и раздвоенные русла включены в перечень русловых (островных) разветвлений, то есть в один ряд поставлены разветвления, соответствующие различным структурным

уровням их развития. Кроме того, в ней не отражены разветвления на излучинах русла, или, наоборот, извилистость рукавов, другие проявления разветвленности, не создающие на реках морфологически однородные участки, но формирующиеся в рукавах разветвлений, в привершинных частях и на крыльях излучин, в том числе при их спрямлении (прорванные излучины), и т.д. Отсутствует пойменная многорукавность — расчленение поймы на отдельные пойменные массивы относительно мало-водными протоками (первые проценты от общего стока воды в реке), свойственная рекам с широкопойменным руслом. Разветвления рек с врезанным руслом выделены только по наличию или отсутствию коренного (как правило, скального) цоколя — скульптурные, скульптурно-аккумулятивные и аккумулятивные.

Эти недостатки присущи всем подходам к типизации разветвлений, поскольку в них рассматриваются только островные разветвления (русовая многорукавность).

Задача настоящей статьи — на основе обобщения материалов многолетних исследований разветвленных русел, их морфологии и динамики, условий формирования и многообразия проявлений, обосновать полную, на современном уровне изученности, классификацию разветвлений, образующих морфологически однородные участки, формирующихся в рукавах разветвлений разных структурных уровней и в руслах других морфодинамических типов, в разных геолого-геоморфологических условиях.

ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Исследования русловых процессов на реках с разветвленным руслом начались в МГУ им. М.В. Ломоносова в 1957 г. на Северной Двине. Инициатором их выполнения и организатором был Н.И. Маккавеев, который несколько раньше [13] впервые обратил внимание на многообразие разветвлений русел. В последующие годы русловые исследования проводились на многих больших и крупнейших реках России и бывшего СССР, имеющих в основном разветвленное русло (верхняя и нижняя Обь, Лена, Енисей, Амур, Волга, Амударья) или разветвления, осложняющие излучины и прямолинейные русла (Вычегда, Иртыш, средняя Обь, Днестр), на горных реках Кавказа, Алтая и других горных регионов, встречающихся также в виде единичных образований на малых и средних реках. В ходе исследований проводились с различной детальностью съемка и промеры русел, гидрометрические измерения в рукавах и протоках, определялась структура потоков, темпы размыва берегов, состав и распределение руслообразующих наносов. Для выполнения руслового анализа и определения режима русловых деформаций привлекались лоцманские карты и карты судоходных рек, фиксирующие состояние русел в разные временные интервалы с конца XIX—середины XX веков, а также космические и аэроснимки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Условия формирования разветвленных русел и единичных разветвлений.

Общей причиной формирования разветвлений русел любого типа является разделение потока на ветви течения, между динамическими осями которых аккумулируются наносы и образуются осередки. Это происходит при увеличении относительной ширины русла b_p/h (здесь h — глубина русла) и гидравлических сопротивлений движению потока $\lambda = C^2/2g$ (C — коэффициент Шези, зависящий от шероховатости русла).

Согласно критерию И.Ф. Карасева [9] $\Theta = \frac{b_p}{h} \sqrt{\lambda}$, при больших значениях Θ (по И.Ф. Карасеву >9.5 , по другим данным в несколько раз больше и неодинаково на разных реках [8, 11]) поток разбивается на две и более ветвей течения. Заращение осередков, как обсыхающих в межень частей образующихся крупных грядовых форм руслового рельефа (макроформ, осередков), приводит к их превращению в элементар-

ные острова, а в процессе их развития — в малые, которые определяют структуру потока и сохраняют его разделение на ветви даже при затоплении в многоводную фазу водного режима [6].

На больших и крупнейших реках увеличение b_p/h при прочих равных условиях является главной причиной формирования протяженных участков разветвленного русла, различающихся только по типам самих разветвлений в зависимости от устойчивости русла, влияния коренных берегов, изменений ширины поймы и особенностей ее затопления, подпорных явлений перед сужениями русла и днища долины и слиянием с крупными притоками. Формирование тех или иных типов разветвлений связано с эволюцией элементарных и малых пойменных островов, объединением их в большие острова и островные массивы, разделяющие поток по рукавам и приводящие к рассредоточению стока [7, 27]. Это — русловая (островная) разветвленность русла — основа морфологически однородных участков, отражающая главные черты морфодинамики и руслового режима (деформаций, переформирований) рек в целом или рукавов пойменно-руслowych разветвлений и раздвоенных русел. Таковы большая часть верхней Оби, широтный участок ее среднего и все нижнее течение; Лена, на которой разветвления начинаются еще во врезанном русле в среднем течении и заканчиваются лишь перед Ленской “трубой” в низовьях; большая часть Енисея; многие участки Печоры и Северной Двины; нижняя Волга; средний и нижний Амур (кроме участков, где он пересекает горные массивы Хинган и Сихотэ-Алинь), а также многие реки северо-востока страны.

Морфологически однородные участки, создающие разветвления, определяют облик самого русла или рукавов разветвлений более высоких структурных уровней — пойменно-руслowych разветвлений и раздвоенного русла. При этом сами разветвления этих уровней уже создают разделение русла на самостоятельные, автономно развивающиеся рукава (например, Волга и Ахтуба, Малая и Горная — Большая Обь), характеризующаяся в зависимости от их длины единым морфодинамическим типом или несколькими морфологически однородными участками с разным типом русла и их чередованием (Малая Обь в основном меандрирует, прерывая серии излучин участками разветвлений разного типа, в том числе пойменно-руслowymi, рукава которых, в свою очередь, образуют излучины и прямолинейные отрезки).

На реках с врезанным руслом, формирующимся в скальных грунтах (кристаллических или осадочных), разветвления преимущественно развиваются в условиях дефицита наносов, и их возникновение связано с коренными выступами на дне реки (огрудками), образующими скульптурные острова. В этих условиях скопления наносов возникают возле препятствий в виде выступов на дне — формируются скульптурно-аккумулятивные разветвления. При этом образование разветвлений происходит на фоне интенсивного врезания реки (до нескольких см/год) при дефиците наносов благодаря корродирующему воздействию перемещаемых в стречневой зоне гальки и валунов. Врезанные русла в пластичных грунтах из-за сложного геолого-литологического строения отложений и их трудной, но все-таки размываемостью (в отличие от неразмываемости скальных) не имеют дефицита наносов, характеризуются параметрами русел и их разветвлений, устойчивостью русел такими же, как реки с широкопойменным руслом, отсутствием коренных выступов на дне, хотя иногда подстилалась плотными глинами, как бы скользят по ним, способствуя их избыточному расширению и уменьшению глубины. Определенный отпечаток накладывает лишь отсутствие или предельно малая ширина поймы, в результате чего во время половодья почти весь поток сосредотачивается в русле.

Формирование островных (руслowych) разветвлений и составляющих их элементов (одиночные разветвления, звенья сопряженных, параллельно-рукавных разветвлений и т.д.), образующих морфологически однородные участки, закономерность их дефор-

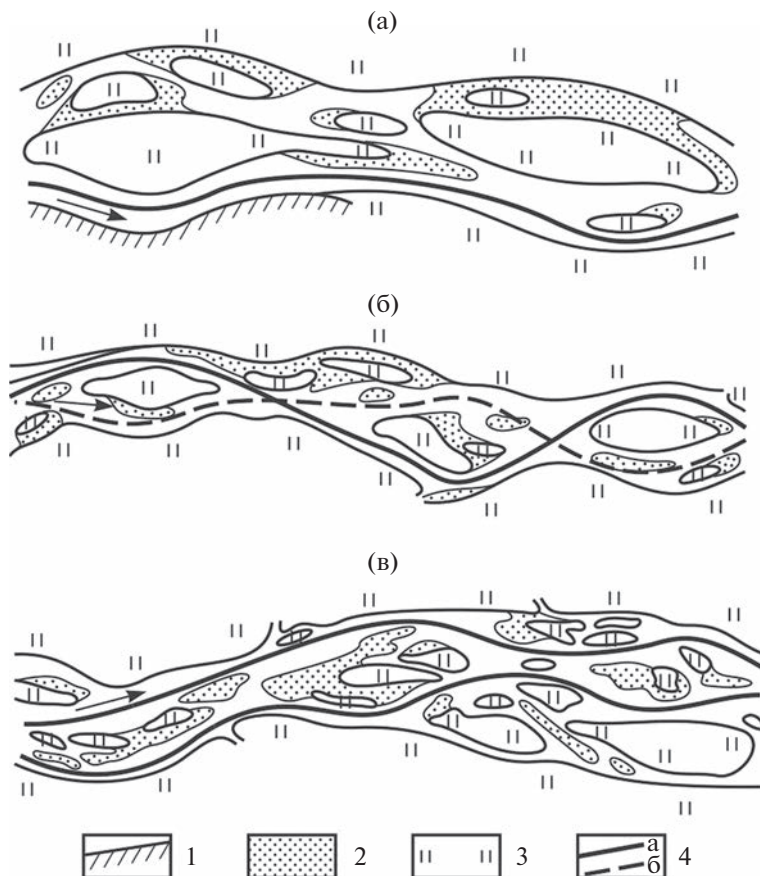


Рис. 1. Морфологически однородные участки разветвлений: а — односторонних; б — сопряженных; в — параллельно-рукавных.

Fig. 1. Morphologically homogeneous areas of branching: а — one-sided; б — conjugate; в — parallel-sleeve.

маций, многолетних переформирований и трансформаций как в процессе саморазвития, так и при естественных и антропогенных изменениях факторов русловых процессов и условий формирования достаточно полно освещены в общих [2, 24, 26–28, 31] и многочисленных региональных публикациях [5, 17–19] и в статьях, посвященных каждому типу разветвлений [11, 12, 22, 29–32] (рис. 1).

Условия и причины формирования разветвлений, не образующих морфологически однородные участки и представляющих собой единичные образования в руслах других типов, а также в рукавах островных (русловых) разветвлений, очень разнообразны. Наиболее распространенными являются следующие их разновидности.

1) Разветвления, формирующиеся при спрямлении развитых или крутых сегментных излучин, приводящие к возникновению прорванных излучин, в которых продолжают функционировать наряду с вновь образовавшимися рукавами, спрямляющими излучины, старые русла (рис. 2а). Они существуют на реках, на которых руслоформирующие расходы воды Q_{ϕ} проходят при затопленной пойме, и потоки воды, затопившей пойму, концентрируясь в староречьях, не позволяют им полностью утратить гид-

равлическую связь с рекой и превратиться в озера-старицы на пойме. То же происходит, если образование прорванной излучины осуществляется вдоль коренного берега ниже его близкого к коленообразному изгибу. Направляющее воздействие на поток плеча коренного берега поддерживает многоводность старого русла, тогда как вновь образовавшийся рукав оказывается менее водным и, если при этом отходит от коренного берега — меандрирует, образуя излучины с параметрами, соответствующими его водности. При Q_{ϕ} , проходящих в пойменных бровках, старое русло в виде второго изогнутого рукава существует в течение лишь некоторого времени, пока полностью не обмелеет.

2) Образование островов у выпуклых берегов крутых излучин в их привершинных частях, отделенных от пойменной шпory излучины короткими, спрямляющими крутые повороты реки рукавами. Образование таких разветвлений двойное. При достижении излучиной критических значений параметров ($r < 2.5b_p$ — правило Миловича, где r — радиусы кривизны, b_p — ширина русла) нарушается безотрывное обтекание потоком берегов, стрежень перемещается к выпуклому берегу, русло расширяется и формируется осередок, со временем превращающийся в остров; это же может привести к отторжению части шпory и возникновению острова, имеющего в данном случае эрозионное происхождение (рис. 2б).

3) Острова образуются на крыльях излучин: на верхнем крыле (рис. 2в) — как следствие подпора потока перед крутым изгибом русла в ее вершине (особенно на вынужденных излучинах), на нижнем крыле (рис. 2г) — из-за размыва вогнутого берега ниже вершины излучины и вследствие образующегося из-за этого местного расширения русла.

4) Формирование расширения русла на прямолинейной “вставке” между смежными излучинами как следствие несовпадения направлений руслового и пойменного потоков и образования здесь водоворотных зон при сливе воды в русло с затопленной поймы и переливе воды из русла в пределы поймы (рис. 2д).

5) Образование островов второго и третьего порядков в рукавах русловых (островных) разветвлений, на участках относительно прямолинейного русла и на излучинах. Параметры этих разветвлений в несколько раз, иногда на порядок, меньше параметров разветвлений основного русла. Причины их появления в руслах разного типа очень разнообразны. В начале рукавов они возникают из-за снижения транспортирующей способности потока при его разделении на ветви течения; в нижней части рукава — вследствие подпора потока во время прохождения Q_{ϕ} со стороны второго, обычно более короткого рукава, или из-за расширения русла при слиянии рукавов. В прямолинейном русле и на крыльях излучин они возникают из-за неровностей береговой линии, возникающих как следствие литологии и размываемости слагающих их отложений (смена песчаной русловой фации аллювия глинами старичной, образующих выступающие в реку пачины и т.д.).

6) В узлах слияния и разделения рукавов между смежными звеньями сопряженных разветвлений, в выбоинах береговой линии, локальных расширениях русла, ниже небольших выступов и мысов ведущих (в т.ч. пойменных) берегов, обусловленных неоднородностью их литологического строения, часто встречаются острова очень малых размеров (по сравнению даже с элементарными и тем более островами разветвлений, определяющих тип русла).

7) На больших и крупнейших реках прибрежные острова образуют иногда архипелаги, разделенные системой относительно маловодных межостровных протоков, располагающихся ниже крупных изгибов коренных берегов, отклоняющих от них речной поток. Суммарная водность таких протоков не превышает обычно 10–15%, но вместе с отвлечением в них части расхода воды, отходом потока от ведущего берега, образованием излучины основного рукава, огибающего такие архипелаги островов, и рассе-

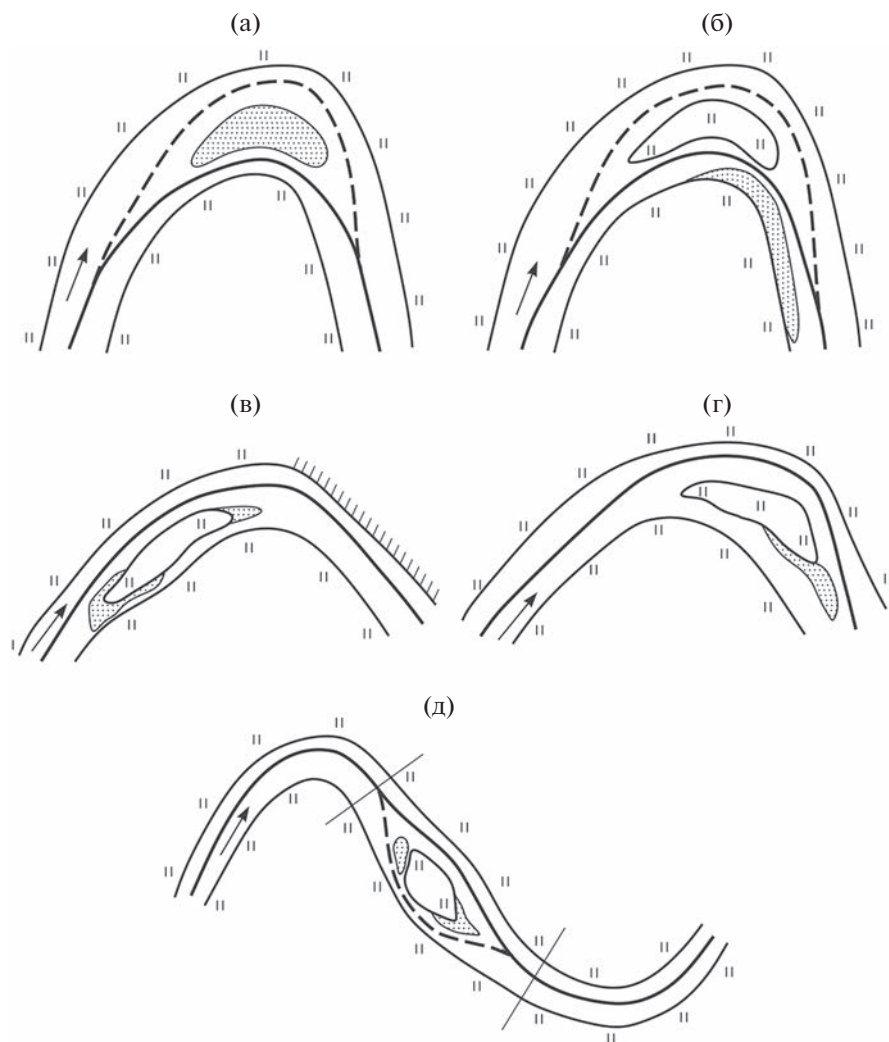


Рис. 2. Разветвления на излучинах русла: а – в привершинной части при нарушении правила Миловича; б – в привершинной части при отторжении части шпоры излучины; в – в верхнем крыле излучины; г – в нижнем крыле излучины; д – на прямолинейной вставке между смежными излучинами.

Fig. 2. Branchings at the bends of the channel: а – in the near-top part in violation of the Milovich rule; б – in the apical part when part of the spur of the bend is rejected; в – in the upper wing of the bend; г – in the lower wing of the bend; д – on a straight insert between adjacent bends.

доточением стока по рукавам нижерасположенного разветвления основного русла, являются одним из существенных факторов снижения транспортирующей способности потока и дальнейшего усложнения разветвленности русла. Таковы часто встречающиеся прибрежные разветвления на нижней Лене, особенно на участке от устья Вилюя до с. Жиганска, где они сформировались ниже мысов правого горного берега (хребет Омулаган) и конусов выноса правобережных горных притоков (рек Лямпуща, Дянышка и других).

Особое положение среди разветвлений, не образующих морфодинамический тип русла и, соответственно, не формирующих морфологически однородные участки, занимает пойменная многорукавность. В отличие от перечисленных выше единичных по встречаемости разветвлений, она очень широко распространена, сопровождая русловые (островные), пойменно-русловые разветвления и раздвоенные русла. Формирование пойменной многорукавности относится уже к самому высокому (пойменному) уровню проявления русловых процессов, создавая своеобразный облик поймы и всего пойменно-руслового комплекса. Пойменные протоки (ответвления [13] от основного русла) расчленяют пойму на отдельные пойменные массивы, существенно увеличивая общую разветвленность русла и рассредоточенность стока. Они встречаются как на реках с разветвленным руслом, наследуя отмирающие рукава и протоки при приращении островов к береговой пойме, так и на меандрирующих реках, сопровождая развитие прорванных излучин. Условиями существования пойменной многорукавности являются глубокое и длительное затопление поймы, прохождение при затопленной пойме руслоформирующих расходов воды и образование на ней достаточно мощных течений [24, 27]. Пойменная многорукавность очень характерна для широкопойменного русла Северной Двины (полои), Волги (воложки), Печоры (шары), нижнего Амура, средней (на широтном участке) и нижней Оби (на Амуре и Оби она сопровождает раздвоенные русла), Анадыря, Индигирки и Колымы, в меньшей степени для средней и нижней Лены (следствие врезания реки [3] и густой таежной растительности на пойме); но она отсутствует, например, на верхней Оби и Иртыше, где Q_{ϕ} проходит до выхода воды на пойму.

Пойменные протоки в большинстве своем, за редким исключением, маловодны (первые % от общего расхода воды в реке), но в совокупности, особенно при их многочисленности, вызывают заметное снижение водности русла, его основных рукавов и рукавов раздвоенного русла. Вместе с оттоком воды на затопленную пойму они на Оби, Лене, Амуре вызывают снижение водности основного русла (рукавов раздвоенного русла) до 30–40% и более, что существенно сказывается на русловом режиме реки в целом. Сами пойменные протоки (ответвления) будучи маловодными, меандрируют, либо имеют относительно прямолинейное русло из-за незначительности в них стока руслообразующих наносов: поступая из основного русла реки или его рукавов, наносы сосредотачиваются (аккумулируются) в их верхней части и на большей длине, где их источником являются только размывы берегов, оказываются в дефиците. Лишь отдельные пойменные протоки имеют относительно повышенную водность (обычно это недавно отшнуровавшиеся от основного русла бывшие рукава) и отличаются интенсивными деформациями. Такова, например, Городская протока в Якутском разветвлении на Лене, водность которой в межень составляет 5–7%, возрастая в половодье до 12%, а ее колебания год от года зависят от смещения побочной в основном русле, периодически перекрывающих заход в протоку. Сама Городская протока еще в начале XX века представляла собой один из основных рукавов в то время сопряженных разветвлений и была судоходной [21].

Раздвоенные русла и пойменно-русловые разветвления соответствуют более высоким структурным уровням разветвленности, рукава которых характеризуются своими морфодинамическими типами и гидролого-морфологическими соотношениями, отличающимися от русла с русловыми (островными) разветвлениями. Но если в пойменно-русловых разветвлениях эти характеристики в каждом рукаве практически неизменны по их длине, то в раздвоенном русле они существенно изменяются, т.к. имея протяженность десятки и даже сотни километров, каждый рукав имеет свой водосбор, принимает притоки, а при наличии пойменной многорукавности пойменные протоки (ответвления), по которым осуществляется их гидравлическая связь с основными рукавами. Например, водность Юганской Оби в начале разветвления реки составляет в половодье 17%, тогда как перед слиянием с правым рукавом Оби — 36%; помимо мно-

гочисленных пойменных проток и слива воды с затопленной поймы она принимает два левобережных притока Оби — Большой Юган и Большой Салим. Соответственно не только изменяются параметры излучин Юганской Оби, но и наряду с ними появляются русловые разветвления.

Генезис разветвленных русел и водность вторых рукавов очень разнообразны. Наименьшей характеризуется Ахтуба, составляющая не более 3% от стока Волги (она — реликт дельты заполнения ингрессионного залива при понижении уровня Каспийского моря) [20]. Наибольшей — рукава средней и нижней Оби (до 40%) являющиеся следствием направленной аккумуляции наносов и очень большой ширины поймы (на нижней Оби она достигает 60 км при суммарной ширине русел двух основных рукавов Малой и Горной Оби около 3 км), глубоко и надолго затопляемой во время половодья.

Пойменно-русловые разветвления часто встречаются на меандрирующих реках (Вычегда, Ока), причем оба рукава в них меандрируют, а также в рукавах раздвоенных русел (на Малой и Горной Оби). На интенсивно аккумулирующих реках своеобразной разновидностью раздвоенных русел являются пойменные и проточно-озерные разветвления (Янцзы, нижний Терек).

Если учесть все возможные варианты разветвлений русел рек и рассредоточения стока воды по рукавам и протокам, то, по экспертной оценке, доля их возрастает до 50–60% от общей длины рек России и бывших республик СССР, тогда как морфологически однородные участки разветвленных русел, включая раздвоенные русла на реках длиной более 500 км, составляют всего 11.5% [16].

Рукава раздвоенных русел характеризуются своим набором морфодинамических типов (морфологически однородных участков) в зависимости от их водности, рассредоточенности потока по пойменным протокам и пойме во время прохождения Q_{ϕ} при затопленной пойме, наличия коренных берегов и их конфигурации. Так, на нижней Оби в левом рукаве (Малая Обь) раздвоенного русла абсолютно преобладают излучины, хотя на участках в начале и нижней части до слияния с р. Северной Сосьвой, где доля стока относительно повышена, русло разветвляется, а после ответвления протоки Бол. Нюрик (одного из рукавов раздвоенного русла), соединяющей Малую и Большую Обь, только меандрирует, и лишь в низовьях разветвляется на рукава (следствие повышения доли стока и подпора от Большой Оби). На Горной Оби преобладают разветвления и прямолинейные участки русла вдоль правого коренного берега, а на Большой Оби (ниже слияния с Бол. Нюриком) сначала развиты большие излучины, а затем, при возвращении рукава к коренному берегу, — прямолинейное неразветвленное русло. В пойменно-русловых разветвлениях Малой и Горной Оби их рукава, в свою очередь, меандрируют или разветвляются на рукава. На широтном участке средней Оби основной правый рукав имеет преимущественно разветвленное или разветвлено-извилистое русло, левый рукав (Юганская Обь, протоки Бол. Салымская и Неулева), обладая значительно меньшей водностью (от 1/4 до 1/3 от общего расхода), меандрирует. На Амуре на всех участках с раздвоенным руслом его рукава характеризуются разветвлениями разного типа.

В отличие от раздвоенного русла, являющего прерогативой рек с исключительно широкопойменным руслом, пойменно-русловые разветвления встречаются и во врезанном и адаптированном русле, но при этом они сами и их рукава в основном создают общий облик разветвленного русла. Такова, например, Северная Двина выше слияния с р. Вагой. На реках с широкопойменным руслом разветвления этого структурного уровня чаще формируются на меандрирующих реках, будучи приуроченными к перевалам реки от одного борта долины к другому.

Разветвления одного и того же типа неодинаковы по параметрами, положению в русле и количеству создающих их островов на реках, различаются в зависимости от устойчивости русел, в широкопойменном, адаптированном или врезанном русле, на

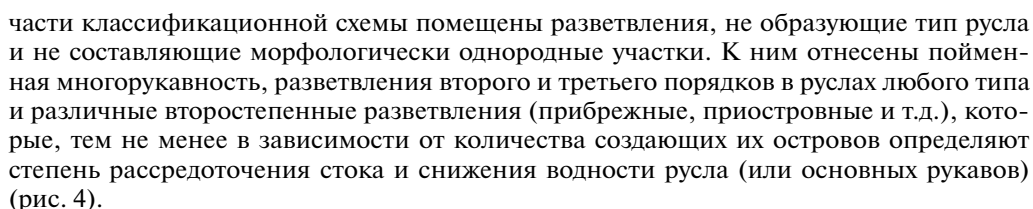
реках врезающихся или аккумулирующих наносы (или отличающихся по интенсивности вертикальных русловых деформаций), на горных, полугорных и равнинных реках, крупнейших, больших, средних и малых реках, реках с песчаным или галечно-валунным составом руслообразующих наносов. Специфические формы разветвлений возникают на реках со скальным руслом или локальными выходами скал. Раздвоенные русла в основном характерны для крупнейших рек (средняя и нижняя Обь, нижняя Волга, нижний Амур), но встречаются на средних реках в специфических условиях формирования их русел (в среднем течении р. Аргуни и на р. Чулыме при пересечении ими активно опускающихся морфоструктур, в нижнем течении Кети и Казыма — в зонах подпора от главной реки, сопровождаясь во всех случаях интенсивной направленной аккумуляцией наносов). На нижнем Днестре и на нижней Волге они представляют собой реликты бывших эстуарно-дельтовых систем. Аналогичной ситуацией в нижнем течении рек Янцзы и Терека, но в условиях экстремально высокого стока наносов, является формирование пойменных проточно-озерных разветвлений.

КЛАССИФИКАЦИЯ РАЗВЕТВЛЕНИЙ

Классификация разветвлений должна включать, во-первых, все структурные уровни их развития. Это собственно морфодинамические типы русел, разветвленных на рукава — русловые (островные) разветвления, различные их формы и виды, проявляющиеся в рукавах более высоких структурных уровней, но во всех случаях образующих морфологически однородные участки, создающие морфологический облик русел, определяющие рассредоточение стока и учитывающие его геоморфологический тип — врезанное или широкопойменное русло. Во-вторых, в ней должны быть отражены разветвления, формирующиеся в виде единичных образований на излучинах русла, в рукавах русловых (островных) разветвлений, между смежными излучинами или имеющими подчиненное (второстепенное) значение в рассредоточении стока и формировании их морфологического облика. К таковым относятся также пойменные ответвления, создающие пойменную многорукавность, определяющую морфологический облик дна долины, но не отражающую морфодинамику самого русла, хотя из-за рассредоточения стока по ней сказывается на размерах (параметрах) русловых форм.

На рис. 3 представлена полная классификация разветвлений речных русел, которую следует рассматривать как уточнение соответствующих разделов морфодинамической классификации МГУ [26]. В ней отражено практически все многообразие известных в настоящее время (2020-е годы) разветвлений, соотношения между ними и другими типами русла. Разветвления, создающие морфологически однородные участки, соответствующими тому или иному морфодинамическому типу русла, в том числе рукавов раздвоенных русел и пойменно-русловых разветвлений в широкопойменном, адаптированном (с поймой не более $2-3b_p$) и врезанном русле, составляют верхнюю и центральную части классификационной схемы. При этом к ним отнесены и разветвления на излучинах русла, поскольку на больших реках излучины с островами на крыльях, в привершинных частях между смежными излучинами и при их спрямлении (в т.ч. прорванные) по существу, развиваясь на большинстве излучин больших и крупнейших рек, создают специфический морфологический тип русла, отличный от разветвленно-извилистого или чередующихся односторонних разветвлений [23] — извилистое (меандрирующее) русло с разветвлениями.

Отдельно показаны (соединяющими линиями) островные (русловые) разветвления рукавов раздвоенного русла и пойменно-русловых разветвлений широкопойменных и адаптированных русел и их соответствие разновидностям скульптурных, скульптурно-аккумулятивных и аккумулятивных разветвлений врезанных русел, а также типы русел, характерные для рукавов разветвлений любого структурного уровня. В нижней



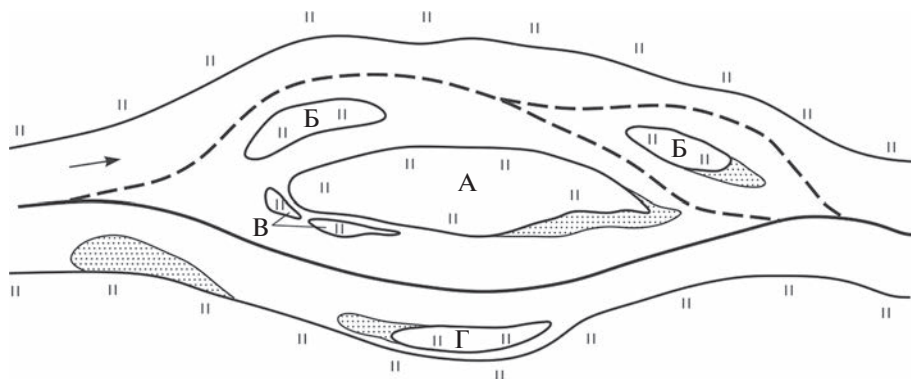


Рис. 4. Формирование островов в рукавах одиночного разветвления — А; Б — острова второго и третьего порядка в основном рукаве; В — приостровные разветвления; Г — прибрежные разветвления в выбоине ведущего берега.

Fig. 4. Formation of islands in the branches of a single branch — А; Б — islands of the second and third order in the main branch; В — island branches; Г — coastal branches in the choice of the leading shore.

Составляя основу классификации, морфодинамические типы русла в то же время разделены по структурным уровням, к которым отнесены также разветвления, формирующиеся в узлах слияния рек. Они могут быть любого морфодинамического типа и составлять островные (русловые), пойменно-русловые разветвления (например, при слиянии Оби и Томи) или раздвоенные русла (Амур и Уссури). Это же относится к единичным разветвлениям, не образующим морфологически однородные участки, хотя они в общей (полной) классификации составляют определенный раздел, и для каждой разновидности показано ее соответствие островным типам разветвления.

Выделение в морфодинамической классификации (рис. 3) на русловом (островном) уровне 11 типов собственно разветвленных русел, разветвлено-извилистых и четырех разновидностей разветвлений, формирующихся на излучинах русел и также образующих специфические морфологически однородные участки (всего 16) в условиях свободного развития русловых деформаций (широкопойменные русла) свидетельствует о многообразии русловой (островной) разветвленности — от достаточно простых одиночных до сложных по морфологии и динамике параллельно-рукавных разветвлений. Если в этот же ряд поставить раздвоенные русла, пойменно-русловые (даже без учета морфологического разнообразия их рукавов) и два типа в узлах слияния рек, то число разновидностей только широкопойменных разветвленных русел достигает 18. В адаптированных руслах (переходные условия между свободными и ограниченными условиями развития русловых деформаций) выделено девять русловых и пойменно-русловое разветвление. Врезанные русла, разветвленные на рукава, будучи образованными аккумулятивными островами имеют восемь морфологических типов; такое же их количество у скульптурно-аккумулятивных разветвлений, а с учетом скульптурных и других разветвлений врезанных русел общее число разветвлений составляет 24. Принимая во внимание разветвления не образующие морфодинамических типов русла и не создающих морфологически однородных участков, но оказывающих то или иное влияние на русловый режим рек (таковы пойменная многоруканность, второстепенные разветвления в прибрежных и периферических зонах русла, разветвления второго и третьего порядков), то общее количество выделяемых в классификации типов разветвлений достигает 53. Морфологически разветвления адаптированных и врезанных русел аналогичны широкопойменным, если они формируются

в пластичных грунтах, и специфика их формирования связана только с сосредоточенностью потока в русле во время половодья и отсутствием (или незначительностью) оттока части его в передельи поймы. Иные условия возникают на реках с врезанным руслом, формирующимся в скальных грунтах, обуславливающих дефицит наносов с непосредственный контакт потока с коренным ложем, наличие скальных выступов в русле и общую стесненность потока.

Изменение водности потока, транспорта наносов и режима деформаций, определяемые свободными или ограниченными геолого-геоморфологическими условиями, обуславливают различия в режиме деформаций и переформирований, необходимость рассматривать типы русла отдельно для широкопойменных, адаптированных и врезанных русел. Кроме того, один и тот же тип разветвлений неодинаков на реках с руслами неустойчивыми, слабоустойчивыми и устойчивыми, с песчаным или галечно-валунным составом руслообразующих наносов, на реках аккумулирующих наносы или врезающихся, а среди врезанных, формирующихся в скальных или пластичных грунтах — на горных, полугорных и равнинных реках. Различие в морфодинамике (форме разветвлений) и режиме их деформаций связаны также с тем, являются ли они составной частью морфологически однородных участков или зависят от переформирования излучин или смежных участков русла другого типа. Например, развитие спрямляющего рукава Михайловской излучины на 1161–1178 км средней Оби и постепенная трансформации ее в одиночное разветвление (остров размывается со скоростью 2.8–5.3 м/год, правый берег основного рукава, имеющего больший расход воды — 4.4 м/год) может дать импульс для образования прорванной Коломенской излучины ниже по течению, что приведет к кардинальной перестройке русла реки (в левом рукаве, куда направляется основной расход воды средние скорости размыва достигают 5.8 м/год). При этом спрямляющий рукав продолжает активно развиваться, скорости отступления берегов в нем колеблются от 3.5 до 5.6 м/год; на всем участке размывы берегов несут потенциальную опасность, но в привершинной части Коломенской прорванной излучины проявляется реальная опасность для с. Коломино.

Возникают и другие условия, обуславливающие морфологические и динамические различия разветвлений, позволяющие в каждом из них выделять те или иные разновидности. Среди них превалирующую роль играет извилистость рукавов, соотношение их параметров и наличие в них разветвлений второго и третьего порядков, прибрежных и приостровных второстепенных разветвлений, размеры межостровных протоков и количество островов, составляющих одиночные или звенья других разветвлений, пойменная многорукавность (и степень ее развитости). При этом разветвления вне зависимости от их морфологии и сложности постоянно в процессе русловых деформаций видоизменяются (отсюда названия типов русла — морфодинамические). Причем в слабо- и неустойчивых песчаных руслах их переформирования осуществляются очень быстро, в течение гидрологического года, нескольких лет или в течение одной многоводной фазы водного режима; наоборот, разветвления устойчивых, врезанных, особенно формирующихся в скальных грунтах галечно-валунных русел сохраняют свой облик и подвергаются минимальным изменениям на протяжении многих десятилетий и даже столетий. Среди последних существуют только им свойственные скульптурные и скульптурно-аккумулятивные разветвления. С другой стороны, только на реках с широкопойменным руслом, причем при соотношении $B_d/b_p \geq 10$ возможно формирование раздвоенных русел; пойменно-русловые разветвления могут быть в рукавах раздвоенных русел и встречаться на реках с разным типом русла, кроме врезанных в скальные грунты.

Разветвления, формирующиеся на меандрирующих реках, на их крыльях или в привершинных частях излучин (на последних и между смежными излучинами) — в основном являются следствием их эволюции или на больших и крупнейших реках составля-

ют, получая массовое распространение, впервые выделенный тип русла — извилистого (меандрирующего) с островными разветвлениями, формирующимися на излучинах. Например, на среднем (выше устья р. Тобола) Иртыше русло повсеместно меандрирующее, но на многих крутых излучинах в привершинных частях образуются острова, т.к. здесь нарушается условие безотрывного обтекания берегов (правило Миловича) или происходит отторжение части шпоры излучины. Так на повороте Ново-Логоновском на среднем Иртыше (1503–1501 км) — крутой излучине с $l/L = 1.8$, анализ распределения на ней скоростей течения подтверждает нарушение правила Миловича $r < 2.5b_p$. Наблюдается отрыв динамической оси потока от вогнутого берега и ее прохождение вдоль выпуклого берега. Снижение скоростей течения в вершине излучины связано с наличием водоворотной зоны, для которой свойственно обратное направление струй потока, в результате увеличиваются гидравлические сопротивления и происходит снижение скоростей течения и аккумуляция наносов, что в итоге приводит к образованию в начале осередка, а при его зарастании — острова. При этом энергетическое воздействие частиц на берега и дно напротив возрастает, несмотря на визуальное снижение скоростей течения. На крыльях излучины скорости течения возрастают до 1 м/с и более. Это выражается в том, что скорости размыва берегов на излучине в среднем составляют 2.7 м/год при максимуме — 5.3 м/год в нижнем крыле. Нередки острова на крыльях излучин и между смежными большими излучинами, где русло по диагонали пересекает пойму, и между вершинами смежных излучин там, где пересекаются пойменные и русловые потоки в половодье, возникает местное расширение русла или подпор потока перед крутым изгибом русла в вершине излучины. И хотя сами острова образуют единичные формы на излучинах, в совокупности с ними они создают определенный морфодинамический тип русла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ условий и морфологических проявлений процессов разветвления речных русел, их деформаций, переформирований, и пространственного распространения позволили разработать полную (общую) классификацию разветвлений речных русел, включающую в себя:

1) основные структурные уровни разветвлений — островные (русловые), пойменно-русловые и раздвоенные русла;

2) морфодинамические типы разветвлений, составляющие морфологически однородные участки русла реки или рукавов пойменно-русловых разветвлений и раздвоенных русел;

3) разветвления в извилистом русле, связанные с формированием островов на крыльях излучин, в их привершинных частях и между смежными излучинами, составляющими в совокупности по своей морфологии и деформациям отдельный тип русла и морфологически однородные участки;

4) единичные разветвления, не образующие морфологически однородные участки и встречающиеся на излучинах, в прямолинейном русле и в рукавах разветвлений;

5) пойменную многорукавность, составляемую ответвлениями от русла или рукавов пойменно-русловых разветвлений и раздвоенного русла (относительно маловодные пойменные протоки), которые расчленяют пойму реки на отдельные массивы;

6) второстепенные прибрежные или приостровные разветвления, образующиеся малыми островами или группами островов в периферических частях русла (в выбоинах берегов) возле островов, в узлах слияния/разделения рукавов сопряженных разветвлений, ниже изгибов русла и т.д.;

7) разветвления второго и третьего порядков, возникающие в руслах любого типа в разветвлениях в их начале перед разделением потока на рукава и перед слиянием рукавов.

Рукава русловых (островных) разветвлений представляют собой: пологие излучины, шпорами которых являются острова; прямолинейное русло; разветвления второго-третьего порядков, совокупность которых создает в рукавах одиночные, сопряженные или параллельно-рукавные разветвления.

Построение классификации разветвлений, как и в целом морфодинамической классификации речных русел МГУ, дает возможность добавлять новые ячейки, соответствующие типам разветвлений, которые выявляются по мере их изучения, создавать в ней новые уровни (блоки), позволяющие учесть все большее морфологическое и динамическое разнообразие разветвлений и условий их формирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алабян А.М. Динамика потока и русла равнинных рек, разветвленных на рукава. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ. 1991. 25 с.
2. Алексеевский Н.И., Чалов С.Р. Гидрологические функции разветвленного русла. М.: Географ. ф-т МГУ, 2009. 240 с.
3. Борсук О.А., Чалов Р.С. О врезании русла р. Лены // Изв. ВГО. 1973. Т. 105. Вып. 5. С. 452–456.
4. Великанов М.А. Русловой процесс. М.: Госфизматиздат, 1958. 395 с.
5. Водные пути бассейна Лены. М.: МИКИС, 1995. 600 с.
6. Голубцов Г.Б. Формирование, морфология и динамика островов широкопойменных русел больших рек (на примере Оби и Лены): автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2023. 30 с.
7. Голубцов Г.Б., Чалов Р.С. Сравнительный гидролого-морфологический анализ островов сложноразветвленных русел верхней Оби и средней Лены // Вестник Удмуртского университета. Сер. Биология. Науки о земле. 2020. 30(2). С. 164–174.
8. Камышев А.А. Гидроморфология и переформирования широкопойменных русел больших равнинных рек (на примере Оби и Лены): автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2022. 27 с.
9. Карасев И.Ф. Русловые процессы при переброске стока. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 288 с.
10. Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Смищенко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат. 1982. 272 с.
11. Кузьмина Е.М., Чалов Р.С. Гидролого-морфологическая характеристика широкопойменного разветвленного русла средней Лены // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2020. № 1. С. 87–96.
12. Куракова А.А. Гидролого-морфодинамический анализ русел и опасные проявления русловых процессов на равнинных реках Обь-Иртышского бассейна (лесная зона). Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2022. 28 с.
13. Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР. 1955. 347 с.
14. Маккавеев Н.И. Русловой режим рек и трассирование прорезей. М.: Речиздат, 1949. 202 с.
15. Ржаницын Н.А. Руслоформирующие процессы рек. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 264 с.
16. Русловой режим рек Северной Евразии (в пределах бывшего СССР). М.: Географ. ф-т МГУ Москва, 1994. 336 с.
17. Русловые процессы и водные пути на реках бассейна Северной Двины. М.: Журн. РТ. 2012. 492 с.
18. Русловые процессы и водные пути на реках Обского бассейна. Новосибирск: РИПЭЛ плюс, 2001. 300 с.
19. Русловые процессы на реках Алтайского региона. М.: МГУ. 1996. 244 с.
20. Рычагов Г.И., Коротяев В.Н., Чернов А.В. История формирования палеодельты нижней волги // Геоморфология. 2010. № 3. С. 73–80.
21. Чалов Р.С., Завадский А.С., Рулева С.Н., Кирик О.М., Прокопьев В.П., Андросов И.М., Сахаров А.И. Морфология, деформации, временные изменения русла р. Лены и их влияние на хозяйственную инфраструктуру в районе г. Якутска // Геоморфология. 2016. № 3. С. 22–35.
22. Чалов Р.С., Чалов С.Р. Дискретные свойства русловых процессов и их отражение в морфодинамике речных русел // Изв. Российской академии наук. Сер. географическая. 2023. Т. 87. № 2. С. 234–249.
23. Чалов Р.С., Чалов С.Р. Структурные уровни и морфодинамическая классификация русловых разветвлений // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 3. С. 259–271.
24. Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во МГУ. 1979. 232 с.

25. Чалов Р.С. О морфологическом разнообразии и типизации русел рек, разветвленных на рукава // Геоморфология. 2019. № 3. С. 3–18.
26. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 608 с.
27. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 2. Морфодинамика речных русел. М.: КРАСАНД. 2011. 960 с.
28. Чалов Р.С., Алабян А.М., Иванов В.В., Лодина Р.В., Панин А.В. Морфодинамика русел равнинных рек. М.: Геос. 1998. 288 с.
29. Чалов Р.С., Беркович К.М., Рулёва С.Н. и др. Формирование, эволюция и временная трансформация параллельно-рукавных разветвлений речных русел // Географический вестник. 2020. № 4 (55). С. 110–125.
30. Чалов Р.С., Камышев А.А., Завадский А.С., Куракова А.А. Морфодинамика и гидролого-морфологическая характеристика русла средней Оби на широтном участке. География и природные ресурсы, 2021 (2): С. 92–102.
31. Чалов Р.С., Чалова Е.Р. География русел рек разветвленных на рукавах на территории России // Изв. РГО, 2019. Т. 151. Вып.6. С. 20–34.
32. Чалов Р.С., Завадский А.С., Камышев А.А., Куракова А.А., Михайлова Н.М., Рулева С.Н. Гидролого-морфологическая характеристика и перестроения разветвленного русла нижней Оби (в пределах Ямало-Ненецкого АО) // Изв. Российской академии наук. Сер. географическая. 2021. Т. 85. № 4. С. 539–553.
33. Шэн Юйчан, Гун Гоюань. Речная геоморфология. Пекин: Наука. 1986. (на китайском языке).
34. Eaton B.C., Millar R.G., Davidson S. Channel patterns: Braided, anabranching, and single-thread // Geomorphology. 2010. 120. P. 353–364.
35. Leopold L.B., Wolman M.G. River meanders // Geol. Soc. Am. Bull. 1960. V. 71. P. 769–794.
36. Nanson A., Knighton D. Anabranching rivers: their cause, character and classification // Earth Surface Processes and Landforms, 1996. 21 (3) P. 217–239.
37. Rosgen D.L. A classification of natural rivers // Catena. 1994. № 22. P. 168–199.
38. Schumm S.A. The fluvial system. 1977. 338 p.

Formation of River Channel Branches, Their Morphology and Typing

R. S. Chalov^{1, *}, G. B. Golubtsov^{1, **}, and A. A. Kurakova^{1, ***}

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*E-mail: rschalov@mail.ru

**E-mail: georgy1995golubcov@yandex.ru

***E-mail: a.a.kurakova@mail.ru

Abstract—Based on many years of research, a justification is given for a complete classification of branches that form morphologically homogeneous areas in different geological and geomorphological conditions, which are formed in branches of branches of different structural levels and in channels of other morphodynamic types. An analysis of the conditions for the formation of river channel branches, their morphology, deformations and reformations showed that the classification must take into account the structural levels of branches and their morphodynamic types; separately highlight the diversity of branches in a winding channel, forming a separate type of channel or morphologically homogeneous areas; take into account single branches at bends, in a straight channel and in the branches of branches; highlight floodplain multi-branching, secondary coastal or near-island branches, as well as branching of the second and third orders. The arms of channel (island) branches can be gentle bends, the spurs of which are islands; straight channel; branching of the second and third orders, the combination of which creates different types of branching in the arms. The development of a classification of branchings, as well as the morphodynamic classification of river channels of the Moscow State University in general, makes it possible to refine it as the branching of river channels is studied, to create new levels (blocks) in it, allowing to take into account the increasing morphological and dynamic diversity of branches and the conditions of their formation.

Keywords: branching, classification, channel processes, structural levels, channel reformati-
ons, multi-branch floodplain, bifurcated channels

REFERENCES

1. Alabyan A.M. Dinamika potoka i rusla ravninnykh rek, razvetvlenykh na rukava. Avtoref. dis. ... kand. geogr. nauk. M.: MGU. 1991. 25 p.
2. Alekseevskii N.I., Chalov S.R. Gidrologicheskie funktsii razvetvlennoogo rusla. M.: Geograf. f-t MGU, 2009. 240 p.
3. Borsuk O.A., Chalov R.S. O vrezanii rusla r. Leny // Izv. VGO. 1973. T. 105. Vyp. 5. P. 452–456.
4. Velikanov M.A. Ruslovoi protsess. M.: Gosfizmatizdat, 1958. 395 p.
5. Vodnye puti basseina Leny. M.: MIKIS, 1995. 600 p.
6. Golubtsov G.B. Formirovanie, morfologiya i dinamika ostrovov shirokopoimennykh rusel bol'shikh rek (na primere Obi i Leny): avtoref. dis. ... kand. geogr. nauk. M., 2023. 30 p.
7. Golubtsov G.B., Chalov R.S. Sravnitel'nyi gidrologo-morfologicheskii analiz ostrovov slozhnora-zvetvlenykh rusel verkhnei Obi i srednei Leny // Vestnik Udmurtskogo universiteta. Ser. Biologiya. Nauki o zemle, 2020. 30 (2). P. 164–174.
8. Kamyshev A.A. Gidromorfologiya i pereformirovaniya shirokopoimennykh rusel bol'shikh ravninnykh rek (na primere Obi i Leny): avtoref. dis. ... kand. geogr. nauk. M., 2022. 27 p.
9. Karasev I.F. Ruslovyie protsessy pri perebrozke stoka. L.: Gidrometeoizdat, 1975. 288 p.
10. Kondrat'ev N.E., Popov I.V., Snishchenko B.F. Osnovy gidromorfologicheskoi teorii ruslovogo protsesssa. L.: Gidrometeoizdat. 1982. 272 p.
11. Kuz'mina E.M., Chalov R.S. Gidrologo-morfologicheskaya kharakteristika shirokopoimennogo razvetvlennoogo rusla srednei Leny // Vestnik Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya. 2020. № 1. P. 87–96.
12. Kurakova A.A. Gidrologo-morfodinamicheskii analiz rusel i opasnye proyavleniya ruslovykh protsessov na ravninnykh rekakh Ob'-Irtyskogo basseina (lesnaya zona). Avtoref. dis. ... kand. geogr. nauk. M.: MGU, 2022. 28 p.
13. Makkaveev N.I. Ruslo reki i eroziya v ee basseine. M.: Izd-vo AN SSSR. 1955. 347 p.
14. Makkaveev N.I. Ruslovoi rezhim rek i trassirovanie prorezei. M.: Rechizdat, 1949. 202 p.
15. Rzhantsyn N.A. Rusloformiruyushchie protsessy rek. L.: Gidrometeoizdat, 1985. 264 p.
16. Ruslovoi rezhim rek Severnoi Evrazii (v predelakh byvshego SSSR). M.: Geograf. f-t MGU Moskva, 1994. 336 p.
17. Ruslovyie protsessy i vodnye puti na rekakh basseina Severnoi Dviny. M.: Zhurnal RT. 2012. 492 p.
18. Ruslovyie protsessy i vodnye puti na rekakh Obskogo basseina. Novosibirsk: RIPEL plyus, 2001. 300 p.
19. Ruslovyie protsessy na rekakh Altaiskogo regiona. M.: MGU. 1996. 244 p.
20. Rychagov G.I., Korotaev V.N., Chernov A.V. Istoriya formirovaniya paleodel't nizhnei volgi // Geomorfologiya. 2010. № 3. P. 73–80.
21. Chalov R.S., Zavadskii A.S., Ruleva S.N., Kirik O.M., Prokop'ev V.P., Androsova I.M., Sakharov A.I. Morfologiya, deformatsii, vremennye izmeneniya rusla r. Leny i ikh vliyanie na khozyaistvennuyu infrastrukturu v raione g. Yakutska // Geomorfologiya. 2016. № 3. P. 22–35.
22. Chalov R.S., Chalov S.R. Diskretnye svoystva ruslovykh protsessov i ikh otrazhenie v morfodinamike rechnykh rusel // Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya. 2023. T. 87. № 2. P. 234–249.
23. Chalov R.S., Chalov S.R. Strukturnye urovni i morfodinamicheskaya klassifikatsiya ruslovykh razvetvlenii // Vodnye resursy. 2020. T. 47. № 3. P. 259–271.
24. Chalov R.S. Geograficheskie issledovaniya ruslovykh protsessov. M.: Izd-vo MGU. 1979. 232 p.
25. Chalov R.S. O morfologicheskom raznoobrazii i tipizatsii rusel rek, razvetvlenykh na rukava // Geomorfologiya. 2019. № 3. P. 3–18.
26. Chalov R.S. Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika. T. 1. Ruslovyie protsessy: faktory, mekhanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnykh rusel. M.: Izd-vo LKI, 2008. 608 p.
27. Chalov R.S. Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika. T. 2. Morfodinamika rechnykh rusel. M.: KRASAND. 2011. 960 p.
28. Chalov R.S., Alabyan A.M., Ivanov V.V., Lodina R.V., Panin A.V. Morfodinamika rusel ravninnykh rek. M.: Geos. 1998. 288 p.
29. Chalov R.S., Berkovich K.M., Ruleva S.N. i dr. Formirovanie, evolyutsiya i vremennaya transformatsiya parallel'no-rukavnykh razvetvlenii rechnykh rusel // Geograficheskii vestnik. 2020. № 4 (55). P. 110–125.
30. Chalov R.S., Kamyshev A.A., Zavadskii A.S., Kurakova A.A. Morfodinamika i gidrologo-morfologicheskaya kharakteristika rusla srednei Obi na shirotnom uchastke // Geografiya i prirodnye resursy, 2021 (2). P. 92–102.

31. Chalov R.S., Chalova E.R. Geografiya rusel rek razvetvlennykh na rukavakh na territorii Rossii // *Izv. RGO*, 2019. T. 151. Vyp. 6. P. 20–34.
32. Chalov R.S., Zavadskii A.S., Kamyshev A.A., Kurakova A.A., Mikhailova N.M., Ruleva S.N. Gidrologo-morfologicheskaya kharakteristika i pereformirovaniya razvetvlenного русла nizhnei Obi (v predelakh Yamalo-Nenetskogo AO) // *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2021. T. 85. № 4. P. 539–553.
33. Shen Yuichan, Gun Goyuan'. *Rechnaya geomorfologiya*. Pekin: Nauka. 1986. (na kitaiskom yazyke).
34. Eaton B.C., Millar R.G., Davidson S. Channel patterns: Braided, anabranching, and single-thread // *Geomorphology*. 2010. 120. P. 353–364.
35. Leopold L.B., Wolman M.G. River meanders // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1960. Vol. 71. P. 769–794.
36. Nanson A., Knighton D. Anabranching rivers: their cause, character and classification // *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996. 21 (3) P. 217–239.
37. Rosgen D.L. A classification of natural rivers // *Catena*. 1994. № 22. P. 168–199.
38. Schumm S.A. *The fluvial system*. 1977. 338 p.