Вестник Московского университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в ноябре 1946 г.

Серия 5 **ГЕОГРАФИЯ**

№ 1 • 2021 • ЯНВАРЬ–ФЕВРАЛЬ

Издательство Московского университета

Выходит один раз в два месяца

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 913+551.4.08

Е.А. Еременко[1], Ю.Н. Фузеина[2], Е.В. Ворошилов[3], М.В. Власов[4], А.В. Бредихин[5]

АНТРОПОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ РЕЛЬЕФА ВОРКУТИНСКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО РАЙОНА

Впервые выполнена количественная оценка антропогенной трансформации рельефа на территории Воркутинского промышленного района за 90 лет хозяйственного освоения. Выделены участки преобладающей прямой (создание антропогенного рельефа) и косвенной (изменение условий рельефообразования, спектра и интенсивности геоморфологических процессов) трансформации рельефа. Около 25% (144 км^2) от всей площади района – это территории, где либо созданы антропогенные формы рельефа (79 км^2), либо наблюдается существенное изменение естественного хода развития геоморфологических процессов (65 км^2). Среди прямых антропогенных трансформаций рельефа по площади и объемам перемещенного вещества преобладают аккумулятивные – создание положительных форм рельефа (отвалы, насыпи и др.), общая площадь их составляет 75,2 км^2, объем – 417,8 млн м^3. При этом 30% площади всех положительных антропогенных форм и 66% их объема – это отвалы шахт. Прямые денудационные трансформации (создание карьеров, каналов и пр.) значительно уступают по площади (3,8 км^2) и объему перемещенного материала (72 млн м^3). Косвенные трансформации рельефа имеют место в ближайших окрестностях (до 1 км, в основном – в пределах 200 м) зон прямых трансформаций. Они выражаются в изменении спектра и интенсивности геоморфологических процессов (прежде всего, мерзлотных, склоновых и флювиальных) вследствие нарушения сплошности растительного покрова, изменения гидрогеологического режима, теплового баланса мерзлых толщ и пр. В составе антропогенных отложений территории абсолютно преобладают по площади распространения и объемам продукты дробления скальных, в том числе углесодержащих пород, изъятые при проходке подземных выработок. Наибольшие объемы антропогенных отложений сосредоточены в отвальных полях шахт, ЦОФ «Печорская» и Юньягинского угольного разреза (в сумме – до 66% от всего объема), а также в насыпях под населенными пунктами (до 26%). В пределах участков развития антропогенного рельефа получили развитие обвально-осыпные, эрозионные и эоловые процессы, в естественных условиях развитые на территории крайне ограниченно; спектр криогенных процессов здесь был изменен – ведущим процессом стало криогенное выветривание, а пучение и термокарст, напротив, практически не развиты. Наиболее опасным природным процессом, развитым в пределах отвальных полей действующих и ликвидированных шахт, является самовозгорание. Обнаруженные признаки этого процесса (парение поверхности, выход горячих газов и растворов, фумаролы, просадки поверхности отвалов) указывают на возможность существования в теле отвалов крупных полостей и трещин.

Ключевые слова: породные отвалы, карьеры, добыча угля, техногенные грунты, рельеф районов горнодобычи

Введение. Воркутинский промышленный район (ВПР) располагается на территории Печорского угольного бассейна (республика Коми), общая площадь которого составляет около 90 тыс. км^2. Это крупнейший угольный бассейн в Европе и единственный в европейской части России, где добываются коксующиеся угли (около 9% от всего объема добычи коксующихся углей в России). Балансовые запасы угля составляют около 7,4 млрд тонн (в т. ч. – 3,3 млрд тонн коксующихся углей) [Логинов, Смирнов, 2005]. Основные потребители воркутинского угля – Череповецкий, Новолипецкий и Нижнетагильский металлургические комбинаты, Московский коксогазовый завод и Ленинградский промышленный узел. С 1931 года на шахтах Воркуты добыто около 960 млн тонн (в 1980-х добывали до 22 млн т/год, в настоящее время – до 14–15 млн т/год). Уголь здесь поднимают с большой глубины (до 1100 м), что требует сложной организации добычного процесса, а также приводит к формированию больших объемов

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, доцент, канд.геогр. н.; *e-mail*: eremenkoeaig@gmail.com

[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, доцент, канд. геогр. н.; *e-mail*: donaldw@bk.ru

[3] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, магистрант; *e-mail*: voroshilov@yahoo.com

[4] ООО «ФРЭКОМ», г. Москва, гл. специалист; *e-mail*: vlasov-maxim@mail.ru

[5] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, заведующий кафедрой, профессор, докт. геогр. н.; *e-mail*: avbredikhin@yandex.ru

пустой породы, изымаемой при проходке подземных выработок (стволов, штреков, лав, штолен и др.). При добыче тысячи тонн угля на поверхность извлекается от 200 до 300 т пустой породы [Коршунова, 1999; Северьянова, 2015], которая складируется в окрестностях шахт, формируя отвалы площадью в десятки га и высотой до 40 м. Комплекс антропогенных форм рельефа территории Воркутинского узла включает не только собственно отвалы шахт и обогатительной фабрики, но и большое количество прочих форм, образованных в ходе сопутствующего хозяйственного освоения территории (насыпи автомобильных и железных дорог, площадные отсыпки под населенными пунктами и др.). За прошедшее столетие природные ландшафты окрестностей Воркуты были существенно изменены. Наиболее изучены геохимические последствия горнодобычи [Коршунова, 1999; Дымов и др., 2013; Северьянова, 2015], в то время как работы по оценке изменения рельефа ранее не проводились. Целью исследования являлось выделение основных типов антропогенной трансформации рельефа Воркутинского промышленного района, а также впервые количественная оценка ее масштабов за весь период хозяйственного освоения.

Воркутинский горнодобывающий узел располагается в восточной части Большеземельской тундры вблизи западных отрогов Полярного Урала. Территория представляет собой пологохолмистую ледниково-аккумулятивную равнину, абсолютные отметки междуречий составляют от 170 до 230 м. Глубина вреза наиболее крупных речных долин (Воркута, Юнъяха, Воргашор и пр.) не превышает 50 м, амплитуды высот в пределах междуречий составляют в среднем от 3–4 до 10–12 м. Крутизна поверхности в пределах междуречий не превышает 3–4°, лишь в пределах эрозионной сети увеличиваясь до 60–90°. С поверхности залегают четвертичные отложения (средняя мощность от 20 до 60 м), представленные преимущественно ледниковыми и водно-ледниковыми отложениями среднего плейстоцена [Астахов и др., 2007]. В долинах рек развиты три уровня надпойменных террас, а также современная пойма, сложенные супесчаным и суглинистым аллювием. Подстилающие коренные породы (нижепермские песчаники, аргиллиты, алевролиты, угли; реже – нижнекаменноугольные известняки и доломиты) смяты в складки с углами падения от первых градусов до 60–70°, вскрываются лишь в долинах крупных рек (Воркута, Уса и др.). Мощность угольных пластов в породах нижнепермского отдела составляет до 4,5 м (пласт «Мощный»), в среднем – около 1,5 м [Логинов, Смирнов, 2005]. Район работ расположен в зоне сплошного развития многолетнемерзлых пород, мощность которых составляет от 60 до 120 м. На междуречных поверхностях и речных террасах развит криогенный рельеф – бугры пучения (относительной высотой до 2–3 м, до 10–15 м в поперечнике), термокарстовые котловины (глубиной до 2–3 м, до 300 м в поперечнике), ложбины протаивания. В естественном растительном покрове доминируют кустарнички (карликовая ива, береза, брусника и др.), мхи, лишайники.

Строительству первой шахты для добычи угля предшествовал более чем столетний период поиска и разведки сырья. Первая публикация о находках ископаемого угля на Печоре относится к первой половине XIX века [Деньгин, 1828]. В 1920 г. была организована Северная научно-промысловая экспедиция, отряды которой с 1921 г. вели целенаправленный поиск высококачественных углей в Печорском крае. Результаты этих работ позволили А.А. Чернову в 1924 г. сформулировать вывод о наличии огромного Печорского угольного бассейна [Иевлев, 2014]. В 1931 г. на правом берегу реки Воркуты заложен поселок Рудник и первая угольная штольня [Шабаев и др., 2018а]. В 1937 г. на левом берегу реки Воркуты началось строительство первой шахты (№1 «Капитальная»), рядом с которой возник поселок Воркута, получивший в 1943 г. статус города. До середины XX века добыча воркутинского угля производилась в основном силами заключенных (до 73 тыс. человек, проживавших преимущественно вблизи шахт в барачных лагерях). Окончательный перевод шахт комбината «Воркутауголь» на вольнонаемную силу произошел только в 1960 г. К началу 1990-х гг. в окрестностях Воркуты работало 13 крупных шахт. Их закладывали по кругу на краю угольной залежи (мульды). Рядом выросли поселки: Октябрьский, Северный, Юршор, Промышленный, Воргашор, Строительный, Комсомольский, Заполярный, Советский. В районах поселений была сформирована полноценная инфраструктура (детские и школьные учреждения, поликлиники и др.). Поселки соединила асфальтированная дорога длиной 54 км – Воркутинское кольцо. Упадок в металлургической промышленности, последовавший за распадом СССР, снизил конкурентоспособность воркутинского угля на рынке. Заработная плата сотрудников комбината (позднее – АО) «Воркутауголь» снижалась при сохранении тяжелейших условий труда, связанных с геологическим строением участка добычи (максимальная в России глубина и метаноопасность [Забурдяев, 2016]). В шахтах участились аварии, унесившие жизни десятков шахтеров. В 1990-х гг. было закрыто шесть шахт, в начале 2000-х гг. – еще две, а в 2016 г. после аварии приостановлена добыча угля на шахте «Северной». В последние 30 лет наблюдается стабильная депопуляция ВПР, периферийные его области заселены лишь частично или вовсе заброшены [Антонов и др., 2014]. По состоянию на конец 2019 г. продолжают работу четыре шахты – «Воргашорская», «Комсомольская», «Воркутинская» (бывшая шахта № 1 «Капитальная») и «Заполярная». Кроме действующих шахт, с 2000 г. уголь добывают также в разрезе «Юньягинский» (первое и единственное в мире предприятие, добывающее коксующийся уголь открытым способом за Полярным кругом). Изучение масштаба и типов антропогенной трансформации рельефа района Воркуты важно для понимания механизма влияния горнодобывающей промышленности на естественное развитие рельефа Арктики,

в том числе, в части активизации негативных и опасных геоморфологических процессов.

Материалы и методы исследования. Сведения о хронологии расширения зоны горнодобычи в окрестностях Воркуты получены из опубликованных данных [Дымов и др., 2013; Иевлев, 2014; Шабаев и др., 2018а, 2018б; Barenberg, 2015], а также материалов архива Геологического музея ОАО «Полярноуралгеология» им. К.Г. Войновского-Кригера в Воркуте и МБУК «Централизованная библиотечная система» Воркуты [Муниципальное …, 2020]. Эти материалы использованы при определении времени возникновения очагов освоения и изучении технологических процессов добычи угля в Воркуте. Поскольку целью исследования являлась оценка общей трансформации рельефа за весь период освоения, специальные работы по реконструкции хронологии роста очагов воздействия не проводились. Для получения данных о строении современного естественного и антропогенного рельефа ВПР, а также сопутствовавшей освоению трансформации геоморфологических процессов, осенью 2019 г. были выполнены полевые геоморфологические исследования, включавшие крупномасштабную геоморфологическую съемку, а также аэрофотосъемку территории с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА). В ходе полевых работ были обследованы все существующие участки трансформации рельефа в связи с антропогенным освоением (ликвидированные шахты, золоотвалы ТЭЦ, территории населенных пунктов, дорожная сеть, карьеры, свалки ТБО и др.), за исключением территории действующих шахт (их описание и оценка морфологических параметров выполнены по космическим снимкам и с использованием цифровой модели рельефа [Arctic DEM Explorer, 2020] с разрешением 2 м). В ходе описания участков антропогенной трансформации рельефа фиксировалось местоположение и морфология антропогенных форм (длина, ширина, глубина, высота, крутизна и др.), их соотношение с исходным рельефом местности, геоморфологические процессы (естественные и антропогенно спровоцированные) как в пределах антропогенных форм, так и в их окрестностях, состав антропогенных отложений.

Для детального исследования морфологии и оценки объемов отдельных крупных антропогенных форм рельефа выполнена съемка территории с помощью БПЛА вертолётного типа DJIPhantom 3 Advanced на девяти ключевых участках: на ликвидированных шахтах «Центральная», «Юршор», № 20, № 25; в южной части Юньягинского угольного разреза, на двух карьерах по добыче ПГС и действующем карьере по добыче щебня, а также на заброшенном участке геологоразведки.

Полученные материалы полевых исследований и анализ данных дистанционного зондирования использованы для расчета объемов антропогенных форм рельефа, определения площадей, занятых разными видами форм и воздействий, а также создания не имевшей аналогов ранее среднемасштабной (1:280 000) карты антропогенной трансформации рельефа Воркутинского промышленного района.

Результаты исследования и их обсуждение. Горнопромышленное освоение окрестностей Воркуты практически никак не вписывалось в естественный рельеф территории: шахты и их инфраструктура располагались в соответствии со структурными особенностями положения полезных толщ (пластов угля), а прочие здания и сооружения (зоны жилой застройки, промышленные комплексы, в частности обогатительные фабрики) располагались по соседству. Антропогенное воздействие на рельеф территории можно разделить на **прямое** (создание антропогенных форм, изменение естественных форм рельефа) и **косвенное** (изменение условий развития рельефа и, как следствие, геоморфологических процессов). Прямые антропогенные трансформации в районе работ можно разделить на *аккумулятивные* (преобладает создание положительных форм рельефа, сложенных антропогенными отложениями) и *денудационные* (в основном создание отрицательных форм рельефа путем изъятия грунтов). В таблице приведена характеристика участков развития разных типов трансформаций и примеры созданных в их результате антропогенных форм.

Общая площадь участков, затронутых антропогенной трансформацией рельефа в пределах Воркутинского промышленного района, составляет почти 144 км^2. Эта величина сопоставима с площадью таких городов, как Кострома или Нефтекамск, и в пять раз больше площади Воркуты. Наблюдается традиционное соседство ареалов прямой и косвенной трансформации рельефа: как правило, области изменения условий развития рельефа (растительного покрова, гидрогеологических условий и пр.) обрамляют очаги прямого воздействия. Прямые аккумулятивные трансформации развиты существенно шире денудационных (рис. 1), т. к. создаваемые денудационные формы находятся под поверхностью земли на значительных глубинах. От всей площади, рельеф которой затронут антропогенным освоением (14 356 га), 55% (7 904 га) приходится на участки прямой трансформации (площадь всех антропогенных форм) и 45% – на участки косвенной трансформации (6 452 га, из них 3 510 га – это заброшенные в настоящее время сельскохозяйственные угодья).

Преобладает прямая аккумулятивная трансформация рельефа (насыпи в пределах селитебных территорий, отвальные поля шахт, дорожные насыпи и пр.) (рис. 2, 3), в ходе которой сформированы огромные объемы антропогенных отложений (около 418 млн м^3). Если общий объем антропогенных отложений Воркутинского промышленного района равномерно распределить по площади Москвы в пределах МКАД, то он покроет ее слоем толщиной почти 50 см. Около 60% всего этого объема приходится на отвалы шахт и Юньягинского угольного разреза, 26% сосредоточено в насыпях под населенными пунктами. Отвалы угольных шахт Воркуты, ЦОФ «Печорская» и Юньягинского угольного разреза – крупнейшие по площади и объему формы антропогенного рельефа в Большеземельской тундре. Крупные отвалы (т. н. отвальные поля)

Таблица

Типы антропогенных трансформаций рельефа Воркутинского горнодобывающего района и участки их распространения

Участки распространения	Характерные антропогенные формы рельефа и их морфология (для прямых трансформаций), характерные геоморфологические процессы (для косвенных трансформаций)	Слагающие техногенные отложения	Площадь, га	Объем, тыс. м^3
Прямые аккумулятивные трансформации				
Окрестности действующих шахт («Воргашорская», «Комсомольская», «Воркутинская», «Заполярная»), ЦОФ «Печорская», а также временно закрытой шахты «Северная»	Отвалы вскрышных пород высотой до 40 м (в среднем около 15 м)	Щебень, дресва, мелкие глыбы (алевролиты, аргиллиты и глинистые сланцы, песчаники)	598	89 699
	Отсыпки под промышленные комплексы шахт и отвалы вскрышных пород высотой в среднем около 4–6 м		556	27 824
Ликвидированные шахты	Отвальные поля высотой до 10–12 м на территории ныне разрушенных промышленных комплексов (в теле отвалов – остовы зданий) и в их окрестностях	Щебень, дресва, мелкие глыбы (алевролиты, аргиллиты и глинистые сланцы, песчаники), обломки кирпича и железобетонных конструкций, остовы разрушенных зданий	321	25 679
Территории ТЭЦ и их окрестности	Золоотвалы, вытянутые в плане, со ступенчатым профилем, отражающим их послойное формирование, высотой до 15 м	Зола, суглинки и глины с примесью дресвы, оградительные дамбы сложены щебнем и дресвой	65	6 495
	Золоотвалы изометричной в плане формы высотой до 5 м	Зола, суглинки и глины с примесью дресвы	120	5 993
Автомобильные дороги	Насыпи асфальтированных автодорог с двумя и более полосами движения, высотой в среднем 2,5–3,0 м, шириной по подошве 16–18 м	Щебень и дресва (известняки, доломиты, алевролиты, песчаники, аргиллиты)	255 (общая протяженность – 150 км)	5 742
	Насыпи асфальтированных автодорог и дорог с улучшенным покрытием (щебень, дресва) с двумя полосами движения, высотой в среднем 1,5–2,0 м, шириной по подошве 10–12 м		309 (общая протяженность – 281 км)	4 298
	Насыпи автодорог с улучшенным покрытием (щебень, дресва, песок), высотой в среднем до 1,0 м, шириной по подошве 6–8 м		185 (общая протяженность – 265 км)	1 587
Железные дороги (действующие и заброшенные)	Насыпи высотой до 4–5 м, ширина по подножью до 18 м	Щебень с примесью дресвы (известняки, доломиты)	*Действующие:* 193 га (общая протяженность – 121 км) *Заброшенные:* 33 га (общая протяженность – 21 км)	6 352
Селитебные территории (город, поселки и пр.)	Насыпи под крупными населенными пунктами (в т. ч., г. Воркута) высотой 3–5 м	В основном щебень и дресва (известняки, доломиты, песчаники), реже (обычно в нежилых зонах) – щебень аргиллитов, алевролитов, глинистых сланцев, ПГС (в виде прослоев в теле насыпей)	2 497	58 172
	Насыпи под небольшими населенными пунктами, площадками городской инфраструктуры, ТЭЦ, складскими комплексами и пр. высотой до 3 м		1 455	49 939
Свалки ТБО	Два изометричных в плане отвала с выровненной вершинной поверхностью	Бытовой мусор	40	1 406
Отвалы Юньягинского угольного разреза	Крупнейшие отвальные поля на изучаемой территории, высота до 40 м (в среднем около 15 м)	Щебень, дресва (аргиллиты, глинистые сланцы), супеси, валуны и галька метаморфических пород	898	134 576
Прямые денудационные трансформации				
Участки добычи ископаемых	Карьеры-прорези по добыче угля (Юньягинский) вытянутой вдоль простирания угольного пласта формы, глубиной до 50 м	В бортах вскрываются четвертичные суглинисто-супесчаные отложения с валунами и галькой, аргиллиты, глинистые и углифицированные сланцы, песчаники	355	71 110
	Карьеры по добыче щебня карбонатных пород (известняка, доломита) глубиной до 35 м	В бортах вскрываются карбонатные коренные породы, перекрытые четвертичными отложениями, днища заполнены водой		
	Карьеры по добыче песчано-гравийных смесей глубиной до 25 м	В бортах вскрываются песчано-гравийные и песчано-галечные толщи, супеси с валунами и галькой, днища местами заполнены водой		

Продолжение табл.

Участки распространения	Характерные антропогенные формы рельефа и их морфология (для прямых трансформаций), характерные геоморфологические процессы (для косвенных трансформаций)	Слагающие техногенные отложения	Площадь, га	Объем, тыс. м^3
Окрестности шахт и карьеров	Каналы дренажные глубиной до 5 м, шириной по бровкам до 30–35 м	Используются для отвода поверхностных и подземных вод с территорий шахт и карьеров, местами – для переброски стока рек (например, р. Юньяха)	24 (общая протяженность – не менее 12 км)	853
Косвенные трансформации (изменение условий развития рельефа)				
Селитебные территории, ТЭЦ, складские комплексы, производственные предприятия (цементный завод и пр.), свалки	Все населенные пункты, инфраструктурные и прочие сооружения построены на насыпях из крупнообломочного материала. Поверхностный сток организован путем создания поверхностных и подземных дренажей. Как следствие – полностью изменен ход криогенных процессов (ведущий из них в настоящее время – криогенное выветривание, местами – малоамплитудное пучение, не приводящее к образованию форм рельефа). Развитие флювиальных и склоновых процессов в долинах рек не претерпело значительных изменений, в малых эрозионных формах активизировались склоновые процессы (на участках застройки и свалок).		Общая площадь зоны воздействия селитебного и сопутствующего воздействия составляет не менее 4 200 га (около 3 950 га приходится на участки прямой трансформации, не менее 250 га – исключительно косвенной трансформации)	
Территории шахт, вентиляционных шахт, ЦОФ и их окрестности	Все промышленные сооружения построены на насыпях. Поверхностный сток организован путем создания поверхностных и подземных дренажей. Как следствие – полностью изменен ход криогенных процессов (ведущий из них в настоящее время – криогенное выветривание, местами – малоамплитудное пучение, не приводящее к образованию форм рельефа). В ближайших окрестностях шахт (в т.ч. отвальных полей) и ЦОФ (в радиусе не более километра, в среднем – до 300 м) местами наблюдается активизация процессов термокарста и заболачивания		Общая площадь зоны воздействия процессов шахтной горнодобычи и обогащения сырья составляет не менее 2 000 га (из них около 1 400 га – участки прямой трансформации, не менее 600 га – косвенной трансформации)	
Участки открытой добычи (угля, ПГС и пр.)	На территории Юньягинского угольного разреза полностью изменено направление стока р. Юньяха, долина вовлечена в район добычи, сток переброшен в дренажный канал, огибающий участок разработки с востока. Повсеместно между крупными отвальными полями – термокарст, заболачивание, а местами и затопление. В районах добычи ПГС и карбонатных пород на прилегающих территориях существенных изменений геоморфологических процессов нет, однако в самих карьерах получили развитие процессы, не характерные для территории: обвалы, осыпи, линейная эрозия временных водотоков		Общая площадь зоны воздействия открытой горнодобычи составляет не менее 1 580 га (из них около 1 200 га – участки прямой трансформации, не менее 380 га – косвенной трансформации)	
Участки прокладки дорог	Повсеместно у подножья насыпей (чаще всего, выше насыпи на склоне, где она проложена) наблюдается заболачивание, постоянное подтопление (даже при крутизне поверхности менее 2°). Ширина зоны воздействия для крупных автодорог составляет местами до 50 м, для прочих – менее 10 м. На участках перехода дорог через долины рек, ручьев и ложбины выше перехода днище заболочено, местами затоплено		Общая площадь зоны воздействия дорожной сети составляет не менее 2 050 га (из них около 1 075 га – участки прямой трансформации, не менее 975 га – косвенной трансформации, в т. ч. около 100 га – участки наезженных тракторных колей в тундре)	
Участки прокладки трубопроводов (водопроводов, пульпопроводов надземным способом, газопроводов подземным способом)	Практически повсеместно вдоль трасс (и на притрассовых грунтовых дорогах) – активизация термокарстовых процессов, заболачивание, местами затопление		Общая площадь зоны воздействия трубопроводного транспорта составляет не менее 700 га (из них зона воздействия магистрального газопровода Бованенково–Ухта – 453 га)	
Кладбища	Снижение интенсивности криогенных процессов в связи с выравниванием территории (без отсыпки, в основном, путем перемещения материала на месте), снижение интенсивности заболачивания		Общая площадь зоны воздействия составляет около 37 га	
Территории бывших колхозов и совхозов	Сведение кустарничковой растительности, выпас скота, организация дренажа, выравнивание и вспашка (в прошлом) привели к снижению интенсивности криогенных процессов, главным образом, термокарста. Ведущий процесс в настоящее время – криогенное выветривание, малоамплитудное пучение. В составе растительности доминируют травянистые виды, что дополнительно способствует снижению обводненности грунтов, а также интенсивности криогенного пучения		Общая площадь зоны воздействия составляет около 3 510 га, в т. ч. 311 га – бывшие участки овощеводства	

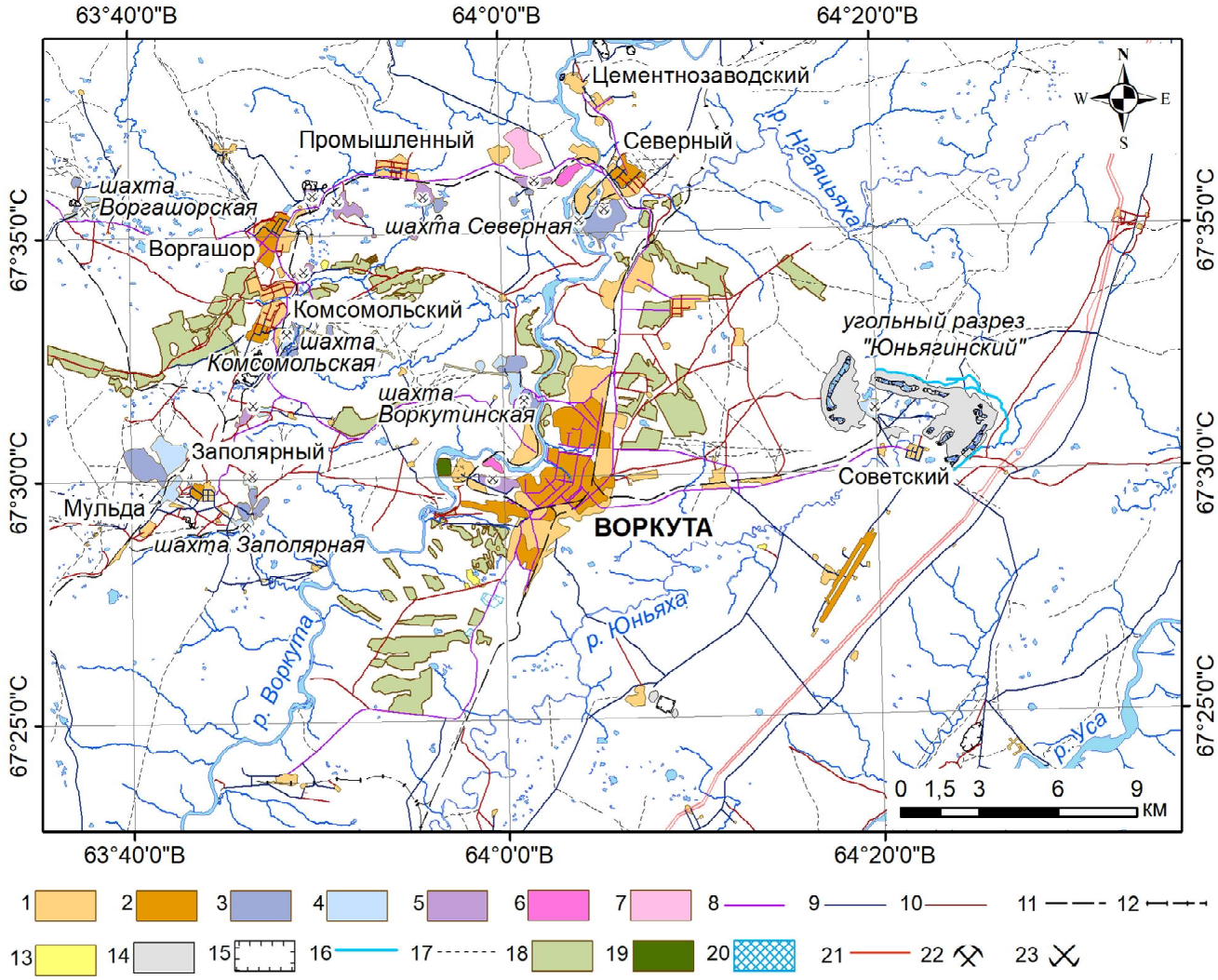

Рис. 1. Антропогенная трансформация рельефа Воркутинского промышленного района. *Условные обозначения.* **I. Аккумулятивный антропогенный рельеф:** 1 – отсыпки большой площади под населенными пунктами (средняя мощность <3 м); 2 – отсыпки большой площади в населенных пунктах (средняя мощность 3–5 м); 3 – отвальные поля шахт высотой >5 м; 4 – отвальные поля шахт высотой <5 м (в т.ч. под инфраструктуру и сооружения); 5 – отвальные поля ликвидированных шахт (высотой >5 м; внутри – остовы зданий); золоотвалы ТЭЦ: 6 – высотой >5 м; 7 – высотой <5 м; насыпи автодорог: 8 – высотой >2 м, шириной по подошве 16–18 м; 9 – высотой <2 м, шириной по подошве 10–12 м; 10 – высотой <2 м, шириной по подошве 6–8 м; 11 – насыпи действующих железных дорог; 12 – насыпи заброшенных железных дорог; 13 – полигон складирования ТБО; 14 – отвалы карьеров Юньягинского угольного разреза. **II. Денудационный антропогенный рельеф:** 15 – карьеры; 16 – дренажные каналы; 17 – тракторные колеи в тундре. **III. Участки косвенной трансформации:** 18 – земли бывших колхозов; 19 – заброшенные участки овощеводства; 20 – кладбища; 21 – трассы газопроводов. *Прочие обозначения:* 22 – действующие шахты; 23 – недействующие (в т.ч. ликвидированные) шахты

Fig. 1. Anthropogenic relief transformation in the Vorkuta industrial region. Symbols: **I) Accumulative anthropogenic relief:** 1 – large dumps under settlements (average thickness <3 m); 2 – large dumps within settlements (average thickness 3 to 5 m); 3 – mine dump fields over 5 m high; 4 – mine dump fields less than 5 m high (also under infrastructure and buildings); 5 – dump fields of abandoned mines (over 5 m high; with crushed buildings); ash dumps of the CHPP: 6 – over 5 m high, 7 – less than 5 m high; road embankments: 8 – over 2 m high and 16–18 m wide at the foot, 9 – less than 2 m high and 10–12 m wide at the foot, 10 – less than 2 m high and 6–8 m wide at the foot; 11 – embankments of operating railways; 12 – embankments of abandoned railways; 13 – solid waste storage landfill; 14 – open pits dumps of the Yun-Yaginsky coal mine. **II) Denudation anthropogenic relief:** 15 – quarries; 16 – drainage channels; 17 – tractor tracks in the tundra. **III) Areas of indirect transformation:** 18 – former collective farms lands; 19 – abandoned of vegetable growing areas; 20 – cemeteries; 21 – gas pipeline routes. *Other symbols*: 22 – actual mines; 23 – inactive (including liquidated ones) mines

достигают по длинной оси 2,5 км на Юньягинском угольном разрезе, 1,5 км на ЦОФ «Печорская» и 1 км на действующих шахтах; высота отвалов – до 40 м (в среднем 15–20 м); крутизна склонов от 20–25 до 35–40°. Слагающие их отложения имеют в основном грубообломочный состав (мелкие глыбы, щебень, дресва) и представляют собой измельченную «пустую» породу, изъятую при проходке подземных выработок. Объемы отдельных отвальных полей, измеренные с высокой точностью по данным съемки БПЛА, составляют первые миллионы кубических метров (в частности, отвалы ликвидированных шахт № 25 – 2,3 млн м^3, № 20 – 2,1 млн м^3, «Центральной» – 3,4 млн м^3). При сооружении отсыпок большой площади и сравнительно малой мощности (в среднем до 5 м) в селитебных зонах были использованы отложения разного возраста и генезиса. До 1960-х гг. (при строительстве Воркуты и

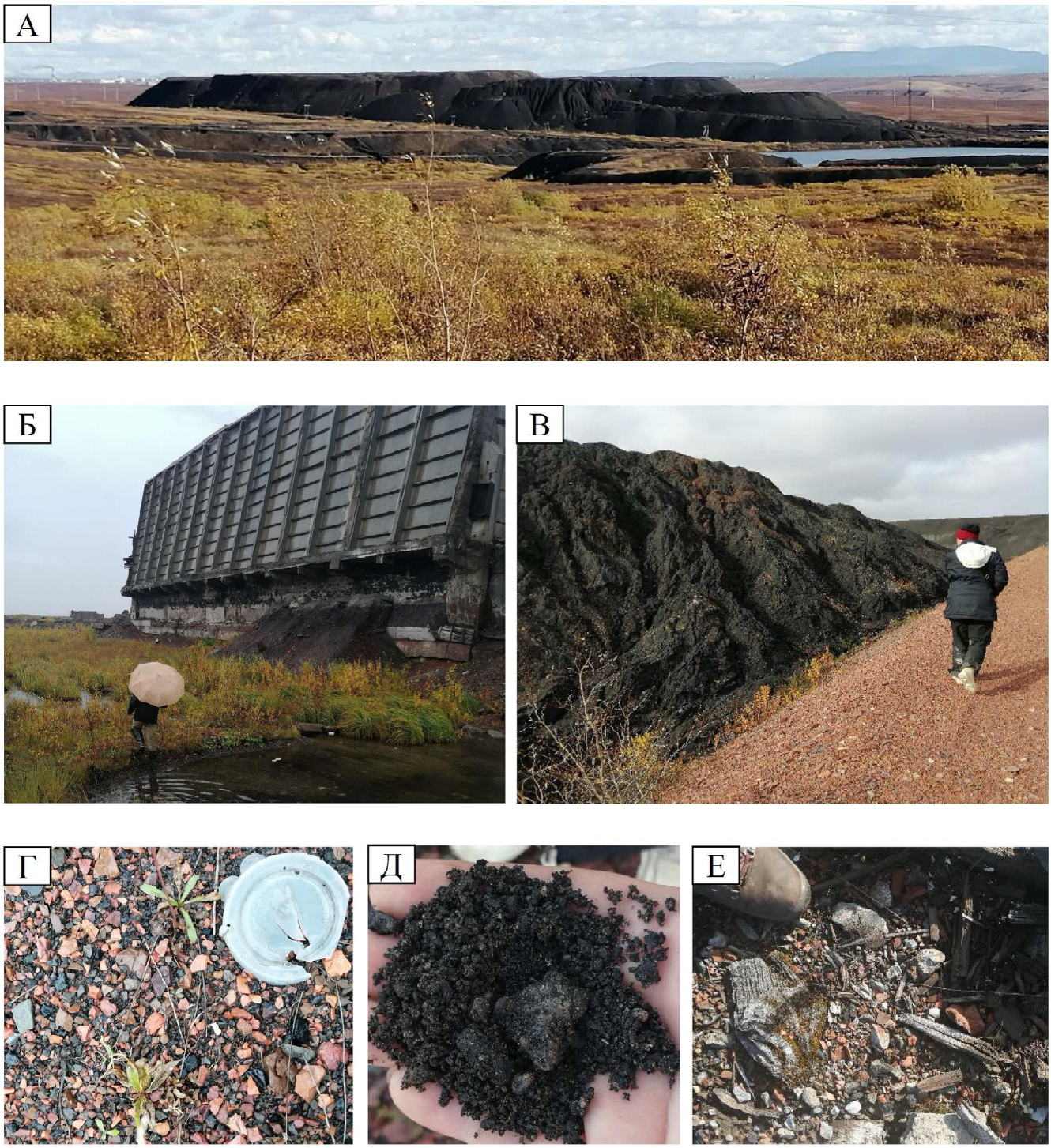

Рис. 2. Антропогенный рельеф и отложения Воркутинского промышленного района: А – общий вид отвальных полей действующей шахты «Заполярная», Б – разрушение заброшенных промышленных сооружений приводит к накоплению новых объемов антропогенных отложений, В – эрозионный бедленд на отвалах временно законсервированной шахты «Северная», Г – наиболее распространенная разновидность антропогенных отложений ВПР (щебень и дресва – продукты дробления скальных пород при проходке подземных выработок), Д – золошлаковые отходы ТЭЦ, Е – состав отложений на участке ликвидации шахты «Южная» (содержание бытового и промышленного мусора – 50% и более)

Fig. 2. Anthropogenic relief and sediments of the Vorkuta industrial region: A – general view of dump fields of the operating Zapolyarnaya mine, Б – destruction of abandoned industrial structures leads to the of new volumes of anthropogenic deposits accumulations, B – erosion badland on the of the temporarily inactive Severnaya minedumps, Г – the most widespread type of anthropogenic deposits (crushed stone and gruss – rock crushing products during underworkings excavation), Д – ash and slag waste from the CHP, E – deposits at the disposal site of the Yuzhnaya mine composition (the content of household and industrial waste is 50% and more)

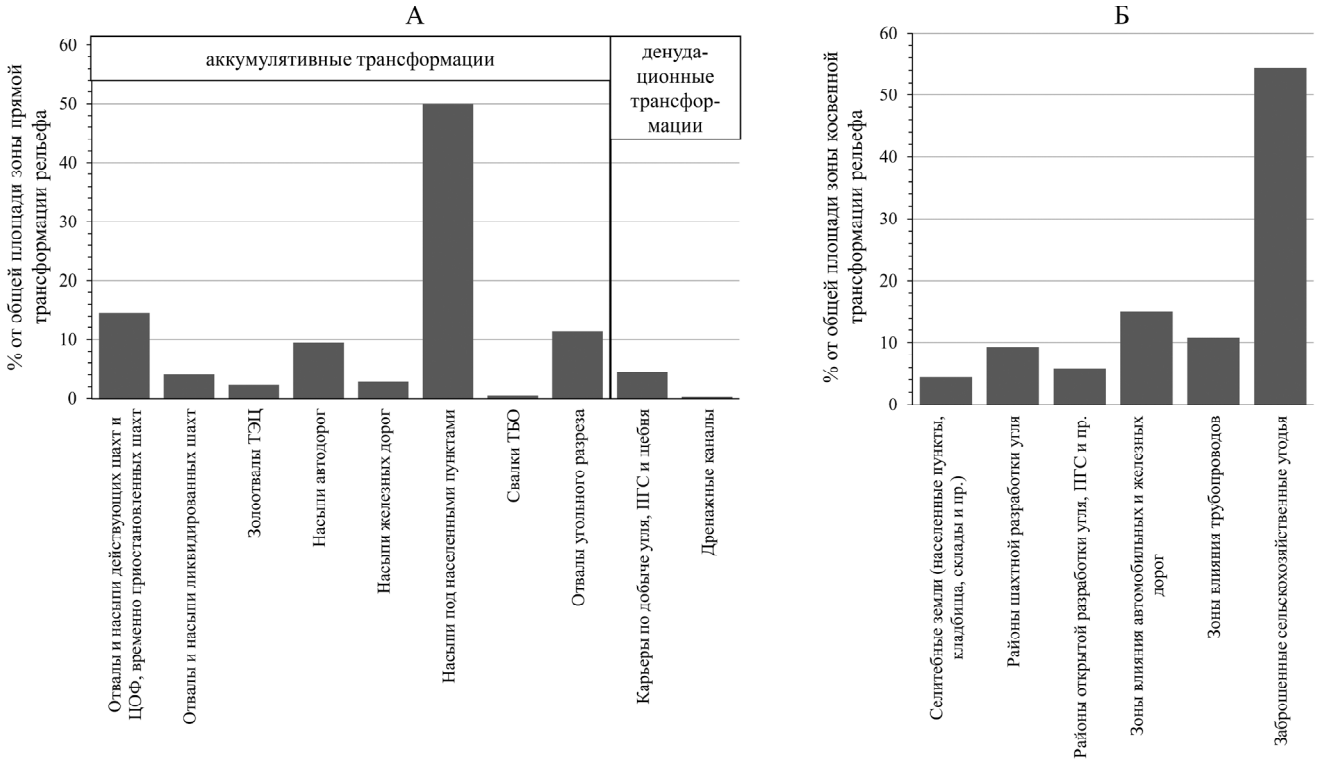

Рис. 3. Виды прямой – А и косвенной – Б трансформации рельефа Воркутинского промышленного района и занимаемые ими площади (в % от общей площади зоны трансформации)

Fig. 3. Types of direct – A and indirect – B relief transformation in the Vorkuta industrial region and their areas (% of the total transformation area)

пос. Северного) насыпи сооружались из песчано-гравийного материала и карбонатного щебня, добытых в окрестных карьерах, позднее использовались и породы, добытые при проходке вертикальных стволов шахт (алевролиты, песчаники и пр.) [Дымов и др., 2013]. В целом на изученной территории встречаются два основных вида антропогенных отложений: **породы природного состава**, вовлеченные в деятельность человека, и **техногенные образования** (новообразованные отложения). В первой группе выделяются два подвида – *перемещенные отложения* (переотложены без изменения литологического состава), к которым относятся, прежде всего, песчано-гравийные смеси (ПГС) и *преобразованные отложения* (продукты дробления скальных пород), абсолютно преобладающие по площади распространения и объему в пределах ВПР. К техногенным относятся образованные в результате деятельности человека материалы, не имеющие природных аналогов (шлаки, зола, шлам, кирпич, бетон, металлические конструкции, бытовой мусор и др.).

На участки прямой денудационной трансформации рельефа приходится менее 5% от площади всех антропогенных форм, суммарный объем карьеров и прочих выемок составляет около 72 млн м^3. Объемы крупнейших карьеров, измеренные с высокой точностью по данным съемки БПЛА, составляют 3,8 млн м^3 (карьер по добыче ПГС в районе устья р. Воргашор, около 700 м в поперечнике, глубина до 20 м) и 3,7 млн м^3 (карьер по добыче карбонатного щебня к юго-востоку от Воркуты, 600 м в поперечнике, глубина до 35 м). Объем карьеров в пределах Юньягинского угольного разреза составляет около 57 млн м^3 при средней их длине около 1,5 км и глубине до 50 м. Таким образом, доля отрицательных форм составляет по площади 1/20, в то время как по объему – около 1/6 от всех антропогенных форм на территории, что связано со спецификой разрабатываемых карьеров (преобладают узкие карьеры-прорези, ориентированные вдоль угольных пластов).

В пределах антропогенных форм рельефа протекают геоморфологические процессы, набор которых определяется, прежде всего, крутизной поверхности и литологическим составом слагающих пород. Состав насыпных грунтов в подавляющем большинстве случаев принципиально отличается от такового для поверхностных отложений, присущих данной территории в естественном состоянии (ледниковые и водно-ледниковые суглинки, супеси, глины с галькой и гравием). В составе антропогенных отложений преобладают щебень и дресва (алевролитов, аргиллитов, глинистых и углефицированных сланцев, песчаников), крайне редко – пески, супеси и суглинки. Как следствие, для участков насыпей и отвальных полей отмечается изменение спектра присущих криогенных процессов, выражающееся, прежде всего, в прекращении процессов многолетнего пучения с образованием бугров, термокарста, солифлюкции. Ведущими на вершинных поверхностях отвалов становятся процессы криогенного вы-

ветривания, местами – образования криогенного микрорельефа (пятна-медальоны). На плоских вершинных поверхностях золоотвалов вследствие сброса пульпы ТЭЦ развивается линейная эрозия, приводящая к формированию широких (до 5–7 м) меандрирующих русел глубиной до 2 м. На склонах отвальных полей и насыпей протекают эрозионные процессы (образование борозд и рытвин, реже – оврагов), наибольшего размаха достигающие на склонах золоотвалов и карьеров по добыче ПГС. На незаросших склонах отвальных полей и карьеров крутизной 30–40° протекают обвально-осыпные процессы и оползание. В днищах карьеров развивается затопление. На поверхностях отвальных полей и в днищах карьеров по добыче ПГС местами развиваются эоловые процессы. Насыпи линейных сооружений на значительном протяжении испытывают деформации криогенной природы (в основном это касается автомобильных дорог) на участках перехода через термокарстовые котловины, ложбины, неглубокие долины рек и ручьев. Многие из перечисленных процессов получили широкое развитие на изучаемой территории в основном в результате антропогенного воздействия (к примеру, гравитационные склоновые и эоловые процессы) и развиты практически исключительно в пределах комплекса антропогенного рельефа.

Наиболее опасным природным процессом, который протекает в пределах некоторых крупных отвалов, является, без сомнения, самовозгорание. Очаги самовозгорания возникают, прежде всего, из-за неправильной планировки отвалов [Zasterova et al., 2015], обеспечивающей свободный доступ кислорода и процессов окисления угля. На вероятность самовозгорания влияют также температура окружающей среды, влажность породных отвалов, наличие минеральных примесей и др. [Гамов, Гордеев, 2017]. Под воздействием высоких температур (800–1200°C) происходит разложение минеральной части и углистых частиц с выделением CO, CO_2, NO_x, SO_2 и других газов, а также углеводородов [Goswami, 2015]. Горячий газ, насыщенный продуктами разложения пород, по трещинам в отвале поднимается к поверхности. Здесь происходит уменьшение температуры и давления, что приводит к осаждению веществ в составе водяных паров, обусловливающее подкисление среды в верхней части горящего участка до 3,1 единиц pH [Брагина, 2014]. Процесс самовозгорания, в частности, парение поверхности и выходы горячего газа (в том числе с образованием фумарол) отмечены на отвальных полях ликвидированных шахт № 20, № 25 и «Южная».

В сравнении с угольными отвалами Кузбасса и Донбасса, отвальные поля Воркуты в целом характеризуются ограниченными возможностями к самовозгоранию. Препятствуют активному протеканию этого процесса мелкообломочный состав техногенных грунтов (снижен доступ кислорода), низкие среднегодовые температуры воздуха, компактность отвальных полей (в данном случае, крупные отвалы предпочтительнее небольших, так как доступ кислорода со стороны склонов отвала ограничен). Тем не менее, обнаруженные на поверхности признаки самовозгорания указывают на то, что в толще отвалов могут существовать полости, образованные в результате этого процесса. Самовозгорание угольных отвалов опасно возможностью провалов, взрывов, распространением пожаров на прилегающей территории, а также поступлением газов (CO_2, NO_x, SO_2, H_2S) в атмосферу. Установлено, что в пределах ВПР вклад отвалов в загрязнение атмосферы в случае самовозгорания особенно велик по сероводороду [Коршунова, 1999].

Косвенная трансформация рельефа в районах освоения ВПР выражается, прежде всего, в изменении спектра и интенсивности геоморфологических процессов на территориях, соседствующих с районами прямой трансформации, вследствие нарушения растительного покрова, изменения гидрогеологических условий, режима мерзлых толщ и пр. Среди участков косвенного воздействия наибольшие площади занимают территории бывших колхозов (54% от площади всей зоны косвенной трансформации, см. рис. 3), где естественный растительный покров был изменен в результате выпаса скота и распашки. Здесь отмечается снижение интенсивности криогенных процессов, главным образом, термокарста. В составе растительности доминируют травянистые виды, что дополнительно способствует снижению обводненности грунтов, а также интенсивности криогенного пучения. В притрассовых полосах линейных сооружений и вблизи крупных ареалов горнодобычи наблюдается, напротив, существенная активизация термокарста и солифлюкции, подтопления и заболачивания. Таким образом, прямая трансформация рельефа привела к усложнению условий освоения прилегающих территорий в результате активизации негативных и опасных геоморфологических процессов. В целом в пределах территории ВПР вследствие освоения возросла площадь развития гравитационных и оползневых процессов, делювиального смыва, линейной эрозии в малых эрозионных формах, а также эоловых процессов. Площадь ареалов термокарста и многолетнего пучения с образованием бугров снизилась, так как в районах прямой и, отчасти, косвенной (на заброшенных сельскохозяйственных землях) трансформации эти процессы практически не развиты.

Впервые выполненная на основе данных геоморфологического картографирования и аэрофотосъемки количественная оценка последствий антропогенного освоения ВПР с точки зрения развития рельефа подтверждает мнение о преобладании прямого воздействия на рельеф над косвенным в районах активной горнодобычи в Арктике [Бредихин и др., 2020]. При этом обследованный район является примером территории, где освоение недр, начатое в 1930-х гг., до сих пор продолжается, и объемы добычи в последние десять лет постепенно растут, что приводит к продолжающемуся расширению области антропогенной трансформации

рельефа. Иная тенденция наблюдается вне действующих шахт, где созданные породные отвалы и насыпи вовлекаются в естественный ход природных процессов – зарастают травянистой и кустарничковой растительностью, склоны их постепенно выполаживаются, вследствие физического и химического выветривания на поверхности формируется элювий. На заброшенных территориях, где мощность насыпей изначально была невелика, наблюдаются криогенные деформации, формируются мерзлотные формы рельефа (полигональная сеть морозобойных трещин, бугры пучения, термокарстовые котловины и пр.).

Выводы:

– на территории Воркутинского промышленного района с 1930-х гг. наблюдается продолжающаяся существенная антропогенная трансформация рельефа, связанная с освоением угольного месторождения и сопутствующим развитием инфраструктуры. В пределах территории выделены участки преобладающей *прямой* (создание антропогенного рельефа, около 79 км^2) и *косвенной* (изменение условий рельефообразования, спектра и интенсивности геоморфологических процессов, около 65 км^2) трансформации рельефа;

– среди прямых антропогенных трансформаций рельефа по площади и объемам перемещенного вещества преобладают аккумулятивные. Общая площадь созданных положительных форм составляет 75,2 км^2, объем – 417,8 млн м^3. Прямые денудационные трансформации значительно уступают по площади (3,8 км^2) и объему перемещенного материала (72 млн м^3). Косвенные трансформации рельефа выражаются в изменении спектра и интенсивности геоморфологических процессов, прежде всего, мерзлотных, склоновых и флювиальных;

– в составе антропогенных отложений ВПР абсолютно преобладают по площади распространения и объемам т. н. *преобразованные* породы – продукты дробления скальных, в том числе углесодержащих пород, изъятые при проходке подземных выработок. Наибольшие объемы антропогенных отложений сосредоточены в отвальных полях шахт, ЦОФ «Печорская» и Юньягинского угольного разреза (в сумме – до 66% от всего объема), а также в насыпях под населенными пунктами (до 26%). Следствием создания рельефа с отличным от естественного геологическим строением стало общее снижение площади ареалов термокарста и пучения в пределах ВПР, в то время как гравитационные и эрозионные процессы, напротив, стали развиты более широко;

– наиболее опасным природным процессом, развитым в пределах отвальных полей действующих и ликвидированных шахт, является самовозгорание. Несмотря на перспективные возможности использования отвальных полей колоссального размера (к примеру, для развития лыжно-саночных видов спорта) и низкую в сравнении с районами Кузбасса и Донбасса активность процесса самовозгорания, последний, тем не менее, представляет собой фактическую опасность и переводит эти территории в разряд непригодных для использования;

– хозяйственное освоение территории ВПР не сопровождается угрожающей активизацией опасных геоморфологических процессов вне участков прямого воздействия. Негативные последствия (активизация термокарста, пучения и пр.) имеют в целом ограниченное распространение и, скорее, усложняют освоение прилегающих территорий, а фактический ущерб значим, прежде всего, для линейных транспортных сооружений. При сохранении существующего режима природопользования и социально-экономической обстановки в регионе следует ожидать, с одной стороны, расширения площади зоны прямой антропогенной трансформации рельефа, с другой – прогрессирующей переработки антропогенных форм (особенно в заброшенных поселках, на ликвидированных шахтах и пр.) естественными геоморфологическими процессами.

Благодарности. Исследования выполнены Еременко Е.А., Фузеиной Ю.Н. и Бредихиным А.В. за счет средств проекта РФФИ № 18-05-60200, аэрофотосъемка территории с использованием БПЛА выполнена Ворошиловым Е.В. в рамках темы госзадания № АААА-А16-11632810089-5 «Эволюция природной среды, динамика рельефа и геоморфологическая безопасность природопользования».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Антонов Е.В., Денисов Е.А., Ефремова В.А., Фаддеев А.М. Современные проблемы развития убывающих городов на северо-востоке Республики Коми // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2014. № 2. С. 55–61.

Астахов В.И., Мангеруд Я., Свенсен Й.И. Трансуральская корреляция верхнего плейстоцена Севера // Региональная геология и металлогения. 2007. № 30–31. С. 190–206.

Брагина П.С. Самовозгорание угольных отвалов в Кемеровской области // Природа и экономика Кемеровской области и сопредельных территорий. 2014. № 4(29). С. 23–31.

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

Гамов М.И., Гордеев И.В. Основные факторы и экологические последствия самовозгорания отвалов угольных шахт Восточного Донбасса // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2017. № 2. С. 92–100. DOI: 10.23683/0321-3005-2017-2-92-100.

Деньгин А. Сведения о реке Печоре // Отечественные записки. 1828. Ч. 36. С. 349–379.

Дымов А.А., Каверин Д.А., Габов Д.Н. Свойства почв и почвоподобных тел г. Воркута // Почвоведение. 2013. № 2. С. 240–248. DOI: 10.7868/S0032180X13020032.

Забурдяев В.С. Категории опасности угольных шахт по метану // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № S1. С. 300–314.

Иевлев А.А. Ухтинская экспедиция ОГПУ: старт промышленного освоения недр Печорского края // Арктика и Север. 2014. № 16. С. 91–115.

Коршунова Л.М. Оценка техногенных нагрузок на природную среду предприятиями угольной промышленности г. Воркуты // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 1999. № 7. С. 161–163.

Логинов А.В., Смирнов М.И. Воркута – северный форпост угольной промышленности России // Горная промышленность. 2005. № 1(59). С. 8–11.

Северьянова Е.Н. Эколого-геохимическая характеристика почвенного покрова в зоне деятельности угледобывающего предприятия на примере города Воркуты республики Коми // Альманах современной науки и образования. 2015. № 10(100). С. 127–129.

Шабаев Ю.П., Жеребцов И.Л., Лабунова О.В. Культурная эволюция заполярного города: от города-концлагеря к городу-призраку (часть 1) // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2018а. № 2(34). С. 78–88.

Шабаев Ю.П., Жеребцов И.Л., Лабунова О.В. Культурная эволюция заполярного города: от города-концлагеря к городу-призраку (часть II) // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2018б. № 3(35). С. 88–92.

Barenberg A. The GULAG in Vorkuta: beyond space and time. *Laboratorium*, 2015, vol. 1, p. 92–108.

Goswami S. Impact of coal mining on environment. *European Researcher*, 2015, vol. 92, iss. 3, p. 185–196. DOI: 10.13187/er.2015.92.18.

Zasterova P., Marschalko M., Niemiec D., Durd'ak J., Bulko R., Vlček J. Analysis of possibilities of reclamation waste dumps after coal mining. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2015, vol. 15, p. 656–662. DOI: 10.1016/j.proeps.2015.08.077.

Электронные ресурсы

Муниципальное бюджетное учреждение культуры «Централизованная библиотечная система» г. Воркуты. URL: http://www.vorkuta-cbs.ru/ (дата обращения 20.07.2020).

Arctic DEM Explorer. URL: https://livingatlas2.arcgis.com/arcticdemexplorer/ (дата обращения 20.07.2020).

Поступила в редакцию 25.07.2020
После доработки 15.08.2020
Принята к публикации 25.08.2020

E.A. Eremenko[1], Y.N. Fuzeina[2], M.V. Vlasov[3], E.V. Voroshilov[4], A.V. Bredikhin[5]

ANTHROPOGENIC TRANSFORMATION OF RELIEF IN VORKUTA INDUSTRIAL REGION

Anthropogenic transformation of relief within the Vorkuta industrial region during 90 years of economic development was for the first time quantitatively evaluated. Areas of predominantly direct (creation of anthropogenic relief) and indirect (change in the conditions of relief formation, spectrum and intensity of geomorphologic processes) transformation of relief are identified. About 25% (144 km^2) of the entire area of the region are under anthropogenic landforms (79 km^2), or with a significant change in the natural course of geomorphologic processes (65 km^2). Among the direct anthropogenic transformations of relief accumulative ones, i.e. the creation of positive forms of anthropogenic relief (dumps, embankments, etc.), prevail in terms of area and volumes of displaced matter; their total area is 75,2 km^2 and the volume is 417,8 million m^3.

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Palaeogeography, Associate Professor, PhD in Geography; *e-mail*: eremenkoeaig@gmail.com

[2] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Palaeogeography, Associate Professor, PhD in Geography; *e-mail*: donaldw@bk.ru

[3] FRECOM Ltd, eading Specialist, PhD in Geography; *e-mail*: vlasov-maxim@mail.ru

[4] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Palaeogeography, undergraduate student; *e-mail*: voroshilov@yahoo.com

[5] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Palaeogeography, Head of Department, Professor, D.Sc. in Geography; *e-mail*: avbredikhin@yandex.ru

About 30% of the area of all positive anthropogenic forms and 66% of their volume are mine dumps. Direct denudation transformations (creation of quarries, canals, etc.) are significantly smaller in area (3,8 km^2) and the volume of displaced material (72 million m^3). Indirect transformations of relief take place in the immediate vicinity of the zones of direct transformations (up to 1 km, mainly within 200 m). They include the changes in the spectrum and intensity of geomorphologic processes (primarily permafrost, slope and fluvial) due to disruption of the continuity of vegetation cover, changes in the hydrogeological regime, heat balance of permafrost, etc. The anthropogenic deposits are mainly the products of rock crushing including the coal-bearing rocks withdrawn during the excavation of underground workings. The largest volumes of anthropogenic sediments are concentrated in the dump fields of mines, the Pechorskaya Central Processing Plant and the Yun-Yaginsky open coal mine (up to 66% of the total volume), as well as in the embankments under settlements (up to 26%). Slope, erosion and aeolian processes which are rather marginal under natural conditions, have developed within the areas of anthropogenic relief; the spectrum of cryogenic processes has been changed there: the cryogenic weathering has become a leading process, while on the contrary, heaving and thermokarst are practically absent. The spontaneous combustion is the most dangerous geomorphologic process within the dump fields of operating and abandoned mines. The recorded signs of pyrolysis, e. g. surface hovering, release of hot gases and solutions, fumaroles, subsidence of the dump surface etc., indicate possible existence of large cavities and cracks in the dump body.

Key words: waste dumps, quarries, coal mining, man-made grounds

Acknowledgements. The studies of E.A. Eremenko, Y.N. Fuzeina and A.V. Bredikhin were financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-05-60200). Aerial photography of the territory using UAVs was carried out by E.V. Voroshilov under the theme of state assignment no. AAAA-A16-11632810089-5 «Evolution of natural environment, relief dynamics and geomorphologic safety of nature management».

REFERENCES

Antonov E.V., Denisov E.A., Efremova V.A., Faddeev A.M. Sovremennye problemy razvitiya ubyvayushchih gorodov na severo-vostoke Respubliki Komi [Actual problems of urban shrinkage development in the north-west of the Komi Republic]. *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.,* 2014, no. 2, p. 55–61. (In Russian)

Astahov V.I., Mangerud Ja., Svensen J.I. Transural'skaja korreljacija verhnego plejstocena Severa [Trans-Ural correlation of the Upper Pleistocene of the North], *Regional'naja geologija i metallogenija*, 2007, no. 30–31, p. 190–206. (In Russian)

Barenberg A. The GULAG in Vorkuta: beyond space and time. *Laboratorium*, 2015, vol. 1, p. 92–108.

Bragina P.S. Samovozgoranie ugol'nyh otvalov v Kemerovskoj oblasti [Spontaneous combustion of coal dumps in the Kemerovo region], *Priroda i ekonomika Kemerovskoj oblasti i sopredel'nyh territorij*, 2014, no. 4(29), p. 23–31. (In Russian)

Bredikhin A.V., Eremenko E.A., Kharchenko S.V., Belyaev Ju.R., Romanenko F.A., Bolysov S.I., Fuzeina Yu.N. Rajonirovanie rossijskoj Arktiki po tipam antropogennogo osvoenija i soputstvujushhej transformacii rel'efa na osnove klasternogo analiza [Regionalization of the Russian Arctic according to the types of anthropogenic development and associated relief transformation by applying the cluster analysis], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.,* 2020, no. 1, p. 42–56. (In Russian)

Den'gin A. Svedenija o reke Pechore [Information about the Pechora River], *Otechestvennye zapiski*, 1828, vol. 36, p. 349–379. (In Russian)

Dymov A.A., Kaverin D.A., Gabov D.N. Properties of soils and soil-like bodies in the Vorkuta area, *Eurasian Soil Science*, 2013, no. 2, p. 240–248. DOI: 10.1134/S1064229313020038.

Gamov M.I., Gordeev I.V. Osnovnye faktory i jekologicheskie posledstvija samovozgoranija otvalov ugol'nyh shaht Vostochnogo Donbassa [The main factors and environmental consequences of spontaneous combustion of coal mine dumps in the Eastern Donbass], *Izvestija VUZov. Severo-Kavkazskij region. Estestvennye nauki*, 2017, no. 2, p. 92–100. DOI: 10.23683/0321-3005-2017-2-92-100. (In Russian)

Goswami S. Impact of coal mining on environment. *European Researcher*, 2015, vol. 92, iss. 3, p. 185–196. DOI: 10.13187/er.2015.92.18.

Ievlev A.A. Uhtinskaja jekspedicija OGPU: start promyshlennogo osvoenija nedr Pechorskogo kraja [Ukhta Expedition of the OGPU: the Start of Industrial Exploration of Mineral Resources of the Pechora Region], *Arktika i Sever*, 2014, no. 16, p. 91–115. (In Russian)

Korshunova L.M. Ocenka tehnogennyh nagruzok na prirodnuju sredu predprijatijami ugol'noj promyshlennosti g. Vorkuty [Assessment of technogenic loads of coal industry enterprises on the natural environment in the town of Vorkuta], *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'* (*nauchno-tehnicheskij zhurnal*), 1999, no. 7, p. 161–163. (In Russian)

Loginov A.V., Smirnov M.I. Vorkuta – severnyj forpost ugol'noj promyshlennosti Rossii [Vorkuta – the northern outpost of the coal industry in Russia], *Gornaja promyshlennost'*, 2005, no. 1(59), p. 8–11. (In Russian)

Sever'janova E.N. Jekologo-geohimicheskaja harakteristika pochvennogo pokrova v zone dejatel'nosti ugledobyvajushhego predprijatija na primere goroda Vorkuty respubliki Komi [Ecological-geochemical characteristics of soil covering in the area of coal producers' activity by the example of the city of Vorkuta of the Komi Republic], *Al'manah sovremennoj nauki i obrazovanija*, 2015, no. 10(100), p. 127–129. (In Russian)

Shabaev Ju.P., Zherebcov I.L., Labunova O.V. Kul'turnaja evoljucija zapoljarnogo goroda: ot goroda-konclagerja k gorodu-prizraku (chast' 1) [Cultural evolution of the polar town: from the town – concentration camp to the ghost town (part I)], *Izvestija Komi nauchnogo centra UrO RAN*, 2018, no. 2(34), p. 78–88. (In Russian)

Shabaev Ju.P., Zherebcov I.L., Labunova O.V. Kul'turnaja evoljucija zapoljarnogo goroda: ot goroda-konclagerja k gorodu-prizraku (chast' II) [Cultural evolution of the polar town: from the town – concentration camp to the ghost town (part II)], *Izvestija Komi nauchnogo centra UrO RAN*, 2018a, no. 3(35), p. 88–92. (In Russian)

Zaburdjaev V.S. Kategorii opasnosti ugol'nyh shaht po metanu [Methane hazard categories of coal mines]. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal),* 2016, no. S1, p. 300–314. (In Russian)

Zasterova P., Marschalko M., Niemiec D., Durd'ak J., Bulko R., Vlček J. Analysis of possibilities of reclamation waste dumps after coal mining. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2015, vol. 15, p. 656–662. DOI: 10.1016/j.proeps.2015.08.077

Web-sources:

Arctic DEM Explorer. URL: https://livingatlas2.arcgis.com/arcticdemexplorer/ (access date 20.07.2020).

Municipal'noe bjudzhetnoe uchrezhdenie kul'tury «Centralizovannaja bibliotechnaja sistema» g. Vorkuty [Municipal budgetary institution of culture «Centralized Library System» of Vorkuta.]. URL: http://www.vorkuta-cbs.ru/ (access date 20.07.2020). (In Russian)

Received 25.07.2020
Revised 15.08.2020
Accepted 25.08.2020

ДИНАМИКА ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 551.332.21 (479.25)

Д.В. Севастьянов[1], Т.В. Сапелко[2], М.А. Науменко[3], В.Р. Бойнагрян[4]

РИТМИКА ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В РАЙОНЕ МАССИВА АРАГАЦ (АРМЕНИЯ) ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ ОЗЕРА УМРОЙ

Обсуждаются новые результаты исследования озер и ледниковых отложений на склонах самого высокого на территории Армении вулканического массива Арагац. На основе геоморфологических и палеолимнологических методов исследований выявлены следы ритмического формирования послеледникового рельефа, стадиального заложения конечных морен и высокогорных озер на склонах этого массива. Впервые проведено эхолотирование озерной котловины и бурение донных отложений оз. Умрой, получены радиоуглеродные датировки озерных отложений и данные о стратиграфии осадков. На основе эхолотирования уточнены морфометрические характеристики озера. Обсуждается хронология стадиальной регрессии последнего горного оледенения. С помощью радиоуглеродного (AMS) датирования определен возраст образования оз. Умрой в массиве Арагац – около 7000 кал. л. н., что соответствует периоду отступания ледника от конечной морены стадии Бюль (по альпийской терминологии). Анализируются литературные материалы гляциоморфологических исследований, выполненных на Малом Кавказе и на массиве Арагац в прошлом. В основу гипотезы стадиального формирования моренного рельефа на склонах массива Арагац в голоцене положена теоретическая схема Петтерссона-Шнитникова, которая была разработана для гор Евразии. Показаны возможности определения относительного возраста формирования моренного рельефа и озерных котловин на основе методов палеолимнологических исследований. Формы ледникового рельефа, содержащие несколько генераций стадиальных конечных морен и связанных с ними озерных котловин, являются отражением циклической динамики отступания последнего оледенения на массиве Арагац в соответствии с многовековыми климатическими ритмами голоцена. Утверждается, что использование радиоуглеродного (AMS) датирования озерных осадков в горных озерах, дополненное изучением палинологии и стратиграфии донных отложений, можно считать наиболее репрезентативным подходом для косвенного выявления возраста прилегающих моренных отложений и для изучения ритмической изменчивости природных процессов в голоцене.

Ключевые слова: Армянское нагорье, ледниковые отложения, донные отложения, AMS-датирование, индикаторы

Введение. Географы, гляциологи и гидрологи всегда проявляли интерес к изучению динамики высокогорных ландшафтов и взаимодействию горных ледников и озер. В результате наблюдений за состоянием современных горных ледников и озер, изучения форм гляциогенного рельефа (каров, морен и др.), сформированных в период последнего (вюрмского) оледенения на Кавказе, в Альпах и других горных странах, были выявлены следы стадиального отступания ледников и основные индикаторные свойства лимно-гляциального рельефа по отношению к изменениям климата [Серебрянный и др., 1984, 1989; Севастьянов, 1979, 1986; Соломина, 1992; Kasser, 1981; Hormes et al., 2001].

Результаты проведения комплексных палеолимнологических исследований в разных горных системах на основе изучения донных отложений озер показывают, что озера являются чуткими индикаторами изменений климата и ледникового стока, представляя собой природные накопительные информационные геосистемы. Именно в озерных отложениях накапливается (аккумулируется) информация об изменениях окружающей среды в прошлом. Она фиксируется в стратиграфии отложений, в составе и строении донных осадков (седиментов), в перерывах в осадконакоплении, в изменениях состава диатомовых комплексов, спорово-пыльцевых спектров и других индикаторах природной среды. Расшифровка этой информации на основе палеолимнологических методов позволяет выявить особенности процессов осадконакопления, обусловленные изменениями климата и стока, проводить палеореконструкции, моделировать динамику развития природных процессов в прошлом и выявлять тенденции их развития в равнинных и горных ландшафтах [Connor, Kvavadze, 2008; Соломина и др., 2013; Sevastyanov et al., 2014; Субетто и др., 2017; Sapelko et al., 2018].

[1] Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра страноведения и международного туризма, профессор, докт. геогр. н.; *e-mail:* ecolim@mail.ru

[2] Институт озероведения Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, ст. науч.с., канд. геогр. н.; *e-mail:* tsapelko@mail.ru

[3] Институт озероведения Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, вед. науч. с., докт. геогр. н.; *e-mail:* m.naumenko@limno.org.ru

[4] Ереванский государственный университет, профессор, докт. геогр. н.; *e-mail:* vboynagryan@ysu.am

Специальные исследования континентальных отложений и озер Армении стали осуществляться в начале XX в. с целью изучения природных ресурсов, необходимых для развития хозяйства региона. Новый этап комплексных исследований территории Армении и крупные научные обобщения прошлых результатов были сделаны в бассейне оз. Севан и на массиве Арагац в конце XX – начале XXI вв. сотрудниками Ереванского университета, Академии наук Армянской ССР и АН СССР в связи с Программами рационального использования природных ресурсов региона, реализованными в разные годы [Бальян, 1969; История озер …, 1991; Бойнагрян, 2007, 2016; Саядян, 2009; Бойнагрян и др., 2018].

Основная задача нашего исследования – рассмотреть возможности определения возраста гляциогенного рельефа и выявления особенностей эволюции высокогорного оз. Умрой в послеледниковое время на основе результатов изучения донных осадков озера и стадиальности ледниковых отложений на склонах массива Арагац в Армении.

Материалы и методы исследований. Летом 2018 г. авторы проводили исследования высокогорных озер Армянского нагорья в рамках реализации совместного международного Российско-Армянского проекта РФФИ – «Палеолимнологический аспект изучения эволюции экосистем высокогорных озер России и Армении».

Один из объектов наших исследований – высокогорное озеро Умрой, расположенное на северо-восточном склоне вулканического массива Арагац. Этот массив, как наиболее возвышенный район Армении, представляет существенный интерес для изучения следов последнего оледенения и эволюции связанных с ними озер. Поэтому реперным районом для изучения был выбран бассейн высокогорного оз. Умрой (рис. 1).

Вулканический массив Арагац, достигающий высоты 4090 м, на котором проводилось изучение озерных котловин и форм послеледникового рельефа, представлен четырьмя вулканогенными вершинами. Склоны этого горного массива несут следы древнего оледенения в виде обширных каров, моренных образований и связанных с ними озерных котловин. На склонах массива Арагац имеется много небольших озер, лежащих на разных высотных уровнях. Анализ картографических материалов показывает, что большинство из них расположено в пределах высот 2900–3600 м, занимают понижения моренного рельефа в карах и представляют собой каровые, моренно-запрудные и внутриморенные гляциогенные котловины. Несколько озер, расположен-

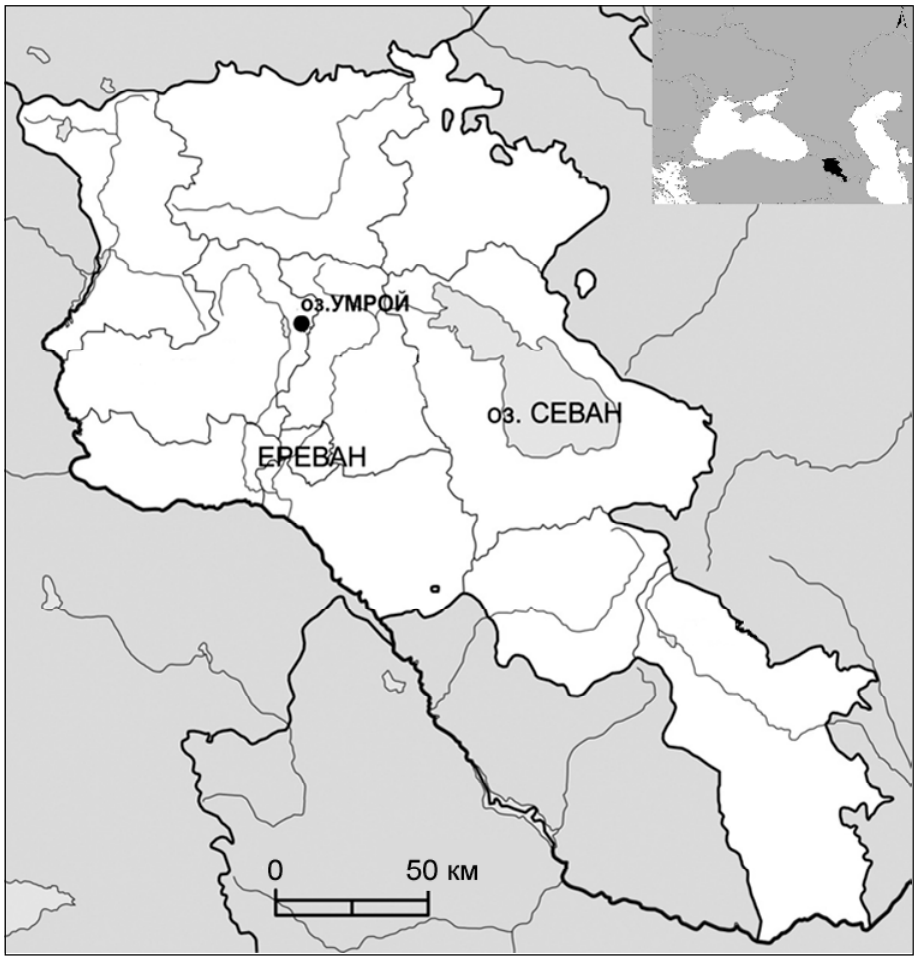

Рис. 1. Район исследований – Армянское нагорье, массив Арагац, оз. Умрой

Fig. 1. Study Area – Armenian Plateau, Aragats Massif, Umroi Lake

ных у северо-восточного подножия массива Арагац среди лавового рельефа на отметках ниже 2500 м, например, в окрестностях с. Нигаван, по мнению ряда исследователей, имеют вулканогенное происхождение [Бойнагрян, 2007, 2016; Саядян, 2009].

На основе детального анализа аэрофотоснимков и топографических карт масштабов 1:25 000 и 1:100 000, прокладки продольных профилей по моренным накоплениям вюрмского возраста на северо-восточной и восточной частях макросклонов массива Арагац, впервые для рассматриваемого региона удалось выявить минимум четыре генерации моренных отложений, проследить максимальное продвижение вюрмских ледников и выявить стадиальность их отступания. Выше оз. Умрой на топографических картах и аэроснимках разных лет установлено еще два небольших озера, подпруженных моренами, располагающихся на гипсометрических уровнях 3207 и 3380 м. Особый интерес вызвало крупное гляциогенное озеро Умрой. Изучение особенностей распространения моренных отложений в его бассейне, позволило выявить следы стадиальности в формировании моренного рельефа. Исследование глубин озера посредством эхолотирования и отбор колонок донных отложений подтвердили наши предположения о ледниковом происхождении озера. Последующее изучение состава и строения озерных отложений будет положено в основу палеолимнологических реконструкций голоцена [Бойнагрян и др., 2018; Sapelko et al., 2019].

Результаты и обсуждение. Озеро Умрой – предмет нашего специального изучения, расположено во внешней части обширного кара на высоте 3058 м над уровнем моря, имеет овальную форму и ориентировано своей длинной стороной в направлении СЗ–ЮВ. Северная часть озерной котловины углублена почти до 11 м, вероятно под воздействием конца древнего ледника в период его стационарного положения, а противоположная – юго-восточная – часть котловины выположена, сток подпруживается мореной. Большая часть берегов озера представлена крутыми осыпными склонами, покрытыми крупноглыбовым материалом. Озеро имеет преимущественно снеговое питание за счет таяния снежников на водосборе и дождевых осадков. Ледника в верховьях кара не наблюдается, но на аэроснимках и топографических картах в верхней части кара выше оз. Умрой можно видеть ещё два небольших гляциогенных озера на высотах 3207 м и около 3380 м. С северо-запада озерная котловина оз. Умрой обрамлена крутыми склонами горной коренной складки, изгибающейся в форме цирка северо-восточной экспозиции и достигающей высотных отметок гребня 3283–3372 м. Максимальные высоты отдельных вершин гребня в обрамлении водосбора озера достигают 3585,5 м над уровнем моря. Коренные породы склонов массива сложены преимущественно вулканогенными породами верхнего–среднего олигоцена [Бальян, 1969; Бойнагрян, 2016].

В период полевых исследований 2018 г. впервые нами выполнены подробные промеры глубин оз. Умрой на основе эхолотирования (табл. 1).

В частности, существенно уточнены основные морфометрические параметры высокогорного оз. Умрой и разработана 3D-модель его котловины [Сапелко и др., 2019]. Отбор проб донных отложений оз. Умрой был выполнен с помощью русского бура (модифицированного торфяного) в точке (40°31,285′ с. ш. 44°15,594′ в. д.), с глубины 3,35 м. Получены первые результаты изучения колонки донных отложений, состоящей из двух кернов, взятых с перекрытием. Общая мощность отобранной колонки составила 1,17 м. Выделены границы и описаны литологические горизонты. Корреляция кернов проведена по литологическим границам. Из этой колонки получено пять радиоуглеродных AMS-датировок (табл. 2) [Sapelko et al., 2019]. Датирование выполнено в радиоуглеродной лаборатории Института гео-

Таблица 1

Основные морфометрические характеристики оз. Умрой

Площадь, км^2	Средняя глубина, м	Наибольшая глубина, м	Объем, м^3	Коэффициент развития береговой линии
0,117	3,2	10,9	$365{,}1\times10^3$	1,28

Таблица 2

Радиоуглеродные AMS-датировки по органическому веществу отложений оз. Умрой*

Глубина, см	Лабораторный номер	Материал датирования	Радиоуглеродный возраст (^{14}C), л. н.	Калиброванный возраст, кал. л. н.
4,42–4,44	IGAN-6545	TOC	6285±40	7156–7313 (7216)
4,15–4,17	IGAN-6546	TOC	2915±40	2945–3179 (3057)
4,03–4,05	IGAN-6547	TOC	2925±30	2973–3163 (3072)
3,84–3,86	IGAN-6548	TOC	2415±20	2348–2700 (2455)
3,40–3,42	IGAN-6549	TOC	650±20	560–666 (591)

Примечание. *Результаты радиоуглеродного датирования образцов получены в ЦКП «Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» Института географии РАН и в Центре прикладных изотопных исследований Университета Джорджии (США). TOC – общий органический углерод.

графии РАН, калибровка дат выполнены в соответствии с Radiocarbon Calibration Program Calib. Ver. 7.1.0 [Reimer et al., 2013].

Анализ стратиграфии донных отложений и полученные датировки показали определенную ритмичность в осадконакоплении. В отобранной колонке из нижнего (базального) слоя относительно более плотных и минерализованных слоистых суглинков получена калиброванная дата около 7000 л. н. Другая датировка верхнего слоя осадков (3) составила около 600 л. н. (рис. 2, см. табл. 2).

Колонка длиной 117 см вскрывает отложения оз. Умрой, накопившиеся почти за 7000 лет, с учетом калиброванного возраста нижнего слоя отложений (см. рис. 2). Средняя расчетная скорость осадконакопления по всей колонке (на основе верхней и нижней полученных датировок) составляет около 0,15 мм/год. Средняя скорость накопления коричневой гомогенной гиттии в горизонте с глубин 405–385 см (от поверхности воды) достигает 0,4 мм/год. Значительная разница в расчетных скоростях осадконакопления и слоистое строение колонки осадков в интервале глубин 405–430 см с присутствием песчаного горизонта могут отражать резкие колебания природных условий и возможные перерывы в озерном осадконакоплении (между слоями 1, 2 и прослой песка 4, см. рис. 2). Об этом свидетельствуют наши предварительные результаты изучения колонки [Севастьянов и др., 2019; Sapelko et al., 2019].

По предварительным результатам палинологического изучения колонки донных отложений оз. Умрой мы можем говорить о теплом и влажном климате во время формирования слоистого суглинка. В это время содержание пыльцы древесных пород было минимальным по разрезу. Возможно, в это время происходило таяние ледников. Атлантический период формирования суглинка подтверждает и полученная радиоуглеродная датировка 6285±40 ^{14}C лет назад (7216 кал. л. н.) (IGAN-6545) [Sapelko et al., 2019]. Полученные заключения о влажном климате и распространении лесов на Малом Кавказе подтверждают также палинологические данные по горным территориям Армении и Грузии [Серебрянный и др., 1984; Connor, Kvavadze, 2008; Ollivier et al., 2011; Joannin et al., 2014; Leroyer et al., 2016]. Изменение климатических условий произошло в суббореальный период, для которого получены даты 2915±40 ^{14}C лет назад (3057 кал. л. н.) (IGAN-6546) и 2925±30 ^{14}C лет назад (3072 кал. л. н.) (IGAN-6547). В это время в озере формировалась темная глинистая гиттия (см. рис. 2). Граница леса опускалась ниже современной, о чем может свидетельствовать сокращение древесных пород в спорово-пыльцевых спектрах. Полученные палинологические данные для этого периода фиксируют похолодание и иссушение климата, что возможно связано с увеличением ледникового покрова. О сокращении ледников в голоцене около 10 500 лет назад свидетель-

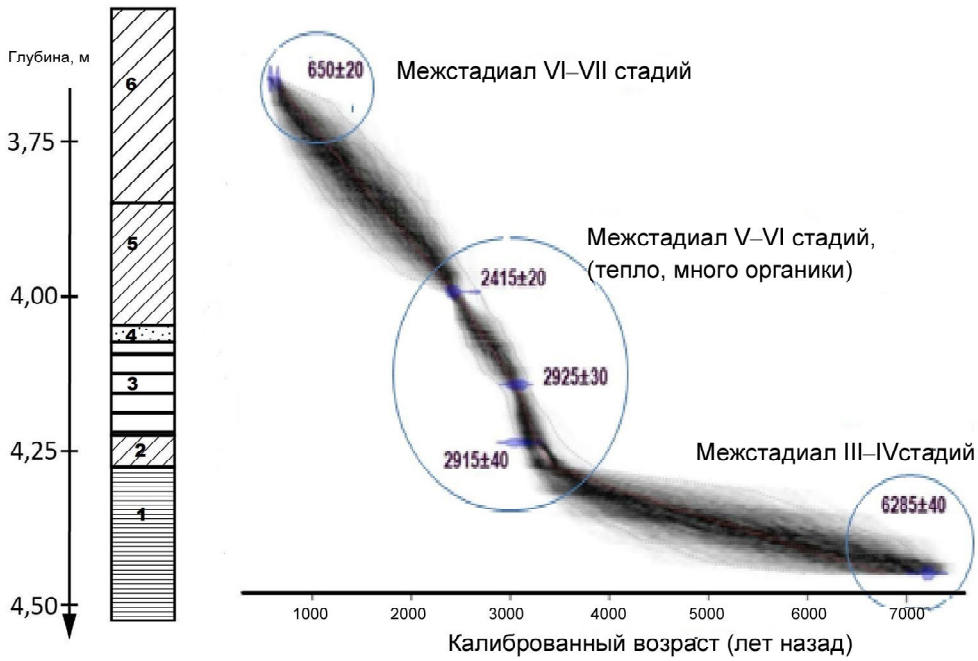

Рис. 2. Модель «возраст–глубина» по керну озерных отложений оз. Умрой (даты по ^{14}C). Глубины даны от поверхности воды. *Условные обозначения*: Слева на литологической колонке: 1 – слоистый суглинок; 2 – однородная глинистая гиттия; 3 – слоистая глинистая гиттия; 4 – песок; 5 – темно-коричневая глинистая однородная гиттия; 6 – светло-коричневая однородная гиттия. Цифрами на кривой даны некалиброванные даты, на горизонтальной оси – калиброванные

Fig. 2. «Age-depth» model according to the core of the Umroi Lake sediments (^{14}C dating). Depths are given downward from the water surface. *Legend*: Left on the lithological column: 1 – layered loam; 2 – homogeneous clay gittia; 3 – layered clay gittia; 4 – sand; 5 – dark brown clay homogeneous gittia; 6 – light brown homogeneous gittia. The numbers on the curve are uncalibrated dates, those on the graph are calibrated dates

ствуют исследования как на Кавказе [Соломина и др., 2013], так и в Альпах [Ivy-Ochs et al., 2009]. При этом отмечается сокращение ледников до периода около 3000 лет назад, что показывают и наши результаты, полученные по донным отложениям оз. Умрой. С началом субатлантического периода, которое фиксируется датировкой 2415±20 ^{14}C лет назад (2455 кал. л. н.) (IGAN-6548) увеличивается содержание древесных пород в спорово-пыльцевых спектрах, что свидетельствует об увлажнении климата и возможном подъеме границы леса до современного уровня.

На отступание (сокращение) горных ледников в голоцене около 3000 л. н., которое сменилось похолоданием и наступлением оледенения около 2000 л. н., указывали многие авторы. Эту историческую фазу исследователи фиксировали на основе разных индикаторов как на Кавказе [Тушинский и др., 1979; Серебрянный и др., 1984; Соломина, 1992; Serebryanny, Solomina, 1996; Joannin et al., 2014], так и в Альпах [Hormes et al., 2001; Haeberli et al., 2003]. Последнее наступление ледников и увеличение снежности на Кавказе и Армянском нагорье («Малый ледниковый период») – 200–300 л. н., отмечено в работах ряда исследователей [Тушинский, 1960; Шнитников, 1969; Тушинский, Турманина, 1979; Kotlyakov et al., 1991; Joannin et al., 2014].

На вулканическом массиве Арагац следы вюрмских ледников наиболее четко прослеживаются на его северных и восточных макросклонах и в прорезающих их троговых долинах. В западной части северного макросклона в глубокой (до 300–350 м) троговой долине р. Гехадзор имеется целый набор следов вюрмского оледенения: лестница каров в интервале высот от 3300 до 2950 м; ригели с относительной высотой 100–150 м; каровые и моренные озера, гряды моренных холмов, образующих полосу длиной до 10 км (нижняя граница морен здесь проходит на высоте около 2250 м) и мощностью более 80 м. В троговой долине р. Дузкенд, прорезающей почти посередине северный макросклон Арагаца, в верховьях расположен глубокий висячий кар, из которого тянется полоса моренных холмов с высоты 3150 м до высоты 2250 м и общей длиной 7 км [Бойнагрян, 2016]. Моренный покров Арагаца имеет сложное строение в связи с тем, что в период максимума последнего оледенения вершина вулкана покрывалась «ледниковой шапкой», а по склонам стекали долинные и карово-долинные ледники, сформировавшие конечные морены. Отмечалось, что вулканический массив неоднократно подвергался землетрясениям, которые оставили систему разломов, осложняющих интерпретацию следов оледенения и выявление стадиальности в деградации оледенения. В основном, исследователи выделяли следы максимального рисского и последнего вюрмского оледенений [Бальян, 1969; Саядян, 2009 и др.]. Однако, некоторые авторы, изучавшие следы последнего оледенения на склонах Арагаца, выделяли серии разномасштабных стадиальных конечных морен [Личков, 1931; Максимов, 1970; Бойнагрян, 2016 и др.]. В частности, Е.В. Максимов [1970] подразделял моренные поля и отдельные морены на склонах Арагаца по их мощности и выраженности в рельефе на разные генерации: а) стадиальные (многовековые), б) промежуточные, в) внутривековые. *Стадиальные* – это самые мощные конечные морены, соответствующие многовековому ритму Петтерссона-Шнитникова (1800–1900 лет) [Pettersson, 1930; Шнитников, 1957, 1985]. Таких морен Е.В. Максимовым в разных долинах было выделено по четыре–пять, а внутривековых – три–пять и рассчитана стадиальная депрессия концов ледников, составляющая в среднем 80–100 м [Максимов, 1970]. При рекогносцировке рельефа в бассейне оз. Умрой нами также было выделено четыре–пять стадиальных конечных морен голоценового возраста. Их ориентировочное расположение отмечено на топографической карте (рис. 3).

Механизм образования стадиальных конечных морен и озер в процессе многовекового ритма распада последнего горного оледенения и стадиальная хронология этого процесса были детально описаны и обоснованы в ряде работ [Шнитников, 1957, 1985; Максимов, 1983; Севастьянов, 1979; Серебрянный и др., 1989; Соломина, 2014 и др.].

Как было показано в работах O. Pettersson [1930] и А.В. Шнитникова [1957, 1985], основной причиной изменения глобального климата и последующего баланса массы ледников, приводящей их в состояние наступания или деградации, на протяжении голоцена являлся ритм неравенства приливообразующей силы (ПС). По расчетам О. Петтерссона, циклические изменения этой силы обусловлены орбитальным расположением Земли и Луны относительно Солнца. Ритмично изменяясь, на максимуме своего проявления ПС способствует поднятию холодных глубинных вод к поверхности Мирового океана. Это приводит к охлаждению тропосферы и перераспределению осадков на материках, вызывая относительное увеличение увлажненности горных территорий. При этом в горах происходит накопление снега и льда, горные ледники переходят в наступление. Когда фаза максимального наступления ледников сменяется равновесным положением их концов, формируются стадиальные конечные морены. Фаза отступания ледников следует за снижением импульса ПС, потеплением поверхности океана и всей тропосферы, что сопровождается сокращением снежности и ледовитости горных территорий. Хронологическая схема стадиальной деградации вюрмского оледенения приведена в таблице 3.

Теоретически, ритм Петтерссона-Шнитникова имеет среднюю продолжительность около 1850 лет. В горно-ледниковых областях в конце многовековой фазы максимального похолодания, когда наступает равновесие баланса массы ледников и положение их концов стабилизируется, формируются фронтальные стадиальные конечные морены. В начальной фазе потепления у концов ледников происходит об-

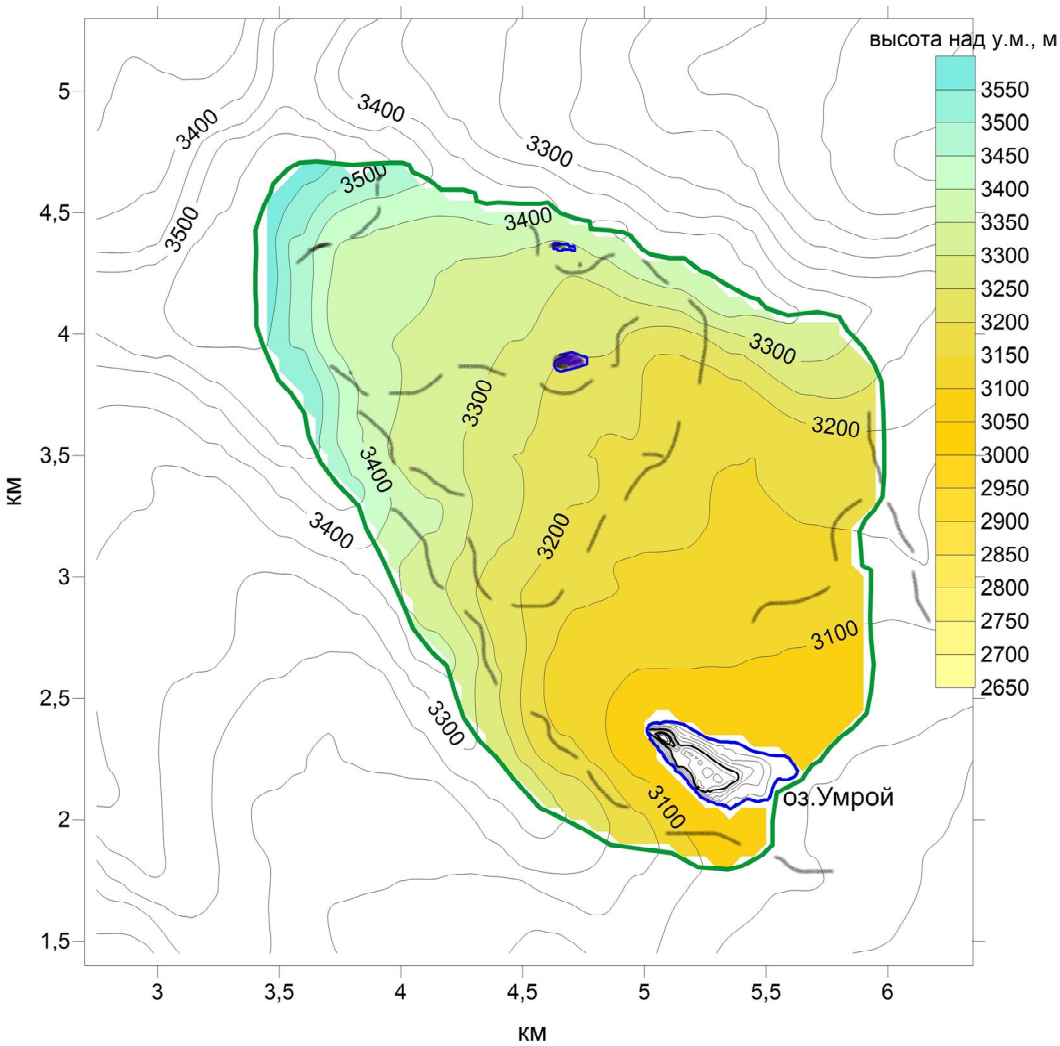

Рис. 3. Карта бассейна оз. Умрой и рубежи распространения стадиальных вюрмских морен (прерывистые линии)

Fig. 3. Map of the Umroi Lake basin and the boundaries of the stadial Wurm moraines (broken lines)

разование стадиальных озер, запруженных этими конечными моренами, от которых отступают концы ледников. Такие озера имеют возраст, близкий к возрасту подпруживающей их конечной морены [Шнитников, 1985; Максимов, 1983; Севастьянов, 1986; Соломина, 1992, 2014; Hormes et al., 2001].

Согласно новым данным, импульс послеледникового значительного потепления фиксируется исследователями, начиная от 12 000–11 700 лет назад, и определяется как начало направленного потепления голоцена, что следует из расчетной модели хода палеотемператур после начала дегляциации до XX в. [Marcott et al., 2015]. В течение этого времени, как показано в ряде исследований, в Альпах горное оледенение прошло через восемь стадий отступания [Kasser, 1981; Hormes et al., 2001], что в определенной мере подтверждает теоретическую схему Петтерссона-Шнитникова для гор Евразии.

Безусловно, приведенная схема на протяжении голоцена усложнялась наложением других климатообразующих факторов (солнечная активность, вулканическая деятельность, региональная тектоника горных стран, внутривековые климатические ритмы и др.), и это отмечалось многими авторами. Следовательно, мы можем фиксировать в рельефе и озерных отложениях лишь результирующие следы некой «интерференции волн цикличности» разной силы и направленности. Поэтому интерпретация палеогеографических условий формирования морен и озер весьма сложна, нередко противоречива и вызывает множество дискуссий [Серебрянный и др., 1984, 1989; Kotlyakov et al., 1991; Hormes et al., 2001; Соломина, 2014 и др.].

Развивая творческую дискуссию о ритмике природных процессов, мы применили рассмотренную схему многовековой динамики увлажненности климата и стадиальности распада горного оледенения в голоцене (см. табл. 3) для интерпретации результатов изучения моренных отложений в бассейне оз. Умрой и донных осадков озера. Следует отметить, что выделенные нами на топографической карте (см. рис. 3) фронтальные зоны морен лежат (сверху вниз) на высотах: первая – 3400–3350 м, вторая – 3300–3200 м, третья – 3200–3120 м, чет-

Таблица 3

Схема распада вюрмского оледенения в горах Евразии [Шнитников, 1985]

№ морен на карте	Название стадиальных моренных комплексов по альпийской терминологии	Внешний вид материала морен, высотный ландшафтный пояс	Теоретический возраст стадиальных конечных морен л. н. (не калиброван)
1	Фернау (VII стадия) («Малая ледниковая эпоха»)	Незадернованный моренный материал (гольцы)	200–400
2	Эгезен (VI стадия) («Историческая»)	Задернованные морены, травянистый покров альпийского пояса	Около 2 000
3	Даун (V стадия)	Задернованные морены альпийского и субальпийского пояса	3 800–4 000
4	Гшнитц (IV стадия)	Задернованные морены, травяно-кустарниковый покров субальпийского пояса	5 700–6 000
5	Бюль (III стадия)	Задернованные морены лесного пояса	7 600–8 000
6	Аммерзее (II стадия)	Задернованные морены лесного пояса	9 400–10 000
7	Шлирен (I стадия)	Задернованные морены кустарникового и лесного пояса	11 200–11 500
8	Максимум оледенения горных стран	Предгорья	Около 13 000

вертая – 3100–3000 м (2970 м), примерно соответствуя межстадиальной депрессии конца формировавшего их ледника. Эти стадии предположительно можно соотнести с хронологическими рубежами отступания последнего горного оледенения по схеме А.В. Шнитникова: *Фернау, Эгезен, Даун и Гшнитц* (см. табл. 3).

Радиоуглеродное датирование осадков озера в определенной мере подтверждает наше предположение о вюрмском возрасте и стадиальном образовании моренных отложений на склонах массива Арагац в бассейне оз. Умрой. Отмеченная нами четвертая (сверху) конечная морена, лежащая ниже оз. Умрой, представляет собой труднорасчленимое моренное поле. Предполагалось, что это конечная морена стадии Гшнитц. Однако полученная нами датировка по самому нижнему слою осадков оз. Умрой (около 7000 л. н.) показывает, что возникновение озера было связано с более ранней стадией распада оледенения, возможно стадией Бюль по приведенной нами схеме (см. табл. 3). Дальнейшие подробные палеолимнологические исследования донных отложений оз. Умрой и уточнение геоморфологических данных о расположении конечных морен позволят прояснить наши представления о ритмике природных процессов голоцена в высокогорных условиях на массиве Арагац.

Выводы.

Таким образом, на основании проведенных исследований в бассейне оз. Умрой, расположенном на склоне массива Арагац, можно сделать следующие выводы:

– впервые полученный ряд радиоуглеродных датировок из колонки донных отложений высокогорного озера Умрой, лежащего в межморенной котловине, позволяет установить время его возникновения;

– датировка из базального слоя осадков – 6285±40 л. н. (7156–7313 кал. л. н.) – отражает время начала функционирования озерной экосистемы. Окружающие озеро вмещающие его моренные отложения, вероятно, имеют близкий голоценовый возраст, несколько больший, чем возраст осадков озера;

– использование схемы стадиального отступания последнего горного оледенения [Шнитников, 1957, 1985] для интерпретации полученных нами результатов палеолимнологических исследований дает основание предполагать, что озеро образовалось около 7000 л. н. в период отступания ледника от конечной морены стадии Бюль;

– предварительные палинологические данные подтверждают, что накопление донных осадков озера Умрой также началось в относительно теплое, межстадиальное время отступания древнего ледника;

– формы ледникового рельефа, содержащие несколько генераций стадиальных конечных морен и связанных с ними озерных котловин, являются отражением ритмики отступания последнего оледенения на массиве Арагац в соответствии с многовековыми колебаниями климата в голоцене;

– высокогорное озеро Умрой и стадиальные морены массива Арагац могут рассматриваться как индикаторы ритмической изменчивости природных процессов, как аккумуляторы информации о колебаниях природной среды прошлого;

– определение возраста озерных осадков в горно-ледниковых районах можно считать наиболее репрезентативным методом косвенного выявления возраста прилегающих конечно-моренных отложений;

– нерешенным остался вопрос определения возраста озер и соответствующих генераций морен, расположенных выше оз. Умрой. Это может стать одним из направлений будущих исследований массива Арагац.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-55-05008 и при финансовой поддержке Комитета науки Министерства образования и науки РА в рамках научного проекта № 18RF-045.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бальян С.П. Структурная геоморфология Армянского нагорья и окаймляющих областей. Ереван: изд-во ЕГУ, 1969. 392 с.

Бойнагрян В.Р. Геоморфология Армянского нагорья. Ереван: Асогик, 2016. 650 с.

Бойнагрян В.Р. Озера Армянского нагорья. Ереван: изд-во ЕГУ, 2007. 144 с.

Бойнагрян В.Р., Сапелко Т.В., Габриелян И.Г., Севастьянов Д.В. Современная изученность истории высокогорных озер Армении // Известия РГО. 2018. Т. 150. Вып. 6. С. 88–102.

История озер Севан, Иссык-Куль, Балхаш, Зайсан и Арал // История озер СССР. Л.: Наука, 1991. 304 с.

Личков Б.Л. К характеристике геоморфологии и стратиграфии Алагёза. Ч. 1. Алагёз. Т. 1. Изд. М.: АН СССР и УВХ Арм. ССР, 1931. 62 с.

Максимов Е.В. Дегляциация массива Арагац в Армении // МГИ. 1970. № 16. С. 184–191.

Максимов Е.В. Ритмические составляющие в режиме высокогорных озер Средней Азии // Вестн. Ленингр. ун-та. 1983. № 6. С. 52–65.

Сапелко Т.В., Бойнагрян В.Р., Габриелян И.Г., Науменко М.А., Севастьянов Д.В., Пилоян А.С., Маргарян Л.А. Голоцен Армении по предварительным результатам первых комплексных исследований высокогорных озер // Морфологическая эволюция и стратиграфические проблемы. Материалы LXV сессии Палеонтологического общества при РАН. СПб.: ВСЕГЕИ, 2019. С. 181–183.

Саядян Ю.В. Новейшая геологическая история Армении. Ереван: изд-во «Гитутюн» НАН РА, 2009. 357 с.

Севастьянов Д.В. Горные озера Средней Азии – индикаторы изменчивости природных процессов // Озеро Иссык-Куль и тенденции его природного развития. Л.: Наука, 1986. С. 200–219.

Севастьянов Д.В. О некоторых закономерностях развития высокогорных озер Тянь-Шаня и их палеогеографическом значении // Известия РГО. 1979. Т. 111. № 6. С.495–500.

Севастьянов Д.В., Сапелко Т.В., Науменко М.А., Бойнагрян В.Р. Высокогорные озера как индикаторы ритмики природных процессов // География: развитие науки и образования. СПб., 2019. С. 491–497.

Серебрянный Л.Р., Голодковская Н.А., Орлов А.В., Малясова Е.С., Ильвес Э.О. Колебания ледников и процессы моренонакопления на Центральном Кавказе. М.: Наука, 1984. 216 с.

Серебрянный Л.Р., Орлов А.В., Соломина О.Н. Морены – источник гляциологической информации. М.: Наука, 1989. 240 с.

Соломина О.Н. Колебания ледников в голоцене и возможное влияние на них орбитального сигнала, солнечной и вулканической активности и антропогенного воздействия // Лед и Снег. 2014. № 3(127). С. 81–90.

Соломина О.Н. Стадиальная деградация горных ледников в голоцене // Известия АН СССР. 1992. № 5. С. 13–24.

Соломина О.Н., Калугин И.А., Александрин М.Ю., Бушуева И.С., Дарин А.В., Долгова Е.А., Жомелли В., Иванов М.Н., Мацковский В.В., Овчинников Д.В., Павлова И.О., Разумовский Л.В., Чепурная А.А. Бурение осадков оз. Каракель (долина р. Теберда) и перспективы реконструкции истории оледенения и климата голоцена на Кавказе // Лед и Снег. 2013. № 2(122). С. 102–111.

Субетто Д.А., Севастьянов Д.В., Сапелко Т.В., Бойнагрян В.З., Греков И.М. Озера как накопительные информационные системы и индикаторы климата // Астраханский вестник экологического образования. 2017. № 4(42). С. 4–14.

Тушинский Г.К. Ритмы в динамике оледенения и снежности Кавказа // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 1960. № 1. С. 1–36.

Тушинский Г.К., Турманина В.И. Ритмы гляциальных процессов последнего тысячелетия. М.: изд-во МГУ, 1979. С. 154–160.

Шнитников А.В. Внутривековая изменчивость общей увлажненности. Л., 1969. 246 с.

Шнитников А.В. Изменчивость общей увлажненности материков Северного полушария // Зап. Геогр. о-ва СССР. Новая серия. Т. 16. М.-Л., 1957. 337 с.

Шнитников А.В. Теоретические основы многовековой изменчивости общей увлажненности и состояние озер – современное и вероятное будущее // Проблемы исследования крупных озер. Л.: Наука, 1985. С. 5–22.

Connor S.E., Kvavadze E.V. Modelling late Quaternary changes in plant distribution, vegetation and climate using pollen data from Georgia, Caucasus. *Journal of Biogeography*, 2008, vol. 36, p. 529–545.

Haeberli W., Holzhauser H. Alpin Glaciers Mass Changes During the Past Two Millennia. *Pages News*, 2003, vol. 11, no. 1, p. 13–15.

Hormes A., Muller B.U. The Alps with little ice: evidence for eight Holocene phases of reduced glacier extent in the Central Swiss Alps. *The Holocene*, 2001, vol. 11, no. 3, p. 255–265.

Ivy-Ochs S., Kerschner H., Maisch M., Christl M., Kubik P.W., Schluchter C. Latest Pleistocene and Holocene glacier variations in the European Alps. *Quaternary Science Reviews*, 2009, vol. 28, p. 2137–2149.

Joannin S., Ali A.A., Ollivier V., Roiron P., Peyron O., Chevaux S., Nahapetyan S., Ozalakyan P., Karakhanyan A., Chataigner C. Vegetation, fire and climate history of the Lesser Caucasus: a new Holocene record from Zarishat fen (Armenia). *Journal of Quaternary Science*, 2014, vol. 29, p. 70–82.

Kasser P. Switzerland and her Glaciers. From the Ice Age to the Present. Peter Kasser & Wilfried Haeberly (Ed.). Swiss NTO Publ. Geographical Publichers, Berne. 1981. 192 p.

Kotlyakov V.M., Serebryanny L.R., Solomina O.N. Climate change and glacier fluctuations of the last millennium in the south mountains of USSR. *Mountain Research and Development,* 1991, vol. 11, no. 1, p. 1–12.

Leroyer C., Joannin S., Aoustin D., Ali A., Peyron O., Ollivier V., Tozalakyan P., Karakhanyan A., Jude F. Mid Holocene vegetation reconstruction from Vanevan peat (south-eastern shore of Lake Sevan, Armenia). *Quaternary International*, 2016, vol. 395, p. 5–18.

Marcott S.A., Shakun J.D. Holocene climate change and its context for the future. *Past Global Changes Magazine*, 2015, vol. 23, no. 1, p. 28. DOI: 10.22498/pages.23.1.28.

Ollivier V., *Joannin S.*, *Roiron P.*, *Nahapetyan S.*, *Chataigner C.* Travertinization and Holocene morphogenesis in Armenia: a reading grid of rapid climatic changes impact on the landscape and societies between 9500–4000 cal. BP in the Circumcaspian regions. *European Archaeologist*, 2011, vol. 36, p. 26–31.

Pettersson O. The tidal force. Geograf. Annal. Arg. XII, 1930, 21 p.

Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Ramsey C.B., Grootes P.M. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 2013, vol. 55(4), p. 1869–1887.

Sapelko T.V., Boynagryan V.R., Naumenko M.A., Sevastyanov D.V., Gabrielyan I.G., Piloyan A.S., Margaryan L.A., Aleksandrin M.Y., Terekhov A.V. First Multy-Proxy Studies of High-Mountain Lakes in Armenia: Preliminary Results. *Geography, Environment, Sustainability*, 2019, vol. 12, no. 4, p. 272–284. DOI: 10.24057/2071-9388-2019-87.

Serebryanny L.R., Solomina O.N. Glaciers and climate of the mountains of the former USSR during the neoglacial. *Mountain Research and Development,* 1996, vol. 16, no. 2, p. 157–166.

Sevastyanov D., *Sapelko T.*, *Subetto D.*, *Boynagryan V.R.* Alpine lakes – cumulative information systems and indicators of climate changes Paleolimnology of Northern Eurasia. *Proceeding of the International conference «Paleolimnology of Northen Eurasia», 2–25 Sept.,* Karelian Researcher Centre RAS, Petrozavodsk, 2014, p. 24–26.

Поступила в редакцию 07.08.2019
После доработки 16.04.2020
Принята к публикации 25.08.2020

D.V. Sevastyanov[1], T.V. Sapelko[2],
M.A. Naumenko[3], V.R. Boynagryan[4]

THE RHYTHM OF NATURAL PROCESSES IN THE AREA OF THE ARAGATS MASSIF (ARMENIA) ACCORDING TO THE UMROI LAKE STUDY DATA

New results of studying the lakes and glacial deposits on slopes of the highest Aragats volcanic massif in Armenia are analyzed. On the basis of geomorphologic and paleolimnological methods the signs of rhythmic formation of post-glacial relief, and stadial development of moraines and high mountain lakes have been revealed. For the first time echolocation of the lake depression and drilling of the Lake Umroi sediments were carried out, and the radiocarbon dating and data on stratigraphy of the lake sediments were obtained. The morphometric characteristics of the lake were specified based on echolocation. The chronology of stage regression of the recent mountain glaciation is discussed. The age of the Umroi Lake formation in the Aragats massif – about 7000 cal. BP – was determined using the radiocarbon (AMS) dating; it corresponds to the period of the glacier retreat from the terminal moraine of the Bühl stage (in Alpine terminology). The article analyzes published materials of preceding glaciomorphological studies in the Lesser Caucasus and the Aragats Massif. The hypothesis of stadial moraine relief formation on the slopes of the Aragats Massif during the Holocene is based on the Pettersson-Shnitnikov theoretical scheme, which was elaborated for Eurasian mountains. The possibilities of determining the relative age of the formation of moraine relief and lakes on the basis of paleolimnological research are shown. Forms of glacial relief include several generations of stadial terminal moraines and associated lacustrine basins, and reflect the cyclic dynamics of the recent glaciation retreat in the Aragats Massif in line with the centuries-long climatic rhythms of the Holocene. The radiocarbon (AMS) dating of lake sediments in mountain lakes combined with pollen and stratigraphic analysis of bottom sediments could be taken as the most representative approach for indirect identification of the age of adjacent moraine deposits and for studying the rhythmic variability of natural processes during the Holocene.

Key words: Armenian Plateau, Aragats Massif, glacial deposits, bottom sediments, AMS-dating, indicators

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-55-05008) and the Committee for Science of the RF Ministry of Education and Science (scientific project no. 18RF-045).

[1] St. Petersburg State University, Professor, D.Sc. in Geography; *e-mail*: ecolim@mail.ru
[2] Institute of Limnology RAS, St. Petersburg, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail*: tsapelko@mail.ru
[3] Institute of Limnology RAS, St. Petersburg, Leading Scientific Researcher, D.Sc. In Geography; *e-mail*: m.naumenko@limno.org.ru
[4] Yerevan State University, Yerevan, Republic of Armenia, Professor, D.Sc. in Geography; *e-mail*: vboynagryan@ysu.am

REFERENCES

Bal'yan S.P. Strukturnaya geomorfologiya Armyanskogo nagor'ya i okaimlyayushchikh oblastej [Structural geomorphology of the Armenian Plateau and surrounding territories]. Erevan, ESU Publ., 1969, 392 p. (In Russian)

Boynagryan V.R. Ozera Armyanskogo nagor'ya [Lakes of the Armenian Plateau]. Erevan, ESU Publ., 2007, 144 p. (In Russian)

Boynagryan V.R. Geomorfologiya Armyanskogo nagor'ya [Geomorphology of the Armenian Plateau]. Erevan, Asogik Publ., 2016. 650 p. (In Russian)

Boynagryan V.R., Sapelko T.V., Gabrielyan I.G., Sevast'yanov D.V. Sovremennaya izuchennost' istorii vysokogornykh ozer Armenii [Modern study of the Armenia high-mountain lakes history] *Izvestiya RGO*, 2018, vol. 150, iss. 6, p. 89–103. (In Russian)

Connor S.E., Kvavadze E.V. Modelling late Quaternary changes in plant distribution, vegetation and climate using pollen data from Georgia, Caucasus. *Journal of Biogeography,* 2008, no. 36, p. 529–545.

Haeberli W. & Holzhauser H. Alpin Glaciers Mass Changes During the Past Two Millennia. *Pages News*, 2003, vol. 11, no. 1, p. 13–15.

Hormes A., Muller B.U. The Alps with little ice: evidence for eight Holocene phases of reduced glacier extent in the Central Swiss Alps. *The Holocene*. 2001, vol. 11, no. 3, p. 255–265.

Istoriya ozer Sevan, Issyk-Kul', Balkhash, Zaisan i Aral [History of Sevan, Issyk-Kul', Balkhash, Zaisan and Aral lakes]. (Seriya Istoriya ozer SSSR). Leningrad, Nauka Publ., 1991, 304 p. (In Russian)

Ivy-Ochs S., Kerschner H., Maisch M., Christl M., Kubik P.W., Schluchter C. Latest Pleistocene and Holocene glacier variations in the European Alps. *Quaternary Science Reviews*, 2009, vol. 28, p. 2137–2149.

Joannin S., Ali A.A., Ollivier V., Roiron P., Peyron O., Chevaux S., Nahapetyan S., Ozalakyan P., Karakhanyan A., Chataigner C. Vegetation, fire and climate history of the Lesser Caucasus: a new Holocene record from Zarishat fen (Armenia) *Journal of Quaternary Science*, 2014, vol. 29, p. 70–82.

Kasser P. Switzerland and her Glaciers. From the Ice Age to the Present. Publ. by the Swiss NTO/ Edit. by Peter Kasser & Wilfried Haeberly. Geographical Publichers, Berne, 1981, 192 p.

Kotlyakov V.M., Serebryanny L.R., Solomina O.N. Climate change and glacier fluctuations of the last millennium in the south mountains of USSR. *Mountain Research and Development*, 1991, vol. 11, no. 1, p. 1–12.

Leroyer C, Joannin S, Aoustin D, Ali A, Peyron O, Ollivier V, Tozalakyan P, Karakhanyan A, Jude F. Mid Holocene vegetation reconstruction from Vanevan peat (south-eastern shore of Lake Sevan, Armenia). *Quaternary International*, 2016, vol. 395, p. 5–18.

Lichkov B.L. K kharakteristike geomorfologii i stratigrafii Alageza. Ch. 1. Alagez [Description of geomorphology and stratigraphy of the Alagez (Aragats)], vol. 1, AN SSSR i UVKh Arm. SSR Publ., Moscow, 1931, 62 p. (In Russian)

Maksimov E.V. Deglyatsiatsiya massiva Aragats v Armenii [Deglaciation of the Aragats Massif, Armenia]. *MGI*, 1970, no. 16, p. 184–191. (In Russian)

Maksimov E.V. Ritmicheskie sostavlyayushchie v rezhime vysokogornykh ozer Srednei Azii [Rythmic components of the regime of high-mountain lakes of Middle Asia]. *Vestn. Leningr. un-ta*, 1983, no. 6, p. 52–65. (In Russian)

Marcott A. Shaun & Shacun Jeremy. Holocene climate change and its context for the future. *Past Global Changes Pages Magazine*, 2015, vol. 23, no. 1, 28 p.

Ollivier V., Joannin S., Roiron P., Nahapetyan S., Chataigner C. Travertinization and Holocene morphogenesis in Armenia: a reading grid of rapid climatic changes impact on the landscape and societies between 9500–4000 cal. BP in the Circumcaspian regions. *European Archaeologist*, 2011, vol. 36, p. 26–31.

Pettersson O. The tidal force. Geograf. Annal., Arg. XII, 1930, 21 p.

Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Ramsey C.B., Grootes P.M., IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 55(4), 2013, p 1869–1887.

Sapelko T.V., Boynagryan V.R., Gabrielyan I.G., Naumenko M.A., Sevast'yanov D.V., Piloyan A.S., Margaryan L.A. [The Holocene in Armenia according to preliminary results of the complex investigations of high-mountain lakes]. *Morfologicheskaya evolyutsiya i stratigraficheskie problemy. Materialy LXV sessii Paleontologicheskogo obshchestva pri RAN* [Morphological evolution and stratigraphical issues. Proceedings of the 65th Sessian of the RAS Paleontological Society]. St. Peterburg, VSEGEI Publ., 2019, p. 181–183. (In Russian)

Sapelko T.V., Boynagryan V.R., Naumenko M.A., Sevastyanov D.V., Gabrielyan I.G., Piloyan A.S., Margaryan L.A., Aleksandrin M.Y., Terekhov A.V. First Multy-Proxy Studies of High-Mountain Lakes in Armenia: Preliminary Results. *Geography, Environment, Sustainability*, 2019, vol. 12, no. 4, p. 272–284. DOI: 10.24057/2071-9388-2019-87.

Sayadyan Yu.V. Noveishaya geologicheskaya istoriya Armenii [Recent geological history of Armenia]. Erevan, Gitutyun Publ. NAN RA, 2009, 357 p. (In Russian)

Serebryanny L.R., Solomina O.N. Glaciers and climate of the mountains of the former USSR during the neoglacial. *Mountain Research and Development*, 1996, vol. 16, no. 2, p. 157–166.

Serebryannyi L.R., Golodkovskaya N.A., Orlov A.V., Malyasova E.S., Il'ves E.O. Kolebaniya lednikov i protsessy morenonakopleniya na Tsentral'nom Kavkaze [Oscillation of glaciers and moraine accumulation processes in the Central Caucasus]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 216 p. (In Russian)

Serebryannyi L.R., Orlov A.V., Solomina O.N. Moreny – istochnik glyatsiologicheskoi informatsii [Moraines as a source of glaciological information]. Moscow, Nauka Publ., 1989, 240 p. (In Russian)

Sevastyanov D., Sapelko T., Subetto D., Boynagryan V.R. Alpine lakes – cumulative information systems and indicators of climate changes Paleolimnology of Northern Eurasia, *Proceeding of the International conference «Paleolimnology of Northen Eurasia»*, 21–25 Sept., Karelian Researcher Centre RAS, Petrozavodsk, 2014, p. 24–26.

Sevast'yanov D.V. [Mountain lakes of Middle Asia as indicators of variability of natural processes] *Ozero Issyk-Kul' i tendentsii ego prirodnogo razvitiya* [The Issyk Kul Lake and the trends of its natural evolution]. Leningrad, Nauka Publ., 1986, p. 200–219. (In Russian)

Sevast'yanov D.V. O nekotorykh zakonomernostyakh razvitiya vysokogornykh ozer Tyan'-Shanya i ikh paleogeograficheskom znachenii [Some regularities of the evolution of high-mountain lakes in Tien Shan Mountains and their paleogeographical importance] *Izvestiya RGO*, 1979, vol. 111, no. 6, p. 495–500. (In Russian)

Sevast'yanov D.V., Sapelko T.V., Naumenko M.A., Boynagryan V.R. [High-mountain lakes as indicators of the rythmics of natural processes] *Geografiya: razvitie nauki i obrazovaniya* [Geography: evolution and science and education]. Sankt-Petersburg, 2019, p. 491–497. (In Russian)

Shnitnikov A.V. [Theoretical bases of the centuries-long variability of the general moisture conditions and the state of lakes – at present and in the future] *Problemy issledovaniya krupnykh ozer* [Investigation of large lakes]. Leningrad, Nauka Publ., 1985, p. 5–22. (In Russian)

Shnitnikov A.V. Izmenchivost' obshchei uvlazhnennosti materikov Severnogo polushariya [Variability of the general moisture conditions for the continents of the Northern hemisphere]. Zap. Geogr. o-va SSSR. Novaya seriya. T. 16. Moscow-Leningrad, 1957, 337 p. (In Russian)

Shnitnikov A.V. Vnutrivekovaya izmenchivost' obshchei uvlazhnennosti [Interdecadal variability of the general moisture conditions]. Leningrad, 1969, 246 p. (In Russian)

Solomina O.N. Kolebaniya lednikov v golotsene i vozmozhnoe vliyanie na nikh orbital'nogo signala, solnechnoi i vulkanicheskoi aktivnosti i antropogennogo vozdeistviya [Holocene glacier variations and their potential orbital, solar, volcanic and anthropogenic forcing] *Led i Sneg*, 2014, vol. 3(127), p. 81–90. (In Russian)

Solomina O.N. Stadial'naya degradatsiya gornykh lednikov v golotsene [Stadial degradation of mountain glaciers during the Holocene] *Izvestiya AN SSSR*, 1992, vol. 5, p. 13–24. (In Russian)

Solomina O.N., Kalugin I.A., Aleksandrin M.Yu., Bushueva I.S., Darin A.V., Dolgova E.A., Zhomelli V., Ivanov M.N., Matskovskii V.V., Ovchinnikov D.V., Pavlova I.O., Razumovskii L.V., Chepurnaya A.A. Burenie osadkov oz. Karakel' (dolina r. Teberda) i perspektivy rekonstruktsii istorii oledeneniya i klimata golotsena na Kavkaze [Coring of Karakel' Lake sediments (Teberda River valley) and prospects for reconstruction of glaciation and Holocene climate history in the Caucasus]. *Led i Sneg*, 2013, vol. 2(122), p. 102–111. (In Russian)

Subetto D.A., Sevast'yanov D.V., Sapelko T.V., Boynagryan V.Z., Grekov I.M. Ozera kak nakopitel'nye informatsionnye sistemy i indikatory klimata [Lakes as accumulative information systems and climate indicators] *Astrakhanskii vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*, 2017, no. 4(42), p. 4–14. (In Russian)

Tushinskii G.K. Ritmy v dinamike oledeneniya i snezhnosti Kavkaza [Rhythms of glaciation and snow amount dynamics], *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geogr.,* 1960, no. 1, p. 1–36. (In Russian)

Tushinskii G.K., Turmanina V.I. Ritmy glyatsial'nykh protsessov poslednego tysyacheletiya [Rhythms of glacial processes during the recent millennium]. Moscow, MSU Publ., 1979, p. 154–160. (In Russian)

Received 07.08.2019
Revised 16.04.2020
Accepted 25.08.2020

ЭВОЛЮЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ

УДК 551.435.8:551.782.23

П.В. Оксиненко[1], А.В. Лавров[2]

ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕЩЕРЫ ТАВРИДА – ПАМЯТНИКА ФАУНЫ ПОЗВОНОЧНЫХ ПОЗДНЕГО ВИЛЛАФРАНКА И ЕЕ ПАЛЕОНТОЛОГИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ

Открытая в июне 2018 г. в ходе прокладки автомагистрали горизонтальная пещера Таврида в Крыму (пос. Зуя) является уникальным палеонтологическим памятником. Изучены этапы формирования пещеры и тафоценозов. Исследование выполнено с использованием геоморфологических, стратиграфических, геологических, структурных и палеонтологических методов.

Зоогенный комплекс ископаемых позвоночных из отложений пещеры соответствует поздневиллафранкской фауне Восточного Средиземноморья (MNQ18–MNQ19), псекупскому фаунистическому комплексу (1,8–1,5 млн лет). В состав фаунистического комплекса входят Hystrix vinogradovi, Hystrix refossa, Pachycrocuta brevirostris, Canis sp., Homotherium crenatidens, Megantereon sp., Ursus etruscus, Archidiskodon sp., Equus sp., Elasmotherium caucasicum, Stephanorhinus sp., Paracamelus gigas., Leptobos sp., Bison sp., Gazellospira torticornis, Arvernoceros verestchagini, Pontoceros sp., Hypolagus brachignatus, Pachiostrutio dmanisensis.

Начальный, корозионно-эрозионный этап формирования пещеры относится к раннему плиоцену, киммерийскому времени жаркого и влажного тропического климата. В плиоценовой эпиплатформенной системе поверхностного стока, в низменных условиях, до 50 м над уровнем моря, вычленился подрусловой канал. Эоценовые известняки дренировались по трещинам, кавернозным пластам по контакту с песчаниками баррема фреатическими каналами, в дальнейшем сформировав свободно текущими водами объемные галереи. Отличительная черта пещеры – эрозионное многоуровневое строение русла с уровнями начального и финального меандрирования.

Аккумулятивный этап развития охватывает интервал с эоплейстоцена по неоплейстоцен. Осушенная реликтовая пещера была вскрыта боковой долиной и в условиях саван заполнена субаэральными аллохтонными продуктами гипергенеза terra rossa и выветривания известняков. На этом этапе в пещере обитала крупная колония Chiroptera, и сформировался зоогенный тафоценоз поздневиллафранкской фауны. Выделено семь основных этапов осадконакопления и внеэтапные сейсмогенерации.

Консервационный этап развития с тампонированием входа предположительно начался в кромере (0,5–0,7 млн лет). В условиях умеренного климата продукты десквамации и серые гумусированные суглинки полностью закрыли вход в пещеру. Плотное тампонирование всех карстовых каналов привело к прекращению воздухообмена полости с наружной приземной атмосферой.

Ключевые слова: палеонтология, псекупский комплекс, меандрирование, terra rossa, этапы развития, субаэральные отложения, Предгорный Крым

Введение. Пещера, получившая имя «Таврида», открыта при строительных работах в Крыму в июне 2018 года. Объект является новым палеонтологическим местонахождением фауны позвоночных позднего виллафранка (псекупский фаунистический комплекс), вторым на территории России [Лопатин и др., 2019; Вислобокова и др., 2019]. Процесс формирования пещеры представляет интерес для специалистов в области палеогеографии и палеонтологии.

Генезис древних карстовых полостей Предгорного Крыма первоначально объективно трактовался коррозионно-эрозионным или эпигенным [Дублянский, Ломаев, 1980; Душевский, Лысенко, 1982]. В последнее время получила развитие теория артезианского, гипогенного спелеогенеза для всего района шовной зоны Предгорного Крыма [Климчук и др., 2013]. Следует указать, что гипогенные процессы требуют условий замкнутой гидрологической модели, и в естественной среде возможны в редких случаях, требующих сочетания многих геологических и гидрологических факторов [Максимович, 1963; Palmer, 1991; The Physical Geography …, 2009]. Морфология пещеры и массива палеогеновых известняков несет ярко выраженные черты эпигенного карста: трещинное заложение, нисходящие каналы от погребенного карстового поля в коррозионные купола, эрозионное многоуровневое меандровое строение русла по всему сечению. Полость заложена в зоне разновременных тектонических подвижек и деформаций и полностью идентична другим круп-

[1] Независимый исследователь, ООО «Арт-Добрыня», генеральный директор; *e-mail*: delakeu@mail.ru

[2] Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН, лаборатория млекопитающих, канд. биол. н., ст. науч. с.; *e-mail*: lavrov_av@inbox.ru

ным горизонтальным пещерам Предгорного Крыма. На примере пещеры можно продемонстрировать предпосылки и этапы формирования крупной подземной полости, реликтовые режимы тропического климата и процесс формирования тафоценоза [Вахрушев, 2001; Piccini, 2003].

Методы исследования. Исследование выполнено комплексным методом с использованием геоморфологических, стратиграфических, геологических, структурных и палеонтологических методов. Геоморфологические методы включали фиксирование, измерение и анализ мезо- и микроформ рельефа, соотношений коррозионно-эрозионной зоны питания с эрозионными руслами и коррозионными куполами, размещение заполнений карстовых полостей и их последовательности. Проведены стратиграфические наблюдения над заполнением донной части и положением палеонтологических находок, дополненные шурфовкой (заложены 3 шурфа) в разных частях пещеры. Геологические исследования выявили многочисленные и разновременные тектонические нарушения мелководных отложений на фоне сложного глубинного строения в шовной зоне Предгорного Крыма. Определение палеонтологического материала выполнено сотрудниками ПИН РАН, их результаты частично опубликованы [Лопатин и др., 2019, Лопатин, 2019а; Лопатин, 2019б; Вислобокова и др., 2019; Zelenkov et al., 2019].

Для ортогональных планов в работе использована Военно-топографическая карта Таврической губернии 1895 года масштаба 1:21 000 с сечением 2 сажени (4,3 м) (листы XIII-14, XIII-15), что сделано из-за наиболее точного отражения на ней рельефа местности.

Результаты исследования и их обсуждение. Пещера Таврида расположена на Северном макросклоне Крымских гор в пределах Внутренней горной гряды и междуречья рек Бештерек и Фундуклы на высоте 320–340 м над уровнем моря. Район залегания пещеры относится к долине р. Фундуклы, впадающей в р. Зуя бассейна р. Салгир. Палеогеновая куэста здесь сглаживается и, поворачивая к северу, представляет собой левый пологий борт расширенной палеодолины Фундуклы–Зуи.

Полость заложена в пачке нуммулитовых известняков симферопольского яруса мощностью до 25 м, имеющих пологий угол падения к северо-западу до 5° (рис. 1). Известняки представлены ритмичной толщей крепких и более мягких разностей, состоящей из крупных раковин Nummulites с редкими включениями Gryphaeostreis и Echinoideis, сильно трещиноваты в вертикальных и горизонтальных плоскостях, кавернозны и характеризуются как отложения мелководной отмели [Lygina et al., 2016]. Подстилает палеогеновые известняки мощная терригенная толща полимиктовых гравелитов, песчаников, песков и глин нижнего мела, именуемая мазанской свитой. Кровля мазанской свиты на границе с вышележащими известняками палеогена является хорошим водоупором [Самсонов, 1961; Геология СССР, 1969].

Мел-палеогеновая основа Внутренней гряды междуречья Бештерека–Фундуклы с прилегающей долиной Зуи и субсеквентной долиной характеризуется многочисленными тектоническими нарушениями миоцен-четвертичного поднятия Горного Крыма: надвигами, сжатиями, сбросами, субширотными и субмеридиональными, предопределяющими развитие рельефа [Душевский, Лысенко, 1978; Казанцев, 1981]. В заложенной неподалеку параметрической скважине Симферопольская-1 прослеживается чрезвычайно сложное глубинное строение, трактуемое как коллизионная сутура принадвигового автохтона с пологим северным наклоном [Юдин и др., 2006].

Поверх палеогеновых известняков над пещерой сохранились континентальные желто-бурые глины и алевриты плиоцена, представляющие собой ископаемые почвы переменно-влажного климата саванн и являющиеся одним из дериватов красноцветов [Муратов, 1954]. Для красноцветных отложений, или terra rosa, характерно высокое содержание красных железистых гидрослюдистых смешанослойных минералов, что свидетельствует о формировании красноцветов из магматических кор выветривания в теплых гумидных условиях. Источником одновременного формирования лессовых красноземов на суше и морских железных руд в киммерийской Крымско-Кавказской железорудной провинции был Украинский кристаллический щит [Холодов и др., 2014].

С инфильтрацией подвижных химических соединений из terra rossa связано высокое зональное ожелезнение трещиноватого массива палеогеновых известняков, многочисленных каверн, а также реликты заполнения трещинной зоны красными и желто-бурыми глинами. Глины, в свою очередь, перекрыты плиоценовой карбонатной корой каличе, связанной с быстрым иссяканием в сухих и жарких условиях поверхностных и грунтовых вод, поступавших с Крымских гор [Добровольский, 1968]. Карбонатные коры образуются в семиаридных, а иногда даже в гумидных обстановках тропиков [Холодов, 2007]. Непосредственно на коре каличе и денудированной поверхности палеогеновых известняков залегают размытые плейстоценовые аллювиальные галечники преимущественно кварцевого состава с примесью песчаников и эффузивных пород.

Дорожной выемкой вскрыт поперечный разрез верхней части водораздела Калму-Кара – Фундуклы по линии северо-восток – юго-запад на глубину до 5 м на протяжении 400 м. Под корой каличе и желто-бурыми глинами открыто обширное реликтовое карстовое поле покрытого карста с вертикальными трубчатыми полостями и множеством коррозионных камер округлой формы (рис. 2, см. рис. 1). Карстовые пустоты диаметром от 1 до 30 см организованы в площадную вертикально ориентированную губчатую структуру. Расположены пустоты чрезвычайно плотно – 0,2–0,4 м друг от друга, пронизывая всю зону трещиноватости в верхней части (рис. 3). Все пустоты и вертикальные каналы плотно тампонированы желто-бурыми глинами и алевритами с присутствием красноцветных суглинков.

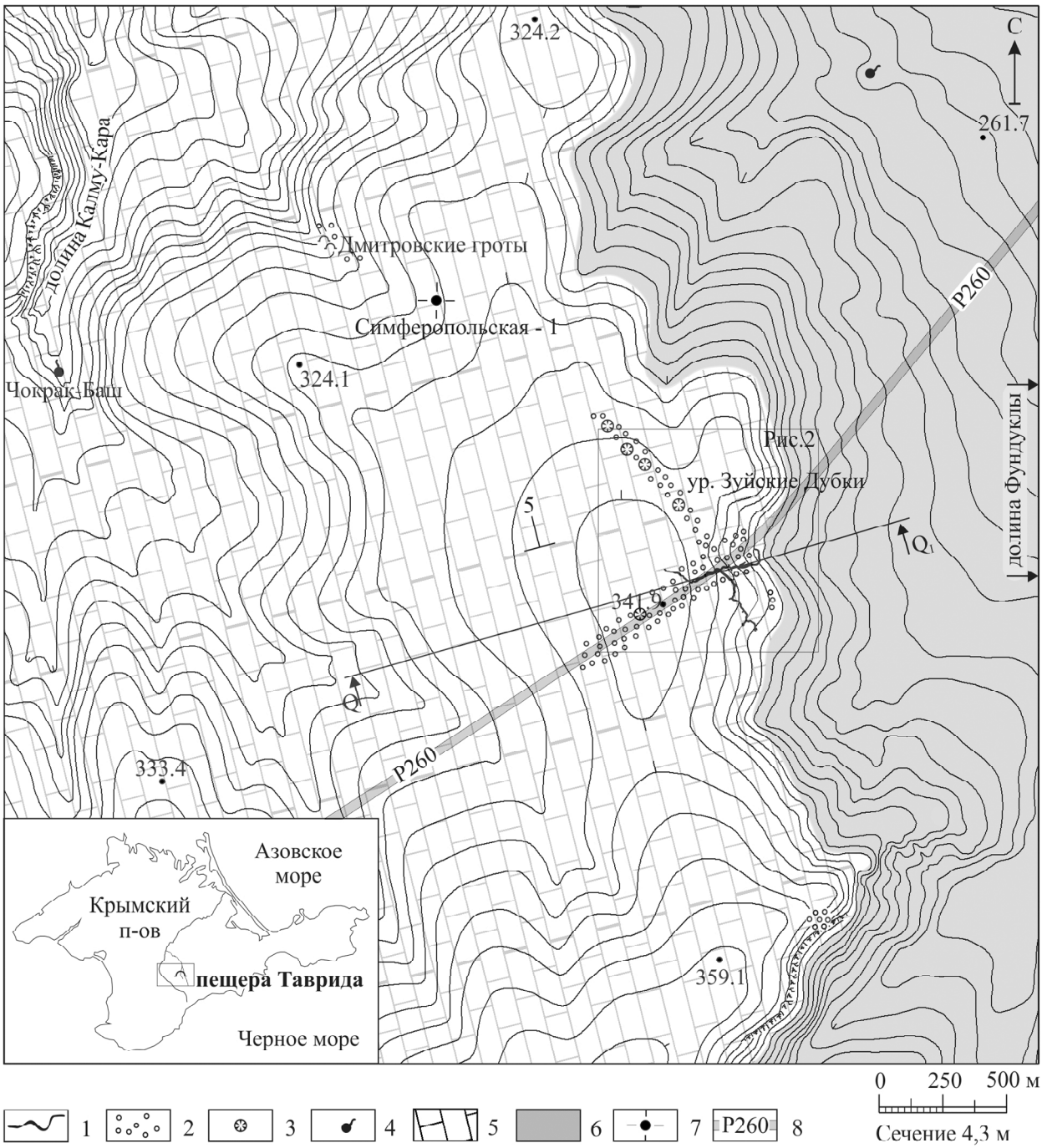

Рис. 1. Карта участка куэсты Внутренней гряды Крымских гор – водораздела долин Калму-Кара – Фундуклы с пещерой Таврида. Линия профиля Q–Q_I см. рис. 7. 1 – ортогональная проекция пещеры Таврида; 2 – участки сплошной реликтовой закарстованности, тампонированное поле покрытого карста с вертикальными трубчатыми полостями; 3 – провальные воронки; 4 – нисходящие источники; 5 – известняки нуммулитовые эоценовые под элювиально-делювиальным чехлом; 6 – гравелиты, песчаники и пески нижнемеловые под делювиальным чехлом; 7 – скважина параметрическая; 8 – автодорога Р260 «Таврида»

Fig. 1. The map of the cuesta part of the Inner Ridge of the Crimean Mountains – the watershed of the Kalmu-Kara – Fundukly valley, with the Tavrida Cave. Profile line Q-QI see Fig. 7. 1 – orthogonal projection of the Tavrida Cave; 2 – areas of covered relict karst field with vertical tubular cavities; 3 – collapse sinkholes; 4 – downstream water sources; 5 – numulitic Eocene limestones under eluvial-deluvial cover; 6 – gravelites, quartzites and sands of Lower Cretacious under deluvial cover; 7 – parametric well; 8 – P260 «Tavrida» highway

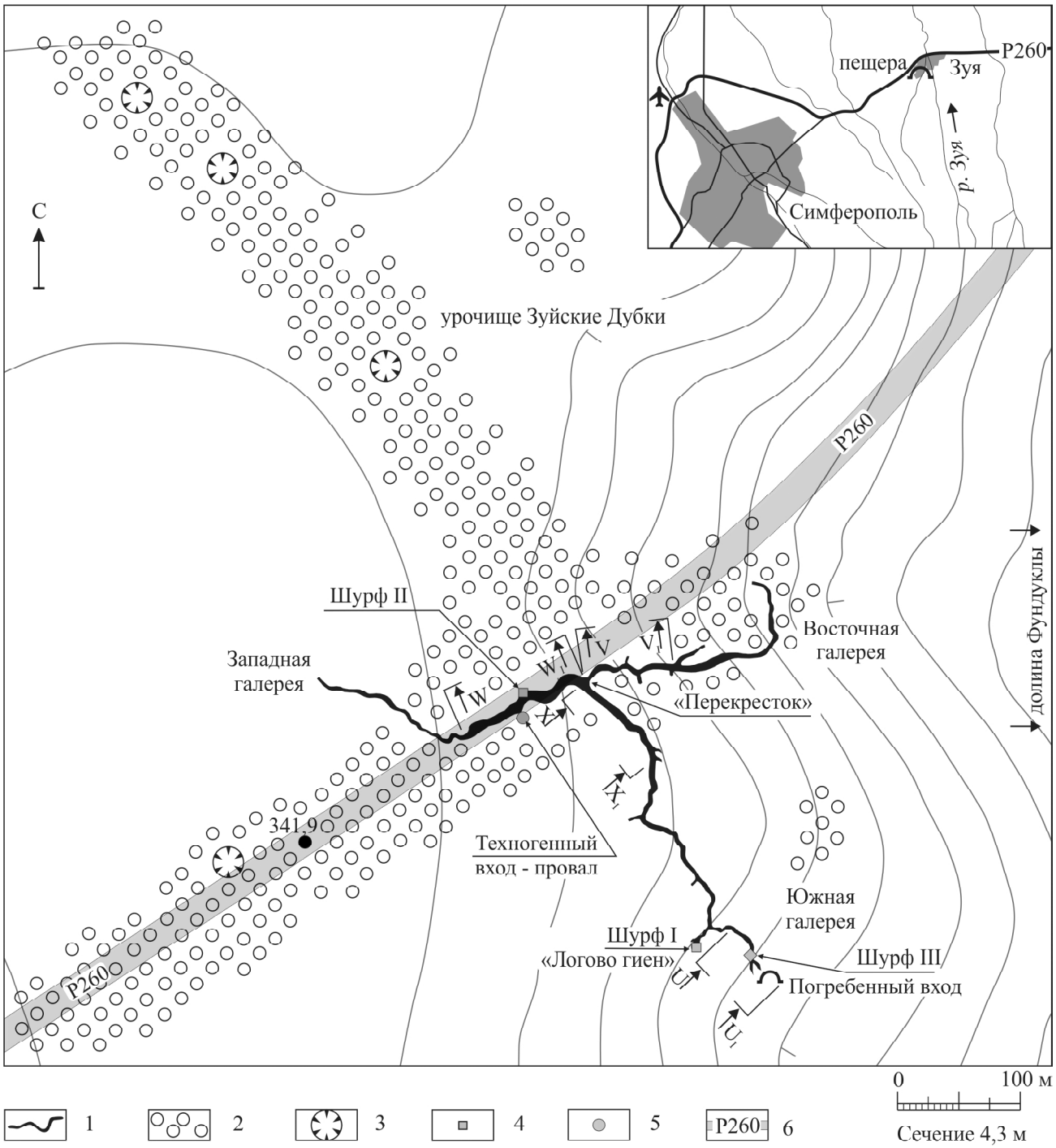

Рис. 2. Карта пещеры Таврида и ее окрестностей. 1 – ортогональная проекция пещеры; 2 – зоны реликтовой закарстованности, поле покрытого карста с тампонированными вертикальными трубчатыми полостями; 3 – провальные воронки, картированные и погребенные; 4 – шурфы; 5 – техногенный вход; 6 – автодорога Р260 «Таврида»

Fig. 2. Map of the Taurida Cave and its environs. 1 – orthogonal projection of the cave; 2 –zones of relict karst, the field of covered karst with backfilled vertical tubular cavities; 3 – collapse sinkholes, mapped and buried; 4 – pits; 5 – man-maid entry; 6 – P260 «Tavrida» highway

На глубине 5–6 м количество камер и каналов уменьшается, расстояние между ними увеличивается, они объединяются в большие камеры диаметром до 1–2 м, с выходом в вертикальные разгрузочные колодцы свода пещерной галереи, либо переходят в трещины. Нисходящие каналы и колодцы в продольном сечении состоят из последовательно соединенных сферических коррозионных камер.

Горизонтальные галереи главного хода имеют переменное сечение: субтреугольное по вертикальным трещинам и овальное по пластам с множеством раскрывающихся в своде каналов и колодцев (рис. 4,

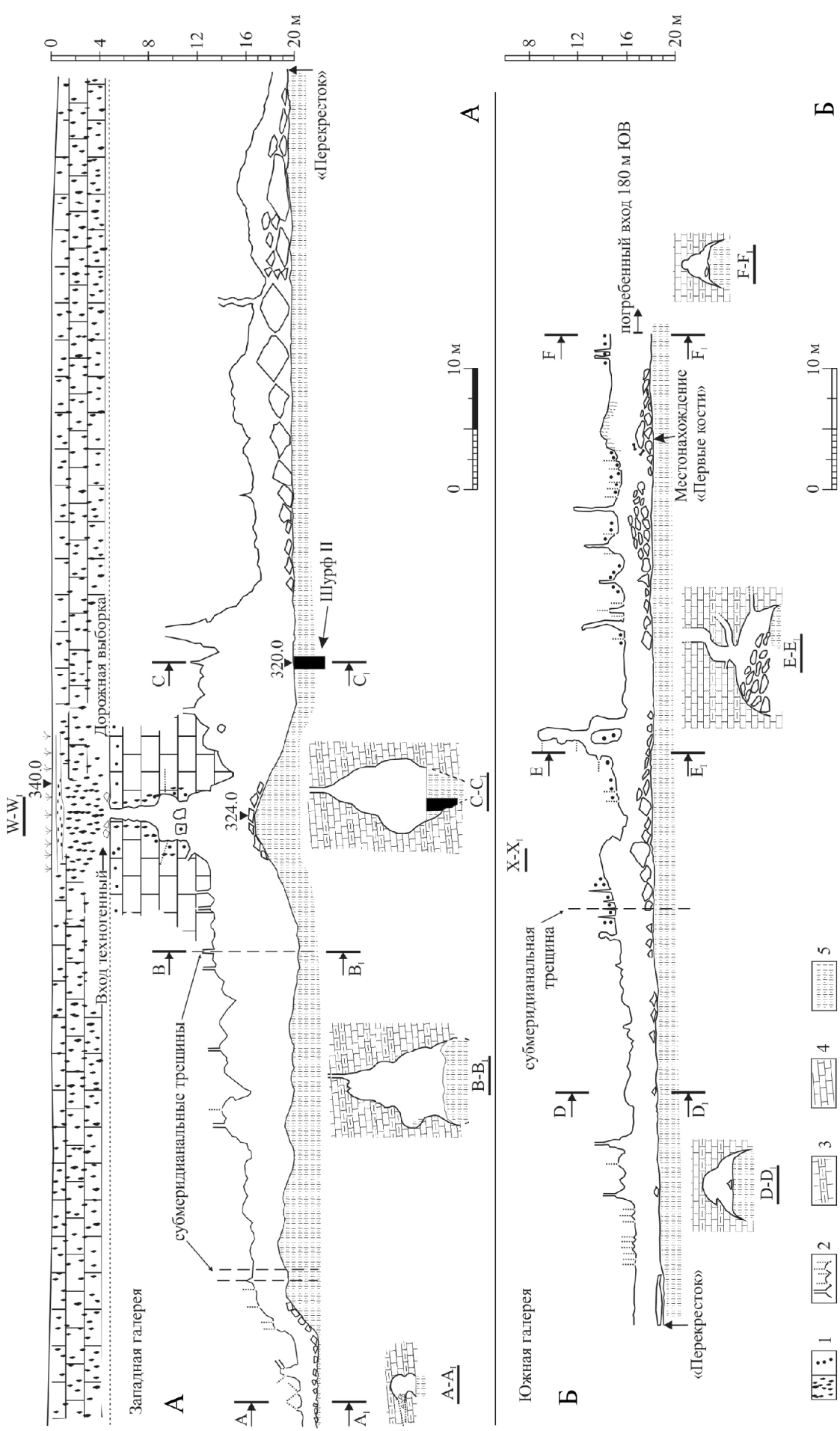

Рис. 3. Продольные разрезы с серией поперечных сечений участков галерей: А – Западной (W-W$_1$), Б – Южной (X-X$_1$). 1 – губчатая карстовая структура с вертикальными коррозионными камерами диаметром 0,1–0,2 м, тампонированными желто-бурыми глинами; 2 – открытые карстовые каналы в ассоциации с карстовыми коррозионными куполами; 3 – известняк нуммулитовый плотный; 4 – известняк нуммулитовый слабо литифицированный; 5 – аллохтонные субаэральные пещерные отложения с ископаемым гуано

Fig. 3. Longitudinal sections with a series of cross-sections of gallery sectors: A – Western (W-W$_1$), Б – South (X-X$_1$). 1 – spongy karst structure with vertical corrosion chambers 0,1–0,2 m in diameter, backfilled with yellow-brown clays; 2 – open karst canales in association with karst corrosion domes; 3 – dense nummulite limestone; 4 – weakly lithified nummulite limestone; 5 – Ilochthonous subaerial cave deposits with fossil guano

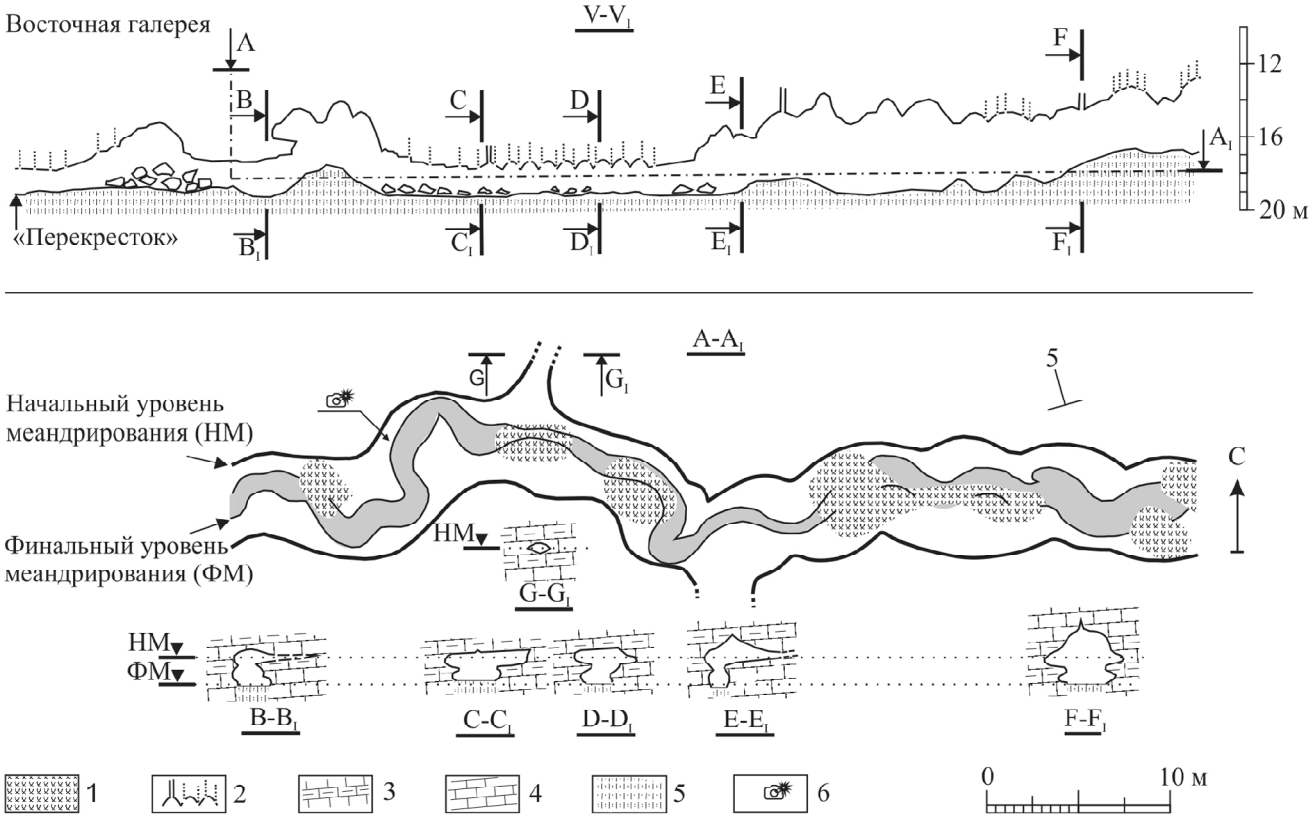

Рис. 4. Разрез продольный V-V$_I$ участка Восточной галереи, план меандров с уровнями начального и финального меандрирования с поперечными сечениями галлереи. 1 – насыпные конуса аллохтонных субаэральных пещерных отложений; 2 – открытые вертикальные карстовые каналы нисходящие и купола карстовые коррозионные; 3 – известняк нуммулитовый литифицированный; 4 – известняк нуммулитовый слабо литифицированный; 5 – аллохтонные субаэральные пещерные отложения с ископаемым гуано; 6 – точка съемки фотографии на рис. 9

Fig. 4. Axial section of the Eastern Gallery part (V–VI), plan of meanders with levels of initial and final meandering, with cross sections of the gallery. 1 – bulk cones of allochthonous subaerial cave deposits; 2 – open vertical karst canales and karst corrosion domes; 3 – dense nummulite limestone; 4 – weakly lithified nummulite limestone; 5 – allochthonous subaerial cave deposits with fossil guano; 6 – camera position of the photo in Fig. 9

см. рис. 3). По стенам в мягких кавернозных разностях известняков к галереям примыкают под разными углами субгоризонтальные каналы питания. Для значительной части каналов характерно сильное ожелезнение в виде сложных концентрических корок, больших пластинчатых и трубчатых железистых минеральных образований, частью отпрепарированных коррозией из вмещавших их известняков до сложных форм типа «труба в трубе». Местами присутствует сплошное инфильтрационное ожелезнение стенок и срезанные закрытые минералами железа каналы.

План пещеры имеет трехлучевой вид с субширотно простирающимися Восточной и Западной галереями и примыкающей к ним (так называемый «Перекресток») субмеридиональной Южной. Восточная и Южная галереи сходятся под углом 50° и продолжаются Западной галереей с максимальными объемами на протяжении около 100 м. В ортогональной проекции Западная галерея приходится на центр обширного карстового поля, являвшегося основной зоной поглощения воды с последующим транзитом по разломам и падению пластов (см. рис. 2).

На участках галерей, где нет перекрывающих сводовых и стеновых обвалов или значительных отложений красно-бурых суглинков, фиксируется эрозионная меандровая форма русла реликтовых водотоков. Меандры, врезанные в скалу с ограничением сектора меандрирования до 120°, имеют сложное строение: тонкие шпоры вихревого входа и выхода, следы продольного и поперечного смещения при постепенном понижении уровня в виде нависающих тонких закраин. Зафиксирован протяженный участок меандров в Восточной галерее с двумя четко разделенными периодами эрозии – начальным (НМ) и финальным (ФМ) уровнями меандрирования (см. рис. 4). Сохранившиеся в сводовой части Восточной галереи фрагменты меандрового русла периода НМ (этапа зарождения полости) в большей части остальных галерей разрушены коррозией, в отличие от периода ФМ, сохранившегося повсеместно. Сечение канала НМ овальное по напластованию с примыкающими субгоризонтальными каналами. Канал ФМ является эрозионным врезом из уровня НМ с шагом излучин меандров от 2 до 6 м. Меандровая деформация русла форми-

руется свободно текущими водными потоками при незначительных углах наклона (доли градуса) и высокой транспортирующей силе [Великанов, 1948; Попов, 2012]. Несмотря на недостаточность имеющихся данных о поведении потока в скальных грунтах, в отличие от многочисленных данных по несвязанным грунтам, здесь мы наблюдаем аналогичные последним формы свободного меандрирования.

Изменение поперечного сечения меандровых эрозионных русел можно рассматривать как индикатор этапов аридизации климата в процессе формирования пещеры. Смена климатических этапов выражена в четко определяемых, как минимум, двух уровнях меандрирования. Аналогичные меандровые формы двух уровней НМ и ФМ, выполненные строго по напластованию, присутствуют в других субгоризонтальных пещерах эоценовых известняков Внутренней гряды: Алима, Лисьей, Змеиной. Также эти признаки выражены в пещерах палеоценовых известняков западной части Внутренней гряды: Беш-кош, Таврской, Мангупской. Углы залегания пород (от 5 до 10°), вмещающих эти полости, не соответствуют природным условиям возникновения меандрирования, не превышающим долей градуса. На наш взгляд допустима версия моноклинальной деформации положения реликтовых горизонтальных мезоформ рельефа, образованных свободнотекущими водами. Можно предположить близкий возраст зарождения генетически сходных форм в начальный период осушения миоценовых отложений в раннем плиоцене до поднятия Предгорного Крыма.

Современная гидрография Предгорья и Крымских гор – прямолинейная (с общим направлением на северо-запад и север), отображающая тектонические нарушения, полностью перестроила первоначальную плиоценовую систему стока, сформированную в низменных эпиплатформенных условиях. Последняя сохранилась непогребенным реликтом на отдельных пограничных участках Равнинного Крыма и Внешней гряды. Примером являются некоторые врезанные в миоценовые известняки левые притоки низовий долин рек Кача, Альма и сухие меандровые палеодолины Симферопольского поднятия.

В пещере определяется реликтовое направление разгрузки вод на запад по уклону единого уровня меандров со сходящимися углами двух раздельных потоков Восточной и Южной галерей – с востока и юга вниз к Западной галерее. Именно Западная галерея имеет максимальное поперечное сечение шириной 6 и высотой 8 м от уровня заполнения, плюс более 2,5 м высоты под аллохтонным субаэральным заполнением по материалам шурфа II. Интерполирование частично вскрытого шурфом сечения донной части дает максимальную высоту Западной галереи до 12–13 м (см. рис. 3).

Остаточные тонкослоистые красноцветные глины водной генерации периодов НМ–ФМ, представляющие собой тонко отмученные континентальные суглинки и лессы, сохранились в деградированном виде и минимальном количестве в некоторых боковых каналах. Дно основных галерей пещеры заполнено аллохтонными субаэральными рыхлыми красно-бурыми отложениями, предварительно определяемыми как переработанные покровные красноцветные реликтовые почвы саванн. В значительной части отложения вмещают останки ископаемых Chiroptera и продукт их жизнедеятельности – гуано. Местами галереи загромождены сейсмогравитационными обвалами кровли пещеры. Рыхлые отложения формируют насыпные покатые конусы и гряды как прислоненные к стенам, так и обособленные по центру галерей, равномерно залегают поверх древних обвалов (с образованием снизу значительных пустот) и перекрываются более молодыми обвалами. Такое расположение свидетельствует об их воздушном, субаэральном механическом отложении. Плотность рыхлых суглинков составляет в среднем до 0,5 г/см^3 при повсеместном участии ископаемого гуано Chiroptera. При открытии пещеры до начала функционирования новой дорожной выборки как коллектора осадков был зафиксирован феномен низкой влажности под землей в большей части галерей. Этим была обусловлена очень низкая плотность грунтов в пещере – они не выдерживали тяжести человека, и исследователь постоянно проваливался на 0,3–0,5 м в слой суглинков. В течении месяца, в результате попадания воды и нарушения исходного микроклимата в пещере, путем гидратации произошло увлажнение грунтов на глубину не менее 0,5 м. Поток посетителей привел к быстрому уплотнению приповерхностных слоев суглинков по основным направлениям движения в галереях пещеры.

В ряде мест, где донные отложения образуют значительную толщу, вдоль нависающих стен наблюдается боковое симметричное отседание рыхлых суглинков с образованием вдольстеновых щелей, наклонно уходящих вниз на просматриваемую глубину более двух метров и шириной до 0,2–0,3 м. Там же, где стены вертикальны, такое же смещение массы отложений вниз на 0,2–0,3 м фиксируется по стеновым карбонатным коркам отрыва. Присутствует и отседание крупных стеновых блоков как по трещинам, субпараллельным стенам, так и по напластованию. Причиной этих явлений служит растворение основания нуммулитовых известняков с последующей статической разгрузкой возникших напряжений и остаточный вынос вещества по погребенному дну пещеры, которое находится на контакте с гравелитами и песчаниками мазанской свиты.

В Южной галерее с боковыми камерами было обнаружено большое количество костей ископаемых животных, залегавших в рыхлом однородном поверхностном слое суглинков, обозначенном как костеносный слой BL (рис. 5), на поверхности и с минимальным перекрытием, иногда непосредственно на скальных выступах. Наибольшее скопление костей *in situ* первоначально выявлено в обособленной боковой камере размером около 3×6 м, получившей условное наименование «Логово гиен» (см. рис. 2). Здесь был заложен палеонтологический шурф под

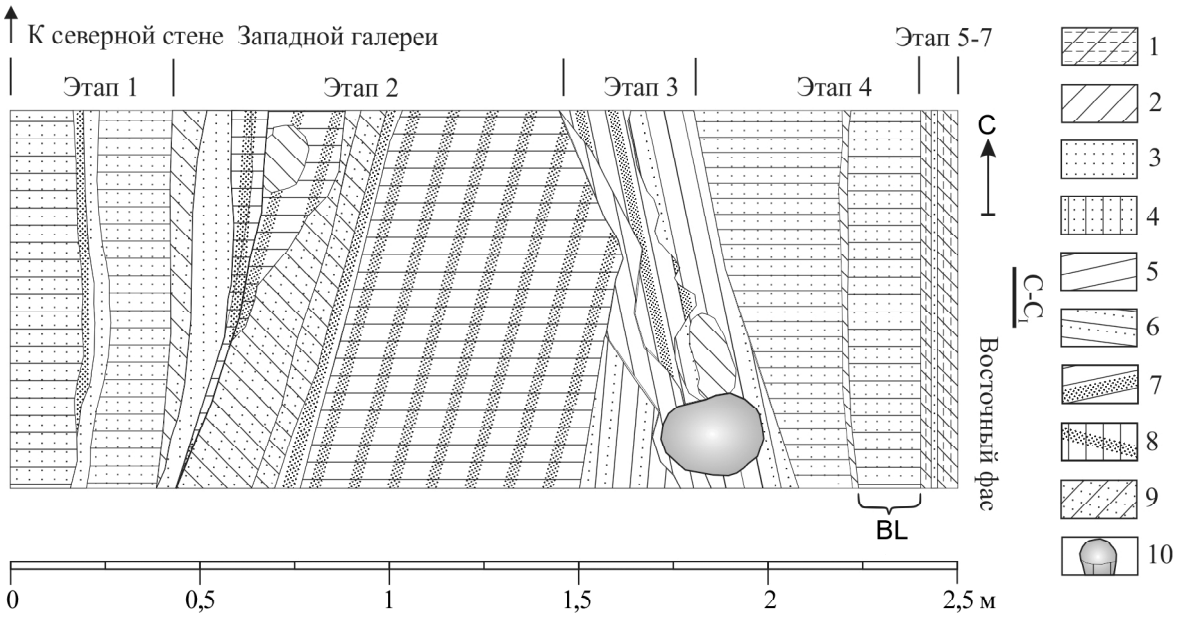

Рис. 5. Стратиграфия шурфа II в центре Западной галереи по сечению линии C–C_1. 1 – суглинок коричневый; 2 – суглинок белесый, желтоватый; 3 – желтовато-бурая известняковая супесь и дресва; 4 – лессовидные красно-бурые суглинки с песчано-карбонатными прослоями; 5 – коллювиальные комковатые серые глины; 6 – глины серые с супесью и красно-бурыми суглинками; 7 – гуано ископаемое черно-бурое; 8 – красно-бурое ископаемое гуано в слоистых лессовидных суглинках; 9 – супесь серо-бурая, желтоватая, карбонатная слоистая; 10 – нора реликтовая с частичным заполнением рыхлым коричневым лессовидным суглинком. BL – костеносный слой

Fig. 5. Stratigraphy of pit II in the center of the Western Gallery, along the C–C_1 line. 1 – brown loam; 2 – loamy whitish, yellowish; 3 – yellowish-brown limestone sandy loam and gruss; 4 – loesslike red-brown loams with sandy-carbonate interlayers; 5 – colluvial lumpy gray clay; 6 – gray clay with sandy loam and red-brown loam; 7 – fossil guano, black and brown; 8 – red-brown fossil guano in layered loesslike loams; 9 – sandy-brown, yellowish, carbonate sandy loam; 10 – relict burrow with partial filling with loose brown loesslike loam. BL – bone-bearing layer

номером I (см. рис. 2), показавший мощность слоя BL более 1,6 м. Однородные по всей глубине шурфа аллохтонные субаэральные рыхлые красно-бурые отложения содержали до 30% к объему костей позвоночных и их мелких фрагментов. Положение костей менялось от глубины залегания: до 0,5 м они залегали субгоризонтально, от 0,5 до 1 м были под углом к горизонту, а ниже (до отметки 1,6 м) длинные кости конечностей копытных были ориентированы преимущественно субвертикально. В шурфе I отмечено уменьшение плотности грунта по мере нарастания глубины, что обусловило медленное гравитационное изменение положения костного материала и смещение материала в нижние горизонты отложений, вероятно в ходе псевдосуффозионных процессов. Отмечена плохая сохранность костей, соприкасавшихся с коренными нуммулитовыми известняками, подверженными процессам поверхностной дезинтеграции. Напротив, кости, не имеющие контакта со стенами, хорошо минерализированы.

Ископаемый комплекс соответствует позднеВиллафранкским фаунам восточной части Средиземноморской палеозоогеографической подобласти (MNQ18–MNQ19), псекупскому фаунистическому комплексу (1,8–1,5 млн л. н.) [Лопатин, 2019б; Лопатин, 2019в; Лопатин и др., 2019; Вислобокова и др., 2019; Вислобокова и др., 2020]. На его состав наложил отпечаток фактор положения Крыма на стыке двух палеозоогеографических подобластей Палеарктики. Часть родов этой фауны имела широкое распространение в Палеарктике и в Средиземноморской подобласти. В составе фаунистического комплекса определены: Hystrix vinogradovi, Hystrix alexejevi, Pachycrocuta brevirostris, Canis sp., Homotherium crenatidens, Megantereon sp., Ursus etruscus, Archidiskodon sp., Equus sp., Elasmotherium caucasicum, Stephanorhinus sp., Paracamelus gigas., Leptobos sp., Bison sp., Gazellospira torticornis, Arvernoceros verestchagini и Pontoceros sp., Hypolagus brachignatus. В составе комплекса присутствуют Elasmotherium и Paracamelus – животные, широко распространенные в азиатской части Палеарктики. Кроме того, здесь обнаружен гигантский страус Pachiostrutio dmanisensis, описанный ранее из палеолитического местонахождения Дманиси в Закавказье [Vekua, 2013; Zelenkov et al., 2019]. Эволюционный уровень ряда видов (Arvernoceros verestchagini, Gazellospira torticornis) показывает возможную принадлежность фауны Тавриды к первой половине позднего виллафранка. Нижний возрастной рубеж позднего виллафранка определяется появлением в регионе Bison и Pontoceros, а верхний – исчезновением Leptobos. Совместное присутствие Leptobos и раннего Bison (Eobison) позволяет предполагать, что обсуждаемая фауна существовала в интервале 1,8–1,5 млн л. н. [Лопатин и др., 2019]. Материалы

из пещеры Таврида расширяют представления о псекупском фаунистическом комплексе. Наблюдаемая сортировка костного материала (преобладают кости конечностей и их дробленые фрагменты), скопления костей в боковых камерах, обилие копролитов (установлена принадлежность части их гиенам), указывают на зоогенное формирование тафоценоза хищными млекопитающими. Пещера длительное время использовалась крупными хищниками (Hyaenidae, Ursidae и Machairodontinae). В этот период здесь же обитали мелкие и крупные грызуны (обнаружены норы Hystrix), мелкие хищники (Mustelidae). Фоновой группой постоянно были летучие мыши (Chiroptera), первоначально заселившие пещеру и давшие наибольшую массу костных остатков и гуано.

Для исследования седиментационных процессов в толще пещерных суглинков были заложены еще два стратиграфических шурфа 1×1 м. Под номером II, глубиной 2,5 м – в Западной галерее (см. рис. 2, 5) рядом с провальным техногенным входом. Под номером III, глубиной 2 м – в дальней части Южной галереи в непосредственной близости от погребенного плейстоценового входа (рис. 6, см. рис. 2). Стратиграфия шурфов хорошо согласуется между собой и дает общую картину этапов формирования отложений. Суммарный взаимодополняющий профиль рыхлых отложений составляет 4,5 м. Шурфы не «добиты» до истинного дна пещеры по ряду объективных причин. В стратиграфии выделяются семь основных этапов осадконакопления снизу вверх: 1) субгоризонтальные лессовидные суглинки с мелкими прослоями супесей, гуано и костями Chiroptera (более 0,5 м, вероятно до 2 м); 2) моноклинально залегающие к оси галереи слои супесей, суглинков и значительная толща гуано и костей Chiroptera в лессовидных суглинках – поступление материала от стен к оси (1 м); 3) моноклинальные от оси галереи слои суглинков и глин с прослоями гуано и костями Chiroptera – поступление материала от оси к стенам (0,4 м); 4) субгоризонтальные красно-бурые лессовидные суглинки с супесью, неравномерно вмещающие местами слой BL (0,6 м); 5) субгоризонтальные суглинки, супеси, дресва десквамационная (1 м); 6) комковатая супесь гумусированная (0,6 м); 7) комковатый суглинок гумусированный (0,2–0,6 м) (см. рис. 5, 6). Следов водных потоков не фиксируется на всей глубине исследованных отложений трех шурфов. Покровные слои этапа 5–7 на большей части протяженности Южной и Восточной галерей полностью отсутствуют.

Первый и второй этапы осадконакопления отражают возникновение и разрастание крупной колонии Chiroptera во вскрытой реликтовой полости. Третий трактуется как следствие сейсмотектонических подвижек, приведших к временной активизации осевых каналов поступления глинистых материалов. Четвертый этап со слоем BL датируется зонами MNQ18–MNQ19 (1,8–1,5 млн л. н.) по фауне позвоночных [Лопатин, 2019а; Лопатин и др., 2019; Вислобокова и др., 2019]. Основываясь на этой дати-

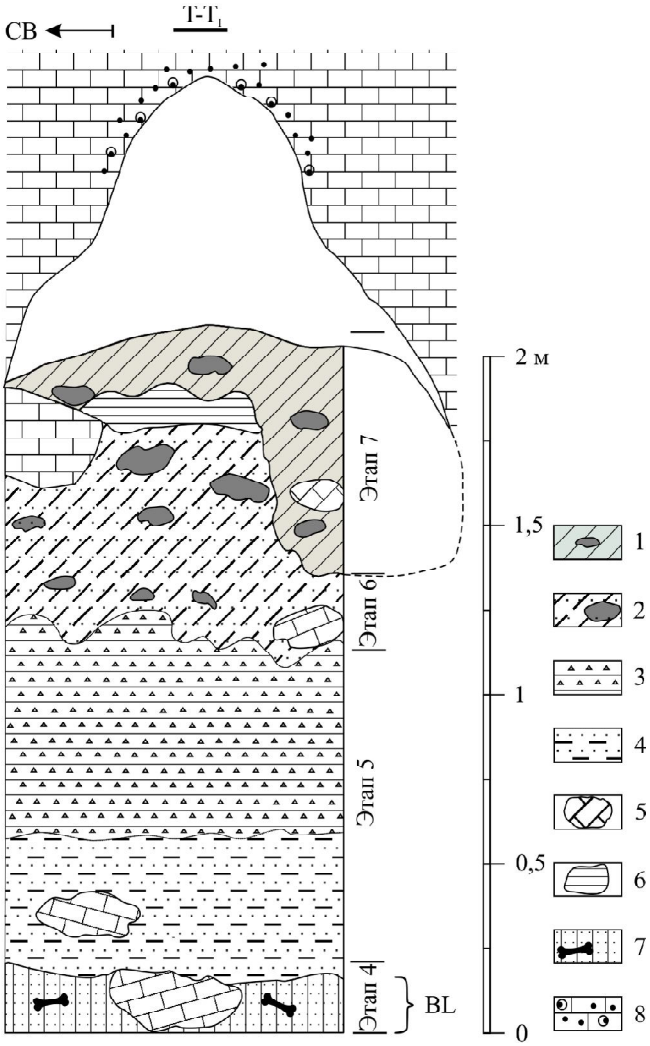

Рис. 6. Стратиграфия шурфа III у погребенного реликтового входа в Южной галерее по сечению Т–Т$_I$. 1 – суглинок темно-серый гумусированный комковатый, с черными глинистыми отдельностями; 2 – супесь темно-серая гумусированная пятнисто-комковатая с включением гуано и черных глинистых отдельностей; 3 – дресва нуммулитовых известняков с прослоями карбонатной супеси; 4 – суглинок лессовидный желтый с прослоями карбонатной супеси; 5 – обломки кровли известняка; 6 – суглинок коричневый коллювиальный; 7 – костеносный лессовидный суглинок красно-бурый; 8 – кавернозный нуммулитовый известняк. BL – костеносный слой

Fig. 6. Stratigraphy of pit III near the buried relic entry of the South Gallery, along the T–T$_I$ line. 1 – loam dark gray humous lumpy, with black clay fragments; 2 – sandy loam dark gray humous spotty-lumpy, with guano and black clay fragments; 3 – nummulite limestone gruss, with layers of carbonate sandy loam; 4 – loesslike loam with layers of carbonate sandy loam; 5 – limestone top fragments; 6 – brown colluvial loam; 7 – bone-bearing red-brown loesslike loam; 8 – cavernous nummulite limestone. BL – bone-bearing layer

ровке, пятый этап мы предположительно относим к обширному ступенчатому гляциалу гюнц, завершившемуся временем морской изотопной стадии МИС 22. Шестой и седьмой этапы, таким образом, относятся к интергляциалу кромер МИС 21/19. В это время Южная галерея еще имела выход на днев-

ную поверхность и использовалась млекопитающими (см. рис. 2). Зафиксировано несколько внеэтапных сейсмогенераций крупных сводовых обвалов как перекрытых отложениями четвертого этапа осадконакопления (MNQ18–MNQ19), так и перекрывающих их.

Полученные данные позволяют в целом реконструировать три этапа развития пещеры (рис. 7). Предпосылками для начала первого этапа развития стали поднятия Горного Крыма в миоцене с отступлением Сарматского моря и последовавшие поднятия южного края Скифской платформы и северных склонов Крымских гор в раннем плиоцене. Снятие незначительного чехла миоценовых отложений с палеогеновой отмели проходило одновременно с возникновением первичного минимального уклона и формированием ложбин стока на северном макросклоне гор. Подчиненное поднятие прилегающих к Горному Крыму областей повлекло за собой появление субширотных трещинных зон сжатия по простиранию, сбросов и сдвигов по падению [Геология СССР, 1969; Душевский, Лысенко, 1978; Казанцев, 1981]. Начался первый этап развития пещеры, эрозионно-коррозионное рельефообразование. Фильтрация плоскостного стока по трещинам сжатия сформировала субширотную полосу сплошного раскарстовывания палеогеновых слоистых известняков, дополненную карстом субмеридиональных нарушений. Зона трещинноватости дренировалась также по кавернозным пластам и контакту с нижележащим водоупором фреатическими каналами, в дальнейшем сформировав свободнотекущими водами объемные галереи. Это зафиксировано в уровнях меандрирования и менявшихся сечениях эрозионного потока. К концу плиоцена в условиях жаркого климата из продуктов выветривания магматических пород [Холодов и др., 2014] образовывалось большое количество силикатов и красных железистых гидрослюдистых смешаннослойных минералов, которые в перемещенном виде образовали на склонах гор почвенные красноцветы в вариациях с желто-бурыми алевритами. Сохранившиеся локальными фрагментами такие погребенные красноцветные суглинки и глины широко известны в Предгорном и Горном Крыму, а в Равнинном Крыму формируют переотложенную мощную «таврскую свиту» глин, алевритов и галечников [Геология СССР, 1969; Добровольский, 1968]. Во влажном климате из ферраллитных красноцветных почв происходит интенсивная фильтрация по трещинам и кавернам кислых жезезосодержащих растворов и миграция солей, возникает объемное промывное раскарстовывание в условиях частично покрытого карста. К концу этапа относится карстовое препарирование железистых минеральных образований, пластинчатых по трещинам и трубчатых по кавернам и каналам, крайне необычных для пещер Крыма. Дальнейшая аридизация климата завершила первый этап развития – рельефообразование. В финале этапа произошло тампонирование пустот обширного карстового поля желто-бурыми глинами и формирование коры каличе. Затем – намыв экзотических галечников с яркими следами «пустынного загара», прекрасную иллюстрацию которому можно наблюдать сейчас в многометровом техногенном разрезе синхронно тампонированной карстовой шахты (вновь названной нами – шахта «Погребенная») с координатами 45°1′4,46″ с. ш.; 34°15′18,67″ в. д. в 3,5 км к юго-за-

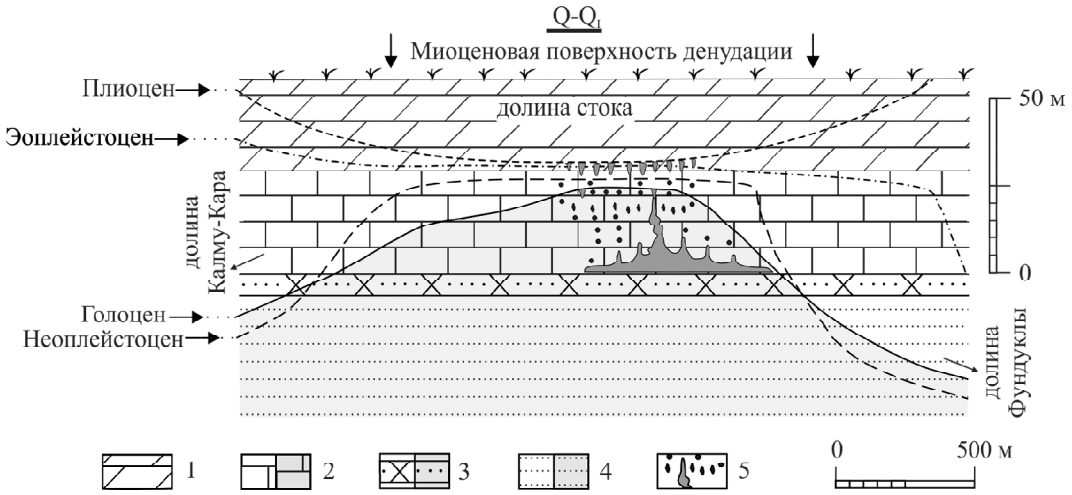

Рис. 7. Схематический профиль Q-Q$_I$. Этапы формирования водораздела Калму-Кара – Фундуклы с пещерой Таврида. 1 – миоценовые мергели и глины, денудированные; 2 – эоценовые нуммулитовые известняки (с денудированными участками); 3 – гравелиты и песчаники нижнемеловые; 4 – пески кварцевые нижнемеловые (с денудированными участками); 5 – трещинно-карстовая система поглощения плиоценовой долины

Fig. 7. Schematic profile Q–Q$_I$. Stages of the formation of the Kalma-Kara – Fundukly watershed with the Tavrida Cave. 1 – Miocene marles and clays, denudated; 2 – Eocene numulite limestones (with denudated fragments); 3 – Lower Cretaceous gravelites and sandstones; 4 – Lower Cretaceous quartz sands (with denudated fragments); 5 – fissure-karst system of the Pliocene valley absorption

паду от пещеры Таврида. Все события укладываются в рамки позднеплиоценового этапа рельефообразования, палеомагнитную эпоху Гаусс, МИС 119-107. Рельеф был выработанным, развитие долин приблизилось к профилю равновесия. Жаркий климат в эпизоде формирования первичного рельефа с очень влажного сменился на семиаридный и аридный.

Второй этап развития – аккумулятивный – начался с последовавшим в эоплейстоцене очередным поднятием Горного Крыма и изменением рельефа области. Тектоническое поднятие и деформации нарушили равновесный субгоризонтальный рельеф, сместив ложбину стока восточнее, что привело к формированию широкой, но неглубокой долины Фундуклы–Зуи (глубина вреза 50–80 м, ширина до 5 км) и полному осушению карстовой системы. По космическим снимкам в долине Фундуклы–Зуи дешифрируются многочисленные неотектонические линейные разрывные структуры по падению пластов. При расширении долины был денудирован обнаженный край палеогеновых известняков с верховьями Южной галереи пещеры и открыт горизонтальный вход в борту долины (рис. 8). Все полученные по результатам шурфовки этапы осадконакопления, за небольшим исключением остаточных глин водной генерации первого этапа, относятся ко второму субаэральному этапу развития пещеры. По ряду косвенных признаков можно предполагать одновременное формирование на плакорной поверхности нескольких провальных воронок, имевших дополнительные поноры в полость (см. рис. 1, 2). Значительная часть пещеры попала в эпифотическую зону с постепенным заполнением галерей лессовидными продуктами переотложения terra rossa и их гипергенеза. В полости в это время обосновалась крупная колония Chiroptera. Значительная роль ископаемого гуано колонии в формировании заполнения наибольших объемов Западной галереи видна в стратиграфии шурфа II (см. рис. 5). Кости Chiroptera и продукты их жизнедеятельности стали дополнительным источником минерализации полости, наряду со значительным количеством железа и марганца ранее поступившим внутрь из terra rossa.

В финале второго этапа (осадконакопления) пещеру использовали для обитания крупные и мелкие хищники, формируя ее главный зоогенный тафоценоз. Влияние абиотических факторов формирования тафоценозов не зафиксировано. Продолжала существовать уже меньшая колония Chiroptera, в глубине галерей поселились крупные грызуны, чьи сохранившиеся норы вскрыты шурфом II в центре Западной галереи (предположительно Hystrix [Лопатин, 2019а]) (см. рис. 1, 5). Фауна крупных млекопитающих относится к позднему виллафранку Западной Европы (зоны MNQ18–MNQ19) и псекупскому фаунистическому комплексу 1,8–1,5 млн л. н., интервалу между палеомагнитными эпизодами Реюньон и Кобб-Маунтин [Лопатин и др., 2019]. После формирования тафоценозов осадконакопление аллохтонных субаэральных отложений быстро завершается, что вероятно связано с тампонированием провальных воронок и вскрытых каналов, после чего прервалась циркуляция воздуха. Колония Chiroptera прекратила существование немногим позже образования тафоценозов. Окончательное перекрытие обширного кар-

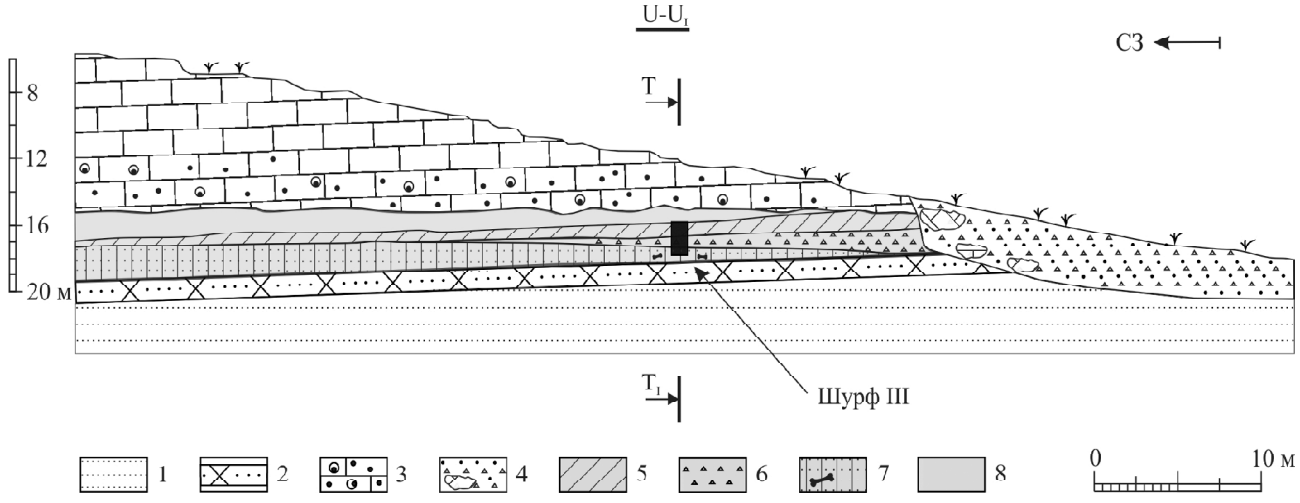

Рис. 8. Продольный профиль U-U$_I$ привходовой погребенной части Южной галереи пещеры Таврида. 1 – пески кварцевые нижнемеловые; 2 – гравелиты и песчаники нижнемеловые; 3 – известняки нуммулитовые эоценовые, кавернозные; 4 – делювий, образованный нуммулитовыми известняками, гравелитами, песчаниками, галечниками; заполнение полости пещеры: 5 – суглинок темно-серый гумусированный; 6 – дресва нуммулитовых известняков с прослоями карбонатной супеси; 7 – красно-бурый лессовидный суглинок с фрагментированными костями млекопитающих; 8 – полость пещеры

Fig. 8. The longitudinal profile U–U$_I$ of the near-inlet buried part of the Southern Gallery of the Tavrida Cave. 1 – Lower Cretaceous quartz sands; 2 – Lower Cretaceous sandstones and gravelites; 3 – Eocene numulitic cavernous limestones; 4 – deluvium of nummulite limestones, gravelites, sandstones and pebbles. Filling of the cave: 5 – humous dark gray loam; 6 – nummulite limestone gruss with layers of carbonate sandy loam; 7 – red-brown loesslike loam with fragmented mammalian bones; 8 – cavity of the cave

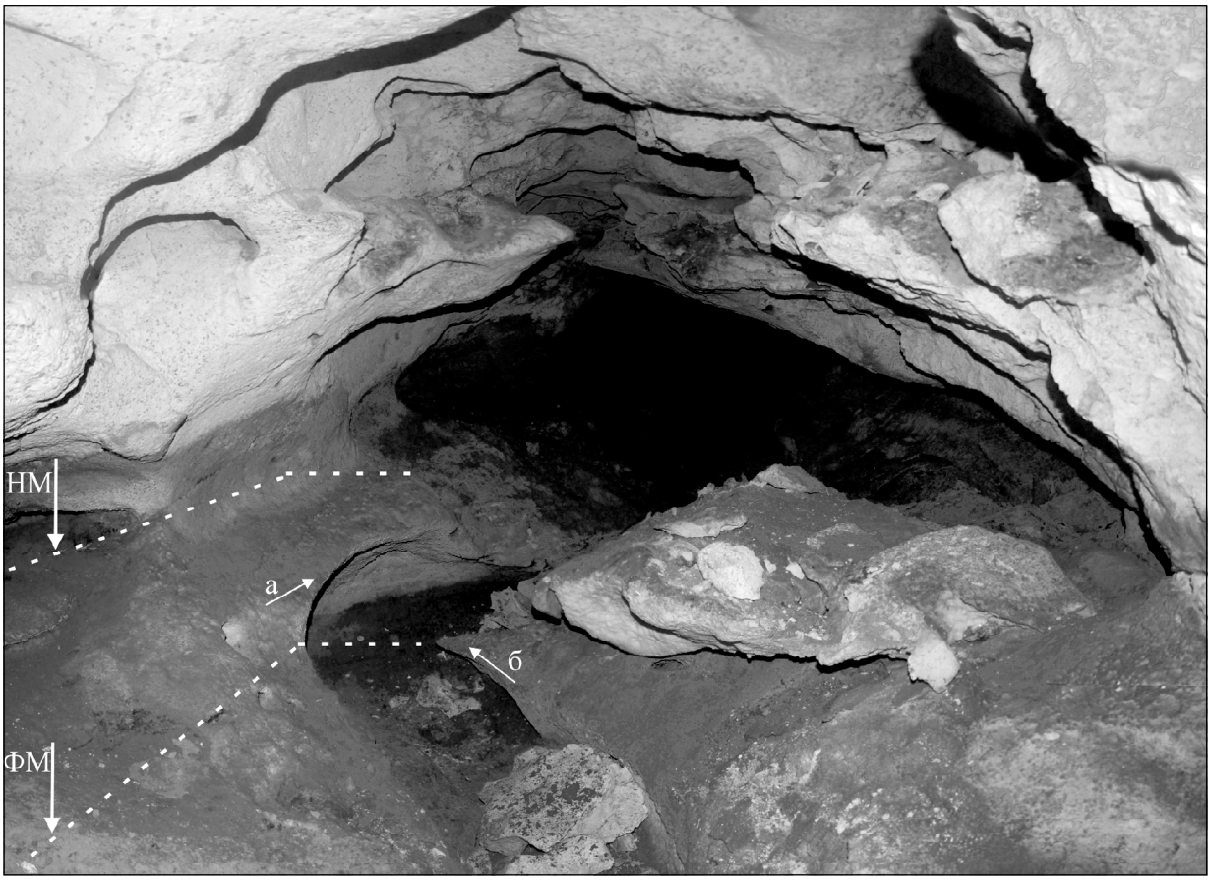

Рис. 9. Эрозионное меандровое русло с уровнями НМ и ФМ, Восточная галерея. Отчетливо виден изгиб русла с закраиной и шпорой, на переднем плане обрушившийся фрагмент кровли известняка, потолок корродирован по трещине заложения; а) закраина меандра; б) шпора меандра

Fig. 9. Erosion meander channel with the levels of IM and FM, East Gallery. The bend of the channel with the edge and spur is clearly visible, as well as the collapsed fragment of the limestone roof in the foreground; the ceiling is corroded along the crack of the foundation; a) rim of the meander; b) spur meander

стового поля и провальных воронок континентальными желто-бурыми глинами и каличе оказалось плотным и водонепроницаемым. В большую часть галерей пещеры не поступала влага и экзогенные вещества. Создался феномен консервации полости пещеры, где была низкая влажность и условия замедленного накопления субаэральных отложений, вплоть до момента образования техногенного провального входа над Западной галереей.

Натечные образования отсутствуют, но существует крайне медленный процесс поверхностной дезинтеграции известняков до пластичного состояния на глубину 1–2 см, с сохранением микрорельефа времени MNQ18–MNQ19 с отчетливыми следами когтей млекопитающих. В иные условия попал небольшой участок Южной галереи возле вскрытого входа, использовавшийся животными значительно дольше. Стратиграфия шурфа III (см. рис. 6) показывает, что на красно-бурые лессовидные суглинки четвертого этапа осадконакопления, содержащие кости крупных млекопитающих MNQ18–MNQ19, с потолка и стен обрушиваются куски известняка, суглинки успевают перекрыть их тонким слоем в 1–2 см и затем резко перекрываются большим слоем известкового желто-бурого детритусового песка, супесями и десквамационной дресвой температурного выветривания пятого этапа осадконакопления. Финал второго этапа развития (аккумуляции) можно предварительно связать со стадией МИС22, завершившей гляциал гюнц (МИС 34/30/28/26/24) 0,9–0,866 млн л. н. Это предположение возможно в дальнейшем уточнить по содержащейся в дресве пятого этапа осадконакопления фауне многочисленных мелких грызунов. Залегание слоев в отложениях гляциала строго горизонтальное со скачкообразным нарастанием гранулометрических характеристик снизу вверх по разрезу (см. рис. 6). Отложения гляциала (пятый этап) с несогласием перекрываются гумусированной супесью шестого этапа осадконакопления, граница слоев имеет вид ломаной линии с амплитудой 5–6 см. В подошве шестого этапа отложений нарушена гравитационная послойная седиментация. Структура их нижней части комковатая, пятнистая, что присуще перемешанным грунтам. Характер неровного контакта трактуется как следствие регулярного физического воздействия животных на отложения шестого этапа.

Завершением финала второго этапа развития пещеры и началом третьего этапа – консервации – становится время заполнения привходовой зоны Южной галереи серыми пылеватыми гумусированными суглинками седьмого этапа осадконакопления. На рубеже второго и третьего этапов развития пещеры функционировал протоптанный в отложениях шестого этапа осадконакопления коридор при входе, трактуемый как ход животных шириной 0,6 м, вскрытый в шурфе III. Полное тампонирование привходовой части Южной галереи суглинками внутри и мощным делювиальным шлейфом снаружи склона в сочетании с предыдущим тампонированием массива конца плиоцена привело к прекращению воздухообмена полости с наружной приземной атмосферой. Предварительно третий этап развития пещеры (консервация) относится к неоплейстоцену, времени интергляциала кромер (МИС21/19, 0,7–0,5 млн л. н.), на основании отсутствия отложений 5–7 этапов осадконакопления на всем протяжении пещеры, кроме привходовой зоны и редких активизированных трещинных зон. Отложения 5–7 этапа осадконакопления залегают непосредственно на слое, датируемом поздним виллафранком Западной Европы (зоны MNQ18–MNQ19), псекупским фаунистическим комплексом (1,8–1,5 млн л. н.), отражают резкие смены климата и содержат фауну мелких млекопитающих для дальнейшего уточнения датировок.

Шурф III позволяет оценить поперечное сечение входа Южной галереи, ныне погребенного, более чем в 6 м^2 на этапе позднего виллафранка и не менее 3–4 м^2 в интергляциале кромер (МИС21/19). Кроме того, слоистая структура нуммулитовых известняков делает возможным образование ориентированного на юго-восток широкого десквамационного входного грота в период функционирования реликтового входа, финал которого приходится на средний плейстоцен. Современный профиль склона восточной экспозиции на месте погребенного входа имеет крутизну до 15°, что нехарактерно для куэсты и объясняется фациальными особенностями и литогенетической трещиноватостью мелководных известняков, приведшими к выполаживанию в голоцене. Нужно указать, что природный микрорельеф склона нарушен в XIX в. обширными поверхностными каменоломнями.

Выводы:

– палеонтологическое местонахождение в пещере Таврида является уникальным памятником эоплейстоцена, вторым на территории России, с четко выраженной стратиграфией отложений, позволяющей значительно уточнить палеогеографические условия понтийского региона. Синхронность фауны позвоночных пещеры Таврида с раннепалеолитическим местонахождением Дманиси (1,88–1,77 млн л. н.) в Закавказье [Лопатин, 2019в; Zelenkov at al., 2019] позволяет рассматривать объект как потенциально перспективный для раннепалеолитических изысканий;

– моноклинально деформированная эрозионно-коррозионная меандровая геоморфология реликтовой плиоценовой карстовой полости с аллохтонным субаэральным плейстоценовым заполнением, дополняемая техногенным субсеквентным разрезом, позволяет более полно реконструировать эпизоды квартера Предгорного Крыма [Вахрушев, 2001];

– установлены предпосылки возникновения и три этапа развития пещеры Таврида. Первый этап – образования в трещинной зоне (корозионно-эрозионный) – относится к раннему плиоцену, киммерийскому ярусу. Второй этап – аккумулятивный – занимает интервал с эоплейстоцена по неоплейстоцен. Третий этап – консервационный (тампонирование входа в Южную галерею, накопление мелкодисперсных серых пылеватых суглинков поверх слоев 5–6) – длится предположительно с интергляциала кромер (МИС21/19, 0,7–0,5 млн. л. н.) до современности;

– единство условий, форм и этапов развития редких карстовых пещер Предгорного Крыма (Лисья, Алима, Змеиная, Беш-кош, Таврская, Мангупская) и пещеры Таврида дает основание утверждать синхронность их возникновения в условиях эпигенной низкой платформенной области и влажного тропического климата раннего плиоцена. Ранее для начала формирования пещер крымского Предгорья предлагался более широкий плиоцен-раннеплейстоценовый временной интервал [Душевский, Лысенко, 1982];

– корозионно-эрозионные мезо- и микроформы реликтового подземного рельефа (нисходящие каналы от карстового поля, купола, каверны и пр.) в сочетании с эрозионными (меандрами, шпорами, закраинами) в вертикально структурированной карстовой системе трещинной зоны соответствуют эпигенному спелеогенезу эпиплатформенной области.

Благодарности. Работа частично выполнена за счет средств Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Эволюция органического мира. Роль и влияние планетарных процессов», а также проекта РФФИ № 19-05-00982. Авторы выражают глубокую признательность за помощь всем участникам раскопок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вахрушев Б.А. Палеогеография Крыма в свете новейших карстолого-спелеологических исследований // Культура народов Причерноморья. 2001. № 17. С. 11–18.

Великанов М.А. Гидрология суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1948. 530 с.

Вислобокова И.А., Титов В.В., Лавров А.В., Гимранов Д.Б., Старцев Д.Б., Тарасенко К.К. Раннеплейстоценовые винторогие антилопы (Artiodactyla, Bovidae) из пещеры Таврида (Крым, Россия) // Палеонтол. журн. 2020. № 1. С. 78–88.

Вислобокова И.А., Титов В.В., Лавров А.В, Старцев Д.Б., Тарасенко К.К., Лопатин А.В. О находке большерогого оленя рода Arvernocerus в пещере Таврида в Крыму // ДАН. 2019. Т. 487. № 5. С. 596–599.

Геология СССР. Том VIII. Крым. Часть 1. М.: Недра, 1969. 576 с.

Добровольский В.Б. Красноцветные образования Крыма и их палеогеографическое значение // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 1968. № 1. С. 45–50.

Дублянский В.Н., Ломаев А.А. Карстовые пещеры Украины. К.: Наукова думка, 1980. 179 с.

Душевский В.П., Лысенко Н.И. О возрасте пещер Крымского Предгорья // Состояние, задачи и методы изучения глубинного карста СССР. М., 1982. С. 174.

Душевский В.П., Лысенко Н.И. Возраст разрывных нарушений Восточно-Крымского предгорья // Бюлл. МОИП. Отд. Геологии. 1978. Т. 53. Вып. 1. С. 51–53.

Казанцев Ю.В. Тектоника Крыма. М.: Наука, 1981. 112 с.

Климчук А.Б., Тимохина Е.И., Амеличев Г.Н., Дублянский Ю.В., Шпетль К. Гипогенный карст Предгорного Крыма и его геоморфологическая роль. Симферополь: ДИАЙПИ, 2013. 204 с.

Лопатин А.В. Дикобраз Hystrix (Acanthion) vinogradovi (Rodentia, Hystricidae) из раннеплейстоценового местонахождения Таврида в Крыму // ДАН. 2019а. Т. 486. № 6. С. 756–762.

Лопатин А.В. Hypolagus brachignatus (Lagomorpha, Leporidae) из нижнего плейстоцена пещеры Таврида в Крыму // ДАН. 2019б. Т. 486. № 5. С. 83–85.

Лопатин А.В. Затерянный мир Тавриды: древнейшая ископаемая пещерная фауна в Крыму // Природа. 2019в. № 6(1246). С. 53–61.

Лопатин А.В., Вислобокова И.А., Лавров А.В., Старцев Д.Б., Гимранов Д.О., Зеленков Н.В., Мащенко Е.Н., Сотникова М.В., Тарасенко К.К., Титов В.В. Пещера Таврида – новое местонахождение раннеплейстоценовых позвоночных в Крыму // ДАН. 2019. Т. 485. № 3. С. 381–385.

Максимович Г.А. Основы карстоведения. Том 1. Пермь: Пермское книжное издательство, 1963. 445 с.

Муратов М.В. О миоценовой и плиоценовой истории развития Крымского полуострова // Бюлл. МОИП. Отд. геол., 1954. Т. XXIX. Вып. 1. С. 3–20.

Попов И.В. Методологические основы гидроморфологической теории руслового процесса: Избранные труды. СПб.: Нестор-История, 2012. 304 с.

Самсонов Ф.П. Артезианские воды нижнемеловых отложений Крыма // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 1961. № 2. С. 105–117.

Холодов В.Н. Каличе – карбонатное пограничное почвенное новообразование // Литология и полезные ископаемые. 2007. № 3. С. 273–285.

Холодов В.Н., Голубовская Е.В., Недумов Р.И. Киммерийская железорудная провинция Причерноморья, условия ее формирования и перспективы // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2014. № 3(37). С. 5–35.

Юдин В.В., Гошовский С.В., Еременко Г.К. Геологическая интерпретация скважины Симферопольская-1 // Сборник докладов VI Международной конф. «Крым-2005»: Геодинамика, сейсмичность и нефтегазоносность Черноморско-Каспийского региона. Симферополь: ДОЛЯ, 2006. С. 87–98.

Lygina E.A., Fokin P.A., Kopaevich L.F., Nikishin A.M., Yakovishina E.V. Nummulitic facies of the Crimean-Caucasian region. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 2016, vol. 25, p. 163–178.

Palmer A.N. Origin and morphology of limestone caves. *Geological Society of American Bulletin*, 1991, no. 103(1), p. 1–21.

Piccini L., Drysdale R., Heijnis H. Karst morphology and cave sediments as indicators of the uplift history in the Alpi Apuane (Tuscany, Italy). *Quaternary International*, 2003, vol. 101–102, p. 219–227.

The Physical Geography of the Mediterranean. Jamie Woodward (Ed.), Oxford University Press, Oxford Regional Environments Series, 2009, 704 p.

Vekua A. Giant ostrich in Dmanisi fauna. *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*, 2013, vol. 7(2), p. 143–148.

Zelenkov N.V., Lavrov A.V., Startsev D.B., Vislobokova I.A., Lopatin A.V. A giant early Pleistocene bird from Eastern Europe: unexpected component of terrestrial faunas at the time of early Homo arrival. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 2019, vol. 39, no. 2, e1605521.

Поступила в редакцию 25.04.2019
После доработки 14.05.2020
Принята к публикации 25.08.2020

P.V. Oksinenko[1], A.V. Lavrov[2]

HISTORY OF THE TAURIDA CAVE, A MONUMENT OF THE LATE VILLAFRANCHIAN VERTEBRATE FAUNA, AND ITS PALEONTOLOGICAL SIGNIFICANCE

The horizontal Tavrida Cave (Zuya settlement, Crimea), discovered in June 2018 during the construction of the highway, is a unique paleontological monument. The stages of the cave formation and its taphocenoses have been studied. The study was carried out using geomorphologic, stratigraphic, geological, structural and paleontological methods.

The zoogenic complex of vertebrate fossils from the cave sediments corresponds to the Late Villafrancian fauna of the Eastern Mediterranean (MNQ18–MNQ19), namely the Psekup faunal complex (1,8–1,5 Ma).

[1] Independent Researcher; Art Dobrynia LTD, Simferopol, General Director; *e-mail*: delakeu@mail.ru

[2] Borissyak Paleontological Institute of RAS, Laboratory of Mammals, Senior Scientific Researcher, PhD. in Biology; *e-mail*: lavrov_av@inbox.ru

The faunal complex includes Hystrix vinogradovi, Hystrix refossa, Pachycrocuta brevirostris, Canis sp., Homotherium crenatidens, Megantereon sp., Ursus etruscus, Archidiskodon sp., Equus sp., Elasmotherium caucasicum, Stephanorcus sp., Bison sp., Gazellospira torticornis, Arvernoceros verestchagini, Pontoceros sp., Hypolagus brachignatus, and Pachiostrutio dmanisensis.

The initial, corrosion-erosion stage of the cave formation dates back to the Early Pliocene, the Cimmerian time of hot and humid tropical climate. An under-watercourse canal was isolated within the Pliocene epiplatform system of surface runoff in low-lying conditions up to 50 m a. s. l. Eocene limestones were drained along cracks and cavernous strata along the contact with the Barremian sandstones by phreatic canal, subsequently forming large galleries with free-flowing waters. A distinctive feature of the cave is the erosional multilevel meander structure of the canal, with levels of initial and final meandering.

The accumulative stage of development covers the time interval from the Eopleistocene to the Neopleistocene. The drained relict cave was opened by a lateral valley and was filled with subaerial allochthonous products of terra rossa hypergenesis and limestone weathering, corresponding to savannah-type environments. At this stage, a large colony of Chiroptera lived in the cave, and a zoogenic taphocenosis of the Late Villafrancian fauna was formed. Seven main stages of sedimentation have been identified, as well as the out-of-stage seismic generations.

The conservation stage of development, with the entrance backfilling, is thought to start in the Cromer (0,5–0,7 Ma). Under temperate climate the desquamation products and gray humous loams completely blocked the entrance to the cave. Dense backfilling of all karst canals put the end to air exchange between the cavity and the outside surface atmosphere.

Key words: paleontology, Psekupian complex, meandering, terra rossa, stages of development, subaerial deposits, Submontane Crimea

Acknowledgements. The work was in part financially supported by the Fundamental Research Program of the RAS Presidium «Evolution of the organic world. The role and influence of planetary processes», and by the Russian Foundation for Basic Rresearch (project no. 19-05-00982). The authors deeply appreciate the assistance rendered by all participants of the excavations.

REFERENCES

Dobrovol'skii V.B. Krasnotsvetnye obrazovaniya Kryma i ikh paleogeograficheskoe znachenie [Red-colored formations of Crimea and their paleogeographic significance], *Vestn. Mosk. un-ta*, *Ser. 5*, *Geogr.*, 1968, no. 1, p. 45–50. (In Russian)

Dublyanskii V.N., Lomaev A.A. Karstovye peshchery Ukrainy [Karst caves of Ukraine], Kiev, Naukova Dumka Publ., 1980, 179 p. (In Russian)

Dushevskii V.P., Lysenko N.I. O vozraste peshcher Krymskogo Predgor'ya [About the age of the caves of the Crimean Foothills], *Sostoyanie, zadachi i metody izucheniya glubinnogo karsta SSSR,* Moscow, 1982, p. 174. (In Russian)

Dushevskii V.P., Lysenko N.I. Vozrast razryvnykh narushenii Vostochno-Krymskogo predgor'ya [Age of discontinuities in the East Crimean foothills], *Bull. MOIP*, Dept. Geology, 1978, vol. 53, iss. 1, p. 51–53. (In Russian)

Geologiya SSSR [Geology of the USSR], vol. VIII, Crimea, part 1, Moscow, Nedra Publ., 1969, 576 p. (In Russian)

Kazantsev Yu.V. Tektonika Kryma [Tectonics of the Crimea], Moscow, Nauka Publ., 1981, 112p. (In Russian)

Kholodov V.N. Kaliche – carbonatnoe pogranichnoe pochvennoe novoobrazovanie [Kaliche – carbonate boundary soil formation], *Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana*, 2007, no. 3, p. 273–285. (In Russian)

Klimchuk A.B., Timokhina E.I., Amelichev G.N., Dublyanskii Yu.V., Shpetl' K. Gipogennyi karst Predgornogo Kryma i ego geomorfologicheskaya rol' [Hypogenic karst of the Submontane Crimea and its geomorphologic role], Simferopol, DIAIPI Publ., 2013, 204 p. (In Russian)

Lopatin A.V. Dikobraz Vinogradova *Hystrix (Acanthion) vinogradovi* (Rodentia, Hystricidae) iz rannepleistotsenovogo mestonakhozhdeniya Tavrida v Krymu [Porcupine *Hystrix* (*Acanthion*) *vinogradovi* (Rodentia, Hystricidae) from the Early Pleistocene Tavrida locality in the Crimea], *DAN*, 2019a, vol. 486, no. 6, p. 756–762. (In Russian)

Lopatin A.V. Hypolagus brachignatus (Lagomorpha, Leporidae) iz nizhnego pleistotsena peshchery Tavrida v Krymu [*Hypolagus brachignatus* (Lagomorpha, Leporidae) from the Lower Pleistocene of the Taurida Cave in Crimea], *DAN*, 2019b, vol. 486, no. 5, p. 83–85. (In Russian)

Lopatin A.V. Zateryannyi mir Tavridy: drevneishaya iskopaemaya peschernaya fauna v Krymu [The Lost World of Taurida: the oldest fossil cave fauna in Crimea], *Priroda,* 2019c, no. 6(1246), p. 53–61. (In Russian)

Lopatin A.V., Vislobokova I.A., Lavrov A.V., Startsev D.B., Gimranov D.O., Zelenkov N.V., Mashchenko E.N., Sotnikova M.V., Tarasenko K.K., Titov V.V. Peschera Tavrida – novoe mestonakhozhdenie rannepleistotsenovykh pozvonochnykh v Krymu [Taurida Cave - a new locality of Early Pleistocene vertebrates in the Crimea], *DAN*, 2019, vol. 485, no. 3, p. 381–385. (In Russian)

Lygina E.A., Fokin P.A., Kopaevich L.F., Nikishin A.M., Yakovishina E.V. Nummulitic facies of the Crimean-Caucasian region. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 2016, vol. 25, p. 163–178.

Maksimovich G.A. Osnovy karstovedeniya [Fundamentals of karst studies], vol. 1. Perm, Perm Book Publ., 1963, 445 p. (In Russian)

Muratov M.V. O miotsenovoi i pliotsenovoi istorii razvitiya Krymskogo poluostrova [On the Miocene and Pliocene history of the evolution of the Crimean Peninsula], *Bull. MOIP*, Dept. Geology, 1954, vol. XXIX, iss. 1, p. 3–20. (In Russian)

Palmer A.N. Origin and morphology of limestone caves. *Geological Society of American Bulletin*, 1991, no. 103(1), p. 1–21.

Piccini L., Drysdale R., Heijnis H. Karst morphology and cave sediments as indicators of the uplift history in the Alpi Apuane (Tuscany, Italy). *Quaternary International*, 2003, vol. 101–102, p. 219–227.

Popov I.V. Metodologicheskie osnovy gidromorfologicheskoi teorii ruslovogo protsessa: Izbrannye trudy [Methodological foundations of the hydromorphological theory of the channel process: Selected works], Saint Petersburg, Nestor-History Publ., 2012, 304 p. (In Russian)

Samsonov F.P. Artezianskie vody nizhnemelovykh otlozhenii Kryma [Artesian waters of the Lower Cretaceous sediments of the Crimea], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiya i razvedka*, 1961, no. 2, p. 105–117. (In Russian)

The Physical Geography of the Mediterranean. Jamie Woodward (Ed.), Oxford University Press, Oxford Regional Environments Series, 2009, 704 p.

Vakhrushev B.A. Paleogeografiya Kryma v svete noveishikh karstologo-speleologicheskikh issledovanii [Paleogeography of Crimea in the light of the latest karst-speleological research], *Kul'tura narodov Prichernomor'ya,* 2001, no. 17, p. 11–18. (In Russian)

Vekua A. Giant ostrich in Dmanisi fauna. *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*, 2013, vol. 7(2), p. 143–148.

Velikanov M.A. Gidrologiya sushi [Land hydrology], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1948, 530 p. (In Russian)

Vislobokova I.A., Titov V.V., Lavrov A.V., Gimranov D.B., Startsev D.B., Tarasenko K.K. Rannepleistotsenovye vintorogie antilopy (Artiodactyla, Bovidae) iz peshchery Tavrida (Krym, Rossiya) [Early Pleistocene grape-horned antelopes (Artiodactyla, Bovidae) from the Taurida Cave (Crimea, Russia)], *Paleontol. Journ.*, 2020, no. 1, p. 78–88. (In Russian)

Vislobokova I.A., Titov V.V., Lavrov A.V., Startsev D.B., Tarasenko K.K., Lopatin A.V. O nakhodke bol'sherogogo olenya roda Arvernocerus v peshchere Tavrida v Krymu [On the find of a large-horned deer of the genus Arvernocerus in the Taurida cave in the Crimea], *DAN*, 2019, vol. 487, no. 5, p. 596–599. (In Russian)

Yudin V.V., Goshovskii S.V., Eremenko G.K. [Geological interpretation of the Simferopolskaya-1 well], *Sbornik dokladov VI Mezhdunarodnoi konf. «Krym-2005»: Geodinamika, seismichnost' i neftegazonosnost' Chernomorsko-Kaspiiskogo regiona* [Proceedings of the VI International conference «Crimea-2005» Geodynamics, seismicity and oil-and-gas occurrence in the Black Sea- Caspian Sea region], Simferopol, DOLYa Publ., 2006, p. 87–98. (In Russian)

Zelenkov N.V., Lavrov A.V., Startsev D.B., Vislobokova I.A., Lopatin A.V. A giant early Pleistocene bird from Eastern Europe: unexpected component of terrestrial faunas at the time of early Homo arrival. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 2019, vol. 39, no. 2, e1605521.

Received 25.04.2019
Revised 14.05.2020
Accepted 25.08.2020

УДК 551.89

Н.О. Аверкина[1], Е.Е. Талденкова[2], Я.С. Овсепян[3], Р.Ф. Шпильхаген[4], Х.А. Баух[5], С.Д. Николаев[6]

ИСТОРИЯ ВОСТОЧНОЙ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ОКРАИНЫ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ В ГОЛОЦЕНЕ: ЛИТОЛОГИЧЕСКИЕ И МИКРОПАЛЕОНТОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

История развития восточной континентальной окраины моря Лаптевых в голоцене реконструирована на основе анализа распределения материала ледового и айсбергового разноса (IRD) и ископаемых комплексов бентосных и планктонных фораминифер в двух колонках морских осадков, полученных с разных глубин континентального склона – 122 и 983 м. Ранний голоцен (8,2–11,7 кал тыс. л. н.) характеризовался наиболее теплым климатом, о чем свидетельствуют максимальная численность фораминифер, крайне низкое содержание IRD, всплески биопродуктивности и высокое содержание фитодетритных видов. В начале среднего голоцена (7,4–8,2 кал тыс. л. н.) отмечено резкое падение численности фораминифер, вплоть до полного исчезновения в колонке на глубине 122 м, которое в сочетании с крайне тонкозернистым составом осадков позволяет предположить развитие мощного ледового покрова, ставшего причиной падения биопродуктивности. После 7,4 кал. тыс. л. н. рост количества IRD, увеличение процентного содержания видов бентосных фораминифер из мелководных районов моря и прикрепляющихся эпифаунных видов отмечают похолодание климата, также установленное ранее и на западе моря Лаптевых. Оно проявилось в увеличении площади ледового покрова, смещении к югу сезонной границы дрейфующих льдов и росте ледниковых шапок Северной Земли. Пики IRD практически синхронны на западе и востоке моря, имеют периодичность 1–1,5 тыс. лет и приурочены к интервалам времени 7–7,4; 6,4–6,6; 5–5,8; 2,8–3,8; 1,6–2 и 0,8–1,2 кал. тыс. л. н.

Ключевые слова: палеоокеанология, материал ледового и айсбергового разноса, фораминиферы, атлантические воды

Введение. Известно, что высокие широты отличаются повышенной чувствительностью и усиленной ответной реакцией окружающей среды на колебания климата, а Арктический регион является важным объектом изучения изменений природных условий в голоцене и влияющих на них механизмов [Stein, 2008; Miller et al., 2010]. В море Лаптевых ответные изменения проявляются в колебаниях границ и площади сезонного ледового покрова, вариациях объема речного стока, различной интенсивности проникновения трансформированных атлантических вод вдоль континентального склона и характере их взаимодействия с холодными и опресненными арктическими водами. В послеледниковое время одним из первостепенных откликов на потепление климата был активный рост уровня моря и, как следствие, отступание суши – затопление шельфа. Наиболее активно трансгрессия происходила в голоцене, до пяти календарных тысяч лет назад (кал. тыс. л. н.) [Bauch et al., 2001] на фоне наибольшего потепления, окончательного распада ледниковых щитов и площадного затопления шельфов.

В данной работе мы представляем результаты изучения климатически обусловленных особенностей осадконакопления на восточной континентальной окраине моря Лаптевых в этот относительно благоприятный период (последние 11,7 кал. тыс. лет), сопоставляя результаты исследования двух детально датированных колонок морских осадков (рис. 1), поднятых с разных глубин на континентальном склоне (983 и 122 м). Таким образом, можно проследить изменения палеоусловий в голоцене в глубоководной части склона, которая находится под влиянием трансформированных атлантических вод, и у бровки внешнего шельфа, где значительную роль в осадконакоплении в начале голоцена играл сток рек Лены и Яны, устья которых находились в непосредственной близости к краю шельфа.

Океанологические условия. Море Лаптевых – окраинное мелководное море Северного Ледовитого океана, шельф которого изрезан несколькими палеодолинами рек, образовавшимися в результате плейстоценовых регрессий и осушения шельфа [Bauch et al., 2001]. Гидрологическая обстановка в

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, лаборатория новейших отложений и палеогеографии плейстоцена, науч. с.; *e-mail*: natal-y@mail.ru

[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, лаборатория новейших отложений и палеогеографии плейстоцена, вед. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: etaldenkova@mail.ru

[3] Геологический институт РАН, Москва, лаборатория биостратиграфии и палеогеографии океанов, науч. с., канд. геол.-минерал. н.; *e-mail*: yaovsepyan@yandex.ru

[4] Гельмгольц Центр по изучению океана в г. Киль (ГЕОМАР), Киль, Германия, *e-mail*: rspielhagen@geomar.de

[5] Альфред-Вегенер-Институт, Гельмгольц Центр по морским и полярным исследованиям, Бремерхавен, Германия; *e-mail*: hbauch@geomar.de

[6] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, лаборатория новейших отложений и палеогеографии плейстоцена, вед. науч. с., доктор геогр. н.; *e-mail*: cdnikolaev@yandex.ru

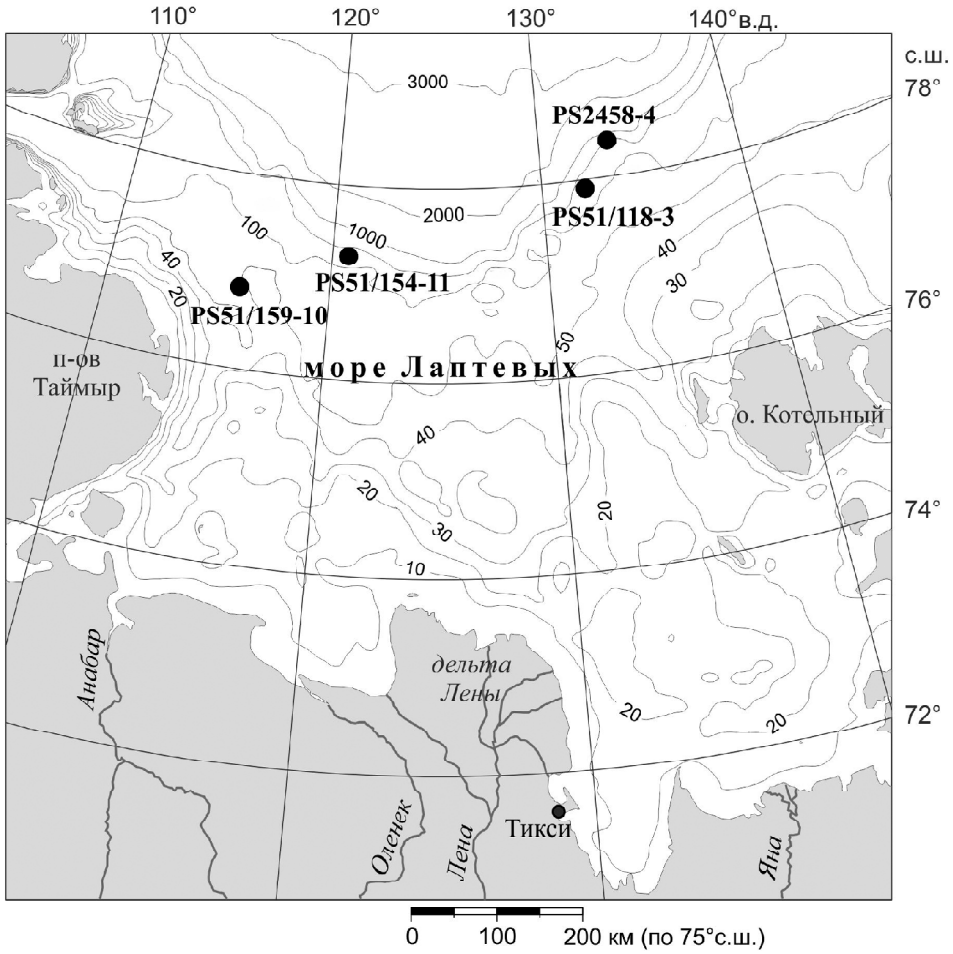

Рис. 1. Карта моря Лаптевых с местоположениями исследованных колонок

Fig. 1. Location of the studied cores in the Laptev Sea

бассейне зависит, главным образом, от взаимодействия трех факторов: большого объема речного стока, протяженного ледового покрова и присутствия трансформированных атлантических вод, текущих вдоль континентального склона.

Сток крупных сибирских рек в море Лаптевых оказывает решающее влияние на опреснение поверхностных вод и стратификацию водной толщи, в особенности, в его восточной части, куда разгружается большая часть пресной воды р. Лены [Добровольский, Залогин, 1982]. На поверхностную соленость также влияет летнее таяние ледового покрова.

По причине мелководности и низкой солености происходит повышенное ледообразование на шельфе, делая море Лаптевых основным поставщиком морского льда в Арктику [Alexandrov et al., 2000]. Ледообразование начинается в сентябре–октябре, когда море, в основном, свободно ото льда и развиваются мощные осенние штормы, оказывающие сильное влияние на мелководные районы. Они охлаждают водную толщу за счет перемешивания и взмучивают донные осадки, что способствует включению взвеси и крупнозернистых частиц в начинающий образовываться лед, который дрейфует к сезонной границе ледового покрова [Eicken et al., 1997]. Последующее охлаждение приводит к формированию припая вплоть до глубин 20–25 м. Севернее припай не формируется – под действием приливов и дующих с холодной суши южных ветров внешний край припая становится нестабильным, и откалывающиеся льдины дрейфуют на север, где они вовлекаются в Трансполярный дрейф. Между северной границей припая и южной границей дрейфующего льда под действием южных ветров образуется полынья, протяженная свободная ото льда зона, в которой зимой идет активное ледообразование с формированием холодных и соленых рассолов, образующих придонные воды на шельфе и промежуточные воды галоклина в океане. Последние имеют соленость до 34‰ и температуры, близкие к точке замерзания [Timokhov, 1994].

Теплые и соленые атлантические воды – основной внешний источник тепла и соли для Арктического бассейна и его окраинных морей [Rudels et al., 2004; Иванов, Тимохов, 2019] и один из главных климатоформирующих факторов на континентальной окраине моря Лаптевых, куда они поступают через две основные ветви. Фрамовская ветвь проходит в

восточной части пролива Фрама в виде Западно-Шпицбергенского течения, огибает Шпицберген с севера, постепенно трансформируется за счет контакта с поверхностными арктическими водами и далее движется в подповерхностном слое вдоль евразийского континентального склона. Баренцевоморская ветвь представлена немного более холодными и опресненными водами, сформированными за счет взаимодействия с шельфовыми водами Баренцева и Карского морей [Aksenov et al., 2011]. В море Лаптевых представлены обе ветви атлантического течения [Dmitrenko et al., 2010]. Средняя температура атлантических вод в море Лаптевых ~1°C, а соленость 34,7–34,9‰ [Dmitrenko et al., 2010]. Помимо солености и температуры, обе ветви предположительно отличаются по специфическому составу фитодетрита и биогенов, что важно для бентосных видов, обитающих в этом слое воды и под ним [Lubinski et al., 2001; Wollenburg et al., 2004]. Есть свидетельства того, что под действием апвеллинговых течений может происходить вертикальный теплообмен и поднятие атлантических вод к поверхности океана в зонах резких уклонов дна (бровка шельфа) [Дмитренко и др. 2001; Иванов, Тимохов, 2019], но основной диапазон их распространения находится в пределах глубин 200–600 м [Timokhov, 1994].

Таким образом, место взятия колонки PS2458-4 находится непосредственно под слоем атлантических вод, а на область, с которой поднята колонка PS51/118, в значительно большей степени оказывает влияние речной сток Лены и Яны.

Материалы и методы исследования. Представленные в данной статье результаты основаны на изучении состава комплексов фораминифер и литологических характеристик, включая материал ледового и айсбергового разноса (ice- and iceberg-rafted debris, IRD), осадков двух колонок с восточного континентального склона моря Лаптевых (см. рис. 1). Колонки были получены во время экспедиций ARCTIC'93 (ARK-IX/4) и TRANSDRIFT V на н/с «Поларштерн» в 1993 и 1998 гг., соответственно. Колонка PS2458-4 (78°10,0' с. ш., 133°23,9' в. д.) длиной 822 см поднята с глубины 983 м. Колонка PS51/118-3 (77°53,54' с. ш.; 132°11,92' в. д.) длиной 844 см отобрана с глубины 122 м – в самой верхней части склона, вблизи бровки шельфа. Далее по тексту колонки называются PS2458 и PS51/118.

Хронология колонок основана на радиоуглеродном датировании морского биогенного кальцита, выполненном методом ускорительной масс-спектрометрии (AMS) в Лейбниц лаборатории университета Кристиана Альбрехта в г. Киль (Германия). Даты пересчитаны в календарный возраст с помощью программ Fairbanks 0107 [Fairbanks et al., 2005] и CALIB 4.3 [Stuiver et al., 1995]. Перед этим была введена резервуарная поправка в 370 лет, определенная для моря Лаптевых [Bauch et al., 2001]. Материалом для датирования послужили раковины двустворчатых моллюсков и бентосных фораминифер. Для колонки PS2458 получено 15 радиоуглеродных определений возраста [Spielhagen et al., 2005], но для создания возрастной модели использованы 11 из них. Наиболее древняя из датировок получена для горизонта 625 см и соответствует возрасту 14,6 кал. тыс. л. н., а возраст основания колонки 17,6 кал. тыс. л. н. – экстраполированный. Для верхней части колонки (верхние 252 см) мы поддерживаем более поздний вариант возрастной модели [Fahl, Stein, 2012], в котором исключается датировка по древесине с горизонта 201 см и предполагается равномерная седиментация без перерывов верхней части колонки. Верхушка керна была размыта, поэтому осадочная летопись начинается с 25 см, что равно ~900 кал. л. н. Осадки колонки PS51/118 продатированы на 12 горизонтах, включая нижнюю дату из осадков керноприемника с глубины 866 см [Bauch et al., 2001; Rudenko et al., 2014]. Для построения возрастной модели использованы девять из них, а интерполированный возраст основания колонки определен в 10,8 кал. тыс. л. н. Стоит отметить, что в этой колонке в раннеголоценовый период скорость осадконакопления была очень высокой – согласно возрастной модели большая часть осадков (интервал 866–125 см) накопилась за 2 тыс. лет.

В обеих колонках произведен непрерывный пробоотбор с мощностью образцов 1–2 см. Образцы замораживались, высушивались, взвешивались, а затем промывались на сите с диаметром ячеи 63 мкм и снова взвешивались. В результате было определено весовое процентное содержание фракции >63 мкм.

Для изучения IRD подсчитывались зерна пород и минералов во фракции >500 мкм. Содержание IRD в осадках арктических морей позволяет судить как о динамике ледниковых щитов, окружающих Арктический бассейн, так и о вариациях размера морского ледового покрова [Stein, 2008].

Бентосные и планктонные фораминиферы и макробентос изучались под бинокуляром во фракциях >63 мкм с высокой детальностью в колонке PS51/118 и непрерывно по всему разрезу в колонке PS2458. Фораминиферы в образцах определялись до вида. Подсчет количества раковин проводился до получения общего статистически значимого количества (>300 шт.) для последующего анализа содержания разных групп и видов. Фракции с большим количеством биоматериала делились на равные части с помощью сплиттера. В образцах с низким содержанием фораминифер определялись все раковины. Относительная численность (процентное содержание) видов и экологических групп была оценена только в образцах, содержащих более 100 раковин, что является статистически достаточным для осадков с низким биоразнообразием [Fatela, Taborda, 2002]. Биоразнообразие определялось как количество видов в образце. Фораминиферы широко используются для проведения палеоокеанологических реконструкций, благодаря широкому распространению и сравнительно высокой степени сохранности их раковин в донных осадках, а также по причине высокой чувствительности к незначительным коле-

баниям условий окружающей среды и быстрой смене комплексов в ответ на эти колебания.

Для IRD и микрофоссилий оценивалась общая численность на 100 г и 1 г сухого непромытого осадка, соответственно. Для фораминифер определялась скорость аккумуляции как количество раковин, накопленное на квадратном сантиметре поверхности дна за тысячу лет. При расчетах использовались линейная скорость седиментации, определенная как средняя скорость седиментации для интервала времени между двумя соседними датированными уровнями, и общая численность фораминифер, а плотность осадка условно принималась равной единице.

При описании результатов нами использовано стратиграфическое деление голоцена на ранний, средний и поздний, принятое Международным союзом геологических наук (IUGS) в 2018 году [Walker et al., 2018].

Результаты и их обсуждение. *Литология, скорости седиментации, IRD.* Состав осадков колонок PS51/118 и PS2458 преимущественно тонкозернистый, весовое процентное содержание фракции >63 мкм в среднем ниже 5% (рис. 2). Прежде всего, это справедливо для более глубоководной колонки PS2458. В колонке PS51/118 отмечается постепенный рост вес.% содержания крупнозернистой фракции, которое, вероятно, является следствием падения скоростей седиментации. В колонке PS2458 в течение голоцена они падают от 74–100 см/тыс. лет до 9,3 кал. тыс. л. н. до 27 см/тыс. лет после этого рубежа, который соответствовал значительному отступанию береговой линии вглубь шельфа, когда уровень моря достиг отметок примерно –40 м [Bauch et al., 2001].

В колонке PS51/118 скорости седиментации были чрезвычайно высокими – 613 см/тыс. лет с 10,8 до 10,2 кал. тыс. л. н., затем они сократились практически вполовину, но все равно оставались высокими (373 см/тыс. лет) до 9,7 кал. тыс. л. н. Затем они упали до 141 см/тыс. лет в период между 9,7 и 9 кал. тыс. л. н. После этого рубежа скорости седиментации снизились до 55 см/тыс. лет, а

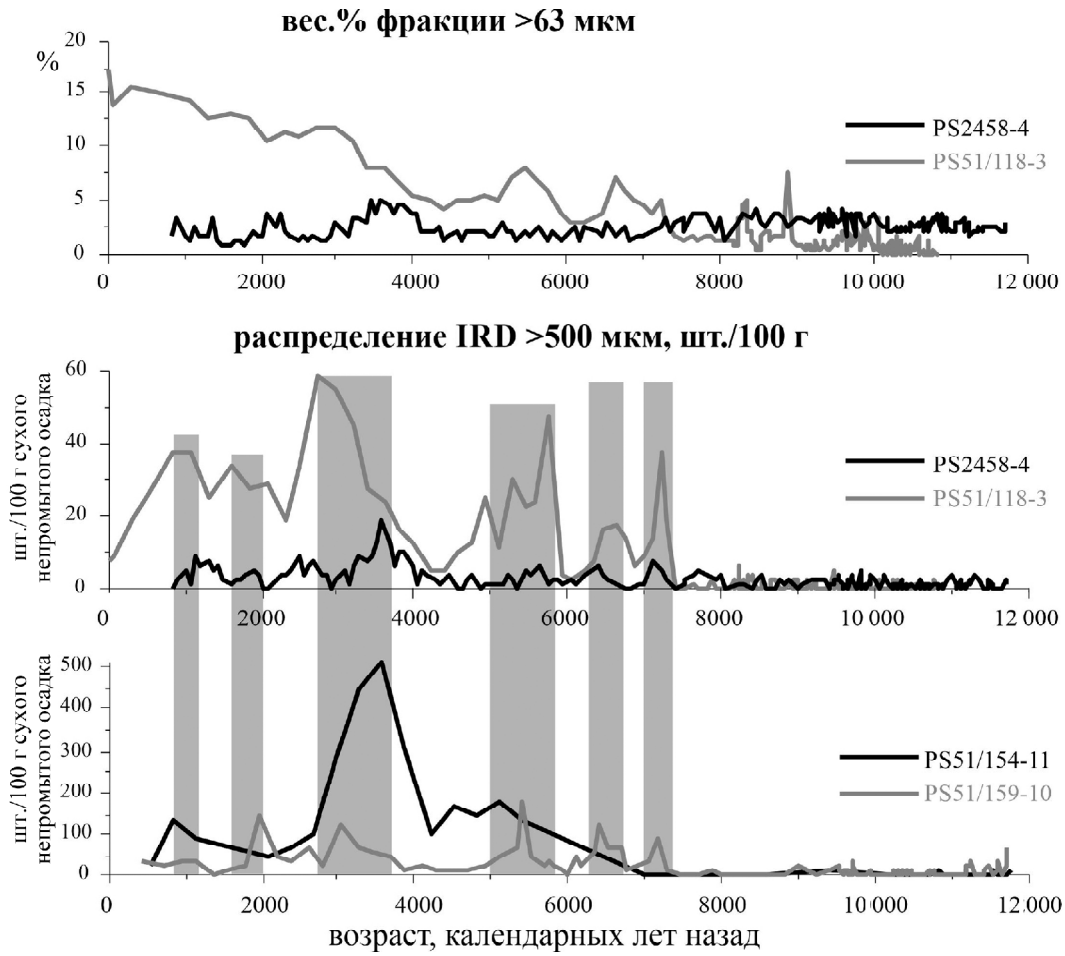

Рис. 2. Распределение весового процентного содержания фракции >63 мкм в осадках колонок из восточной части моря Лаптевых и распределение IRD в колонках из восточной и западной [Taldenkova et al., 2010] частей моря Лаптевых. Пики содержания IRD выделены серым тоном

Fig. 2. Downcore distribution of weight percentage of >63 mm fraction in the cores from the eastern Laptev Sea and distribution of IRD in the cores from the eastern and western [Taldenkova et al., 2010] Laptev Sea. Gray shading corresponds to IRD peaks

после 7,4 кал. тыс. л. н. сократились до крайне низких значений в 5 см/тыс. лет.

Именно с этого времени, после 7,4 кал. тыс. л. н., в обеих колонках отмечается рост содержания IRD (см. рис. 2). Особенно много такого материала в более мелководной колонке PS51/118, что может также частично быть результатом резкого падения скоростей седиментации. Тем не менее, очевидная синхронность и периодичность этих пиков в обеих колонках указывает на их климатическую обусловленность, скорее всего, отражающую периодические похолодания во время среднего и позднего голоцена. Пики приурочены к следующим интервалам времени: 7–7,4; 6,4–6,6; 5–5,8; 2,8–3,8; 1,6–2 и 0,8–1,2 кал. тыс. л. н., т. е. периодичность их проявления примерно 1–1,5 тыс. лет. Аналогичные примерно одновозрастные пики IRD были отмечены ранее в колонках с западной континентальной окраины моря Лаптевых [Taldenkova et al., 2010] (см. рис. 2). Колонка PS51/159-10 расположена на внешнем шельфе в палеодолине р. Хатанги на глубине моря 60 м, а колонка PS51/154-11 – в верхней части континентального склона на глубине моря 270 м (см. рис. 1). Максимальные по численности пики IRD в обоих регионах отмечены около 2,8–3,8 кал. тыс. л. н. Следует отметить, что в западной части моря пики IRD существенно выше (в 2–10 раз), чем в восточной (см. рис. 2).

Планктонные фораминиферы. Типичный арктический вид *Neogloboquadrina pachyderma* sin. является резко доминирующим для голоценовых осадков разреза PS2458 и для колонки PS51/118, где планктонные фораминиферы встречаются в единичных количествах и далеко не во всех образцах. Тем не менее, для раннего голоцена (8,2–11,7 кал. тыс. л. н.) характерно относительно высокое видовое разнообразие, связанное с присутствием субполярных видов (*N. pachyderma* dex., *Globigerina bulloides, G. calida* и др.) в осадках глубоководной части склона. Также в этот период здесь наблюдаются максимальная численность и наиболее высокие скорости аккумуляции планктонных фораминифер, резко уменьшающиеся в среднем голоцене (4,3–8,24 кал. тыс. л. н.). После 4 кал. тыс. л. н. происходит дальнейшее сокращение количества раковин.

Бентосные фораминиферы. Бентосные фораминиферы – наиболее распространенные представители микрофауны в изучаемых нами разрезах. Однако, численность раковин и процентное содержание видов варьируются в разные периоды голоцена.

Колонка PS2458. В раннеголоценовой части разреза (8,2–11,7 кал. тыс. л. н.) наблюдается максимальное содержание и видовое разнообразие бентосных фораминифер, наиболее высокие скорости их аккумуляции и преобладание типичного арктического холодноводного вида *Cassidulina reniforme* [Корсун и др., 1994; Polyak et al., 2002] (рис. 3). В значительных количествах (до 35%) присутствует вид *Cassidulina neoteretis*, который для арктической континентальной окраины является индикатором атлантических вод и обитает, как правило, глубже их теплого ядра [Lubinski et al., 2010; Osterman, 1999; Овсепян и др., 2019]. Есть предположение, что *C. neoteretis* привязан к определенному типу бактерий или фитодетрита и больше ассоциирован с фрамовской ветвью атлантических вод с немного более высокими температурой, соленостью и содержанием биоматериала [Lubinski et al., 2010; Taldenkova et al., 2012; Овсепян и др. 2019]. До ~10,5 кал. тыс. л. н. отмечено наибольшее, по сравнению с другими временными интервалами, содержание фитодетритных видов *Islandiella norcrossi*, *Pyrgo williamsoni, Nonion labradoricum, Stainforthia loeblichi* (см. рис. 3). Появление *S. loeblichi*, а в особенности *N. labradoricum,* указывает на близость сезонной границы морских льдов и сопутствующую ей высокую биопродуктивность [Polyak et al., 2002; Wollenburg et al., 2004, Ślubowska et al., 2005].

Средний голоцен (4,2–8,2 кал. тыс. л. н.) характеризуется резким сокращением численности фораминифер в интервале с 8,2 до ~7,4 кал. тыс. л. н. (см. рис. 3). В дальнейшем количество фораминифер на 100 г осадка незначительно увеличивается, при этом скорости аккумуляции низкие в течение всего периода. Об усилении атлантического влияния свидетельствует повышение процентного содержания вида *C. neoteretis*, который становится доминирующим. Присутствие типично морского, дистального («river-distal»), инфаунного вида *Melonis barleeanus*, питающегося захороненной органикой, в нашем случае может говорить о прогрессирующей трансгрессии и, как следствие, замедлении скоростей осадконакопления [Polyak et al., 2002; Taldenkova et al., 2012].

В позднем голоцене (после 4,2 кал. тыс. л. н.) содержание в осадках и видовое разнообразие бентосных фораминифер минимальны. Значительную часть комплекса составляют проксимальные (river-proximal) виды [Polyak et al., 2002], характерные для мелководных районов внутреннего шельфа арктических морей, среди которых *Buccella frigida* – наиболее многочисленный. Пики *N. labradoricum* в период с 4,2 до 3 кал. тыс. л. н. свидетельствуют о близости сезонной границы морского льда к месту взятия колонки. В верхних 40 см разреза колонки (примерно от 1,5 до 0,9 кал. тыс. л. н.) доминируют агглютинирующие фораминиферы, а доля карбонатных не превышает 10%.

Колонка PS51/118. Ранний голоцен (8,2–10,82 кал. тыс. л. н.) в осадках колонки отмечен максимально высокими скоростями аккумуляции и доминированием трех типичных арктических видов, прежде всего, *C. reniforme,* характерного для холодных придонных обстановок, а также *E. clavatum* и *I. norcrossi.* Вид-оппортунист *E. clavatum* наиболее многочисленен (максимум 65%) до 10 кал. тыс. л. н. Он считается наиболее приспособляемым представителем секреционно-известковых фораминифер в северных морях, выдерживающим существенное опреснение. Высокое содержание этого вида – признак

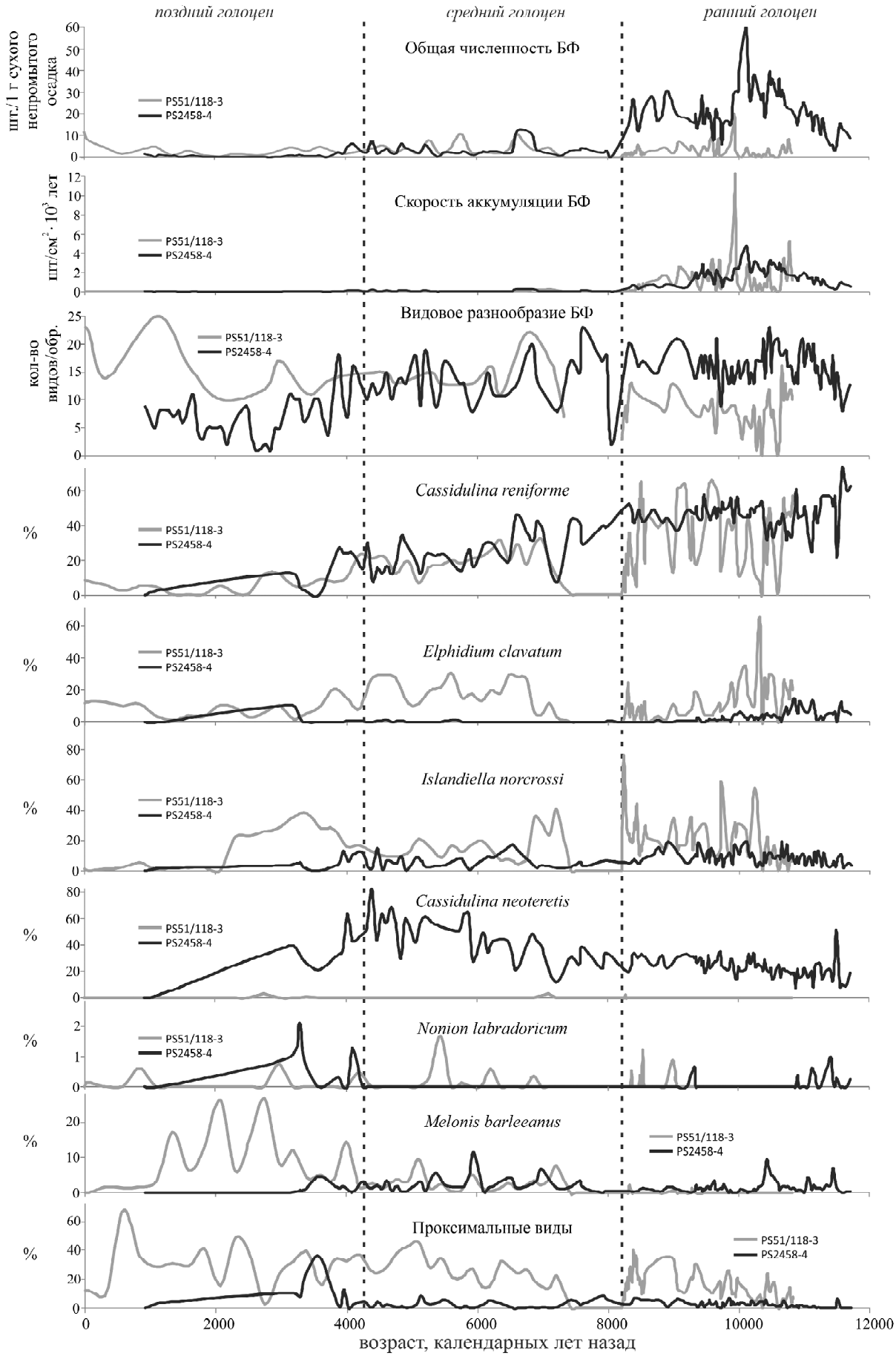

Рис. 3. Распределение бентосных фораминифер в колонках PS2458-4 и PS51/118-3

Fig. 3. Downcore distribution of benthic foraminifers in PS2458-4 and PS51/118-3 cores

холодных и нестабильных условий со стратификацией водной толщи [Корсун и др., 1994; Ślubowska et al., 2005]. Значительная процентная составляющая дистального вида *I. norcrossi* (до 75% после 9 кал. тыс. л. н.) отражает высокую сезонную биопродуктивность у края льдов, а появление *N. labradoricum* и *S. loeblichi* после 9–10 кал. тыс. л. н. говорит о близости положения среднемноголетней сезонной границы дрейфующих льдов к месту расположения колонки.

Начало среднего голоцена (7,4–8,2 кал. тыс. л. н.) отличается полным исчезновением микрофоссилий в разрезе (см. рис. 3). В среднем–позднем голоцене, после 7,4 кал. тыс. л. н., скорости аккумуляции резко сокращаются по причине прогрессирующей трансгрессии, удаления береговой линии и ослабления речного влияния. Об увеличении глубины бассейна и удалении от берега, прежде всего, свидетельствует рост численности дистального вида *M. barleeanus* (см. рис. 3). Одновременно с этим наблюдается увеличение содержания проксимальных видов, характерных для мелководных районов, что указывает на усиление ледового разноса в условиях похолодания [Taldenkova et al., 2012; Stepanova et al., 2012]. Об этом же свидетельствует и рост содержания эпифаунных видов, главным образом *Astrononion gallowayi* и *Elphidium subarcticum*, что часто связано с увеличением количества грубозернистого материала (в данном регионе – это IRD), являющегося предпочитаемым субстратом для этого типа микробентоса [Корсун и др., 1994]. Периодические изменения процентного содержания видов *N. labradoricum* и *S. loeblichi* говорят о вариациях размера ледового покрова.

Палеоокеанологические реконструкции. Несмотря на значительные различия палеоусловий в местах взятия колонок, можно проследить общие закономерности изменения природных условий в голоцене.

Ранний голоцен (8,2–11,7 кал. тыс. л. н.) выделяется в обоих разрезах как наиболее теплый интервал, когда море было свободно от сезонного льда. На это указывают максимальное содержание бентосных, а в глубоководной части и планктонных, фораминифер в осадках, крайне низкое содержание IRD как на востоке, так и на западе моря Лаптевых, а также всплески биопродуктивности и высокое содержание фитодетритных видов, приуроченных к сезонному краю морского льда. Данные условия наиболее выражены в интервале до 10 кал. тыс. л. н. в глубоководной части и после этого времени на меньшей глубине. Влияние речного стока отражается в присутствии проксимальных комплексов бентосных фораминифер и вида-оппортуниста *E. clavatum*, в особенности в колонке PS51/118, что свидетельствует о стратификации водной толщи в результате опреснения поверхностного слоя, закономерно больше проявленного ближе к шельфу. При этом состав осадков колонки PS51/118 по сравнению с PS2458 более тонкозернистый, несмотря на ее близость к устьям рек. Вероятно, это была зона активного осаждения взвеси в пределах маргинального фильтра. О более выраженных морских условиях на большей глубине свидетельствует максимальное биоразнообразие и присутствие вида-индикатора атлантических вод *C. neoteretis* в колонке PS2458. Теплые условия во время раннеголоценового термического максимума, частично совпадавшего с пиком инсоляции 10–12 кал. тыс. л. н., отмечены во многих регионах Арктики, но время их проявления варьирует от 11 до 6 кал. тыс. л. н. в зависимости от таяния ледниковых щитов, особенностей океанической и атмосферной циркуляции [Polyak et al., 2010]. В районе континентальной окраины моря Лаптевых, как следует из совокупности представленных данных, наиболее теплые условия с максимальным прогревом поверхностных вод и сокращением размеров сезонного ледового покрова наблюдались 9,5–10,5 кал. тыс. л. н.

В начале среднего голоцена (7,4–8,2 кал. тыс. л. н.) в осадках колонки PS51/118 отмечено полное исчезновение всех микрофоссилий. В то же самое время резко снижается их количество и в более глубоко расположенной колонке PS2458. У бровки шельфа в это время наблюдалось значительное снижение скоростей седиментации, связанное с отступанием берега в ходе развития трансгрессии. Подобная картина резкого снижения скоростей седиментации характерна для всех исследованных колонок на континентальном склоне и внешнем шельфе, а его возраст меняется в зависимости от глубины моря в месте отбора конкретной колонки [Taldenkova et al., 2010; 2012]. Крайне тонкозернистые осадки колонки PS51/118, возможно, свидетельствуют о мощном ледовом покрове, который мог быть причиной падения биопродуктивности. Возможно, климатическое похолодание 8,2 кал. тыс. л. н., связанное с разгрузкой приледниковых озер Лаврентийского щита в районе Гудзонова залива и выраженное в Северной Атлантике и во многих регионах северного полушария [Alley, Ágústsdóttir, 2005], могло послужить спусковым механизмом для ослабления атлантической меридиональной циркуляции и перестройки атмосферной циркуляции, что привело к ухудшению условий и в изучаемом нами районе.

После 7,4 кал. тыс. л. н. в обеих исследованных колонках на востоке моря Лаптевых растет количество IRD, которое отмечает похолодание климата и увеличение площади ледового покрова. Об этом же свидетельствует рост процентного содержания проксимальных видов бентосных фораминифер из мелководных районов одновременно с увеличением глубины моря в ходе трансгрессии и прогрессивно увеличивающимся представительством относительно глубоководных видов в составе комплекса бентоса, наиболее выраженным в колонке у бровки шельфа. Проксимальные виды, как и IRD, попадают в дрейфующий лед, образованный на мелководье в период осенних штормов при ледообразовании, и переносятся к сезонной границе льдов [Eicken et al., 1997]. Следующим летом они либо вытаивают в пределах моря Лаптевых, либо выносятся с Трансполярным дрейфом за его пределы. Соответственно, чем ближе к берегу сезонная гра-

ница льдов, тем большее количество IRD и раковин мелководных, проксимальных видов бентоса вытаивают в пределах моря Лаптевых и попадают в его осадки. Еще одним свидетельством похолодания и ледового разноса является рост количества эпифаунных прикрепленных видов бентосных фораминифер, который коррелирует с увеличением IRD, используемым ими в качестве субстрата. Ранее все эти свидетельства похолодания среднего–позднего голоцена были выявлены нами в осадках колонок из западной части моря Лаптевых [Taldenkova et al., 2010, 2012; Stepanova et al., 2012; Овсепян и др., 2015]. Пики IRD в западной и восточной частях моря Лаптевых, в целом, синхронны и приурочены к интервалам времени 7–7,4; 6,4–6,6; 5–5,8; 2,8–3,8; 1,6–2 и 0,8–1,2 кал. тыс. л. н. (см. рис. 2). Отмеченная периодичность в 1–1,5 тыс. лет характерна для проявлений похолодания климата как в Северной Атлантике [Bond et al., 1997], так и в Арктике [Polyak et al., 2010; Darby et al., 2012]. Тот факт, что на западе моря Лаптевых количество IRD в несколько раз превышает его количество на востоке моря, на наш взгляд, свидетельствует о значительном вкладе айсбергового материала с Северной Земли. Ранее нами была показана важность этого источника поставки IRD по содержанию филлитов в западных колонках [Taldenkova et al., 2010]. По всей видимости, в период средне-позднеголоценового похолодания климата начались рост ледниковых шапок на архипелаге Сев. Земля и поставка ими айсбергов, которые преимущественно таяли в западной части моря Лаптевых или захватывались Трансполярным дрейфом, почти не достигая восточной континентальной окраины моря. В восточной части моря Лаптевых рост количества IRD, в основном, связан с похолоданием, смещением к югу сезонной границы льдов и соответствующим увеличением IRD ледового (а не айсбергового) разноса. При этом в осадках мелководной колонки PS51/118 количество IRD в этот период заметно выше, чем в глубоководной PS2458, как и процентное содержание видов внутреннего шельфа. Возможно, близко к этому месту происходило наиболее активное вытаивание фоссилий и терригенных зерен, включенных в состав льда и перенесенных к границе дрейфующих льдов. Интересно, что в западной части моря Лаптевых количество IRD, наоборот, выше на континентальном склоне, чем на внешнем шельфе, что подтверждает предположение о значительном вкладе материала айсбергового разноса с Сев. Земли в этой части моря.

На усиление атлантического влияния в придонной толще указывает преобладание вида-маркера атлантических вод *C. neoteretis* в колонке PS2458, в особенности, до 3 кал. тыс. л. н. Примечательно, что рост процентного содержания этого вида, хоть и не настолько выраженный, также наблюдается в этот период в осадках колонки PS51/154-11 [Taldenkova et al., 2012; Овсепян и др., 2015, 2019]. Возможно, это подтверждает предположение о предпочтении *C. neoteretis* относительно более глубоководных условий, под слоем атлантических вод.

Выводы.

По результатам детального изучения литологии и ископаемых комплексов фораминифер в двух колонках с континентального склона восточной части моря Лаптевых (глубина моря 122 и 938 м) и сравнения с ранее полученными данными по западной континентальной окраине моря [Taldenkova et al., 2010, 2012; Овсепян и др., 2015, 2019] реконструированы основные черты климатически обусловленных изменений природной среды региона в голоцене:

– максимальная численность фораминифер, крайне низкое содержание материала ледового и айсбергового разноса (IRD) как на востоке, так и на западе моря Лаптевых, а также всплески биопродуктивности и высокое содержание фитодетритных видов выделяют ранний голоцен (8,2–11,7 кал. тыс. л. н.) как наиболее теплый интервал; при этом термический максимум наблюдался примерно 9,5–10,5 кал. тыс. л. н., когда сезонная граница дрейфующих льдов смещалась к северу от исследованных колонок, расположенных на 77–78° с. ш.;

– в начале среднего голоцена (7,4–8,2 кал. тыс. л. н.) на востоке моря Лаптевых отмечено резкое падение численности фораминифер, вплоть до полного исчезновения в колонке, расположенной на глубине 122 м, которое в сочетании с крайне тонкозернистым составом осадков позволяет предположить развитие мощного ледового покрова, ставшего причиной падения биопродуктивности;

– после 7,4 кал. тыс. л. н. повсеместный рост количества IRD, увеличение процентного содержания видов бентосных фораминифер из мелководных районов моря и эпифаунных видов, прикрепляющихся к крупнозернистым терригенным частицам в составе донного грунта, отмечают похолодание климата, выразившееся в увеличении площади ледового покрова, смещении к югу сезонной границы дрейфующих льдов и росте ледников Северной Земли. Ледники продуцировали айсберги, поступавшие преимущественно в западную часть моря, за счет чего количество IRD на западе моря в несколько раз выше, чем на востоке. Пики IRD практически синхронны на западе и востоке моря и приурочены к интервалам времени 7–7,4; 6,4–6,6; 5–5,8; 2,8–3,8; 1,6–2 и 0,8–1,2 кал. тыс. л. н. Отмеченная периодичность в 1–1,5 тыс. лет характерна для различных проявлений похолодания климата среднего–позднего голоцена во многих районах Арктики и Северной Атлантики.

Благодарности. Исследования Овсепяна Я.С. и Аверкиной Н.О. выполнены за счет РФФИ (проект № 18-35-00362 мол_а). Исследования Талденковой Е.Е. поддержаны субсидией Минобрнауки по проекту «Арктическая Трансполярная система в переходных климатических условиях» (уникальный идентификатор проекта RFMEFI61619X0108); исследования Шпильхагена Р.Ф. и Бауха Х.А. – Министерством образования и науки Германии по проекту «CATS Synthesis: The Changing Arctic Transpolar System» (№ 03F0831).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дмитренко И.А., Хьюлеманн Й.А., Кириллов С.А., Березовская С.Л., Кассенс Х. Роль баротропных изменений уровня моря в формировании режима течений на шельфе восточной части моря Лаптевых // ДАН. 2001. Т. 377. № 1. С. 101–107.

Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.

Иванов В.В., Тимохов Л.А. Атлантические воды в арктической циркуляционной трансполярной системе // Метеорол. и гидрол. 2019. № 4. С. 36–53.

Корсун С.А., Погодина И.А., Тарасов Г.А., Матишов Г.Г. Фораминиферы Баренцева моря (гидробиология и четвертичная палеоэкология). Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1994. 136 с.

Овсепян Я.С., Талденкова Е.Е., Баух Х.А., Кандиано Е.С. Реконструкция событий позднего плейстоцена–голоцена на континентальном склоне моря Лаптевых по комплексам бентосных и планктонных фораминифер // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2015. Т. 23. № 6. С. 964–112.

Овсепян Я.С., Аверкина Н.О., Талденкова Е.Е., Шпильхаген Р.Ф., Баух Х.А., Тихонова А.В. Бентосные фораминиферы как индикаторы проникновения атлантических вод в арктический бассейн в конце позднего плейстоцена – голоцене // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2019. № 6. С. 41–50.

Aksenov Y., Ivanov V.V., Nurser A.J.G., Bacon S., Polyakov I.V., Coward A.C., Naveira-Garabato A.C., Beszczynska-Moeller A. The Arctic Circumpolar Boundary Current. *J. Geophys. Res.*, 2011, vol. 116, C09017, p. 1–28.

Alexandrov V., Martin T., Kolatschek J., Eicken H., Kreyscher M., Makshtas A.P. Sea ice circulation in the Laptev Sea and ice export to the Arctic Ocean: Results from satellite remote sensing and numerical modeling. *J. Geophys. Res.*, 2000, vol. 105, p. 17143–17159.

Alley R.B., Ágústsdóttir A.M. The 8^k event: Cause and consequences of a major Holocene abrupt climate change. *Quat. Sci. Rev.*, 2005, vol. 24, p. 1123–1149.

Bauch H.A., Mueller-Lupp T., Taldenkova E., Spielhagen R.F., Kassens H., Grootes P.M., Thiede J., Heinemeier J., Petryashov V.V. Chronology of the Holocene transgression at the North Siberian margin. *Glob. Planet. Change*, 2001, vol. 31, p. 125–139.

Bond G., Showers W., Cheseby M., Lotti R., Almasi P., de Menocal P., Priore P., Cullen H., Hajdas I., Bonani G. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 1997, vol. 278, p. 1257–1265.

Darby D.A. Ortiz J.D., Grosch C.E., Lund S.P. 1,500-year cycle in the Arctic Oscillation identified in Holocene Arctic sea-ice drift. *Nat. Geosci.*, 2012, vol. 5, p. 897–900.

Dmitrenko I.A., Kirillov S.A., Tremblay L.B., Bauch D., Hölemann J.A., Krumpen T., Kassens H., Wegner C., Heinemann G., Schröder D. Impact of the Arctic Ocean Atlantic water layer on Siberian shelf hydrography. *J. Geophys. Res.*, 2010, vol. 115, C08010.

Eicken H., Reimnitz E., Alexandrov V., Martin T., Kassens H., Viehoff T. Sea ice processes in the Laptev Sea and their importance for sediment export. *Cont. Shelf Res.*, 1997, vol. 17(2), p. 205–233.

Fahl K., Stein R. Modern seasonal variability and deglacial/Holocene change of central Arctic Ocean sea-ice cover: New insights from biomarker proxy records. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2012, vol. 351–352, p. 123–133.

Fairbanks R.G., Mortlock R.A., Chiu T.-Ch., Cao L., Kaplan A., Guilderson T.P., Fairbanks T.W., Bloom A.L., Grootes P.M., Nadeau M.J. Radiocarbon calibration curve spanning 0 to 50,000 years BP based on paired ^{230}Th/^{234}U/238U and ^{14}C dates on pristine corals. *Quat. Sci. Rev.*, 2005, vol. 24, p. 1781–1796.

Fatela F., Taborda R. Confidence limits of species proportions in microfossil assemblages. *Mar. Micropal.*, 2002, vol. 45, p. 169–174.

Lubinski D.J., Polyak L.A., Forman S.L. Freshwater and Atlantic water inflows to the deep northern Barents and Kara Seas since *ca* 13 ^{14}C ka: foraminifera and stable isotopes. *Quat. Sci. Rev.*, 2001, vol. 20, p. 1851–1879.

Miller G.H., Alley R.B., Brigham-Grette J., Fitzpatrick J.J., Polyak L., Serreze M.C., White J. Arctic amplification: can the past constrain the future? *Quat. Sci. Rev.*, 2010, vol. 29, p. 1779–1790.

Osterman L.E., Poore R.Z., Foley K.M. Distribution of benthic foraminifers (>125 мм) in the surface sediments of the Arctic Ocean. *USGS Bulletin*, 1999, vol. 2164, 28 p.

Polyak L., Korsun S., Febo L., Stanovoy V., Khusid T., Hald M., Paulsen B.E., Lubinski D.A. Benthic foraminiferal assemblages from the southern Kara Sea, a river-influenced arctic marine environment. *J. Foraminiferal Res.*, 2002, vol. 32, no. 3, p. 252–273.

Polyak L., Alley R., Andrews J.T., Brigham-Grette J., Cronin T., Darby D., Dyke A.S., Fitzpatrick J.J., Funder S., Holland M., Jennings A.E., Miller G.H., O'Regan M., Savelle J., Serreze M., St. John K., White J.W.C., Wolff E. History of sea ice in the Arctic. *Quat. Sci. Rev.*, 2010, vol. 29, p. 1757–1778.

Rudels B., Jones E.P., Schauer U., Eriksson P. Atlantic sources of the Arctic Ocean surface and halocline waters. *Polar Res.*, 2004, vol. 23, p. 181–208.

Rudenko O., Tarasov P.E., Bauch H.A., Taldenkova E. A Holocene palynological record from the northeastern Laptev Sea and its implications for palaeoenvironmental research. *Quat. Int.*, 2014, vol. 348, p. 82–92.

Ślubowska M.A., Koç N., Rasmussen T.L., Klitgaard-Kristensen D. Changes in the flow of Atlantic water into the Arctic Ocean since the last deglaciation: Evidence from the northern Svalbard continental margin, 80°N. *Palaeoceanography*, 2005, vol. 20, PA4014.

Spielhagen R.F., Erlenkeuser H., Siegert C. History of freshwater runoff across the Laptev Sea (Arctic) during the last deglaciation. *Glob. Planet. Change*, 2005, vol. 48, p. 187–207.

Stein R. Arctic Ocean sediments: processes, proxies, and paleoenvironment. Amsterdam: Elsevier, 2008, 592 p.

Stepanova A., Taldenkova E., Bauch H.A. Ostracod palaeoecology and environmental change in the Laptev and Kara Seas (Siberian Arctic) during the last 18 000 years. *Boreas*, 2012, vol. 41(4), p. 557–577.

Stuiver M., Grootes P.M., Braziunas T. The GISP2 δ^{18}O climate record of the past 16 500 years and the role of the sun, ocean and volcanoes. *Quat. Res.*, 1995, vol. 44, p. 341–354.

Taldenkova E., Bauch H.A., Gottschalk J., Nikolaev S., Rostovtseva Y., Pogodina I., Ovsepyan Y., Kandiano E. History of ice-rafting and water mass evolution at the northern Siberian continental margin (Laptev Sea) during Late Glacial and Holocene times. *Quat. Sci. Rev.*, 2010, vol. 29, p. 3919–3935.

Taldenkova E., Bauch H.A., Stepanova A., Ovsepyan Y., Pogodina I., Klyuvitkina T., Nikolaev S. Benthic community changes at the North Siberian margin in response to Atlantic water mass variability since last deglacial times. *Mar. Micropal.*, 2012, vol. 96–97, p. 13–28.

Timokhov L.A. Regional characteristics of the Laptev and the East Siberian seas: climate, topography, ice phases, thermohaline regime, circulation. *Ber. Polarforsch*, 1994, vol. 144, p. 15–31.

Walker M, Head M.J., Berkelhammer M., Björck S., Cheng H., Cwynar L., Fisher D., Gkinis V., Long A., Lowe J., Newnham R., Rasmussen S.O., Weiss H. Formal ratification of the subdivision of the Holocene Series/Epoch (Quaternary System/Period): two new Global Boundary Stratotype Sections and Points (GSSPs) and three new stages/subseries. *Episodes*, 2018, vol. 41, p. 213–223.

Wollenburg J.E., Knies J., Mackensen A. High-resolution paleoproductivity fluctuations during the past 24 kyr as indicated by benthic foraminifera in the marginal Arctic Ocean. *Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol.*, 2004, vol. 204, p. 209–238.

Поступила в редакцию 04.05.2020
После доработки 16.06.2020
Принята к публикации 25.08.2020

N.O. Averkina[1], E.E. Taldenkova[2], Y.S. Ovsepyan[3], R.F. Spielhagen[4], H.A. Bauch[5], S.D. Nikolaev[6]

THE HOLOCENE HISTORY OF THE EASTERN CONTINENTAL MARGIN OF THE LAPTEV SEA: LITHOLOGICAL AND MICROPALEONTOLOGICAL EVIDENCE

Reconstruction of the Holocene history of the eastern Laptev Sea continental margin is based on the downcore records of ice- and iceberg-rafted debris (IRD) and fossil assemblages of benthic and planktic foraminifers in two marine sediment cores obtained from different depths on the continental slope, e. g. 122 and 983 m. The early Holocene (8,2–11,7 cal. ka) is distinguished by its warmest climatic conditions as evidenced by the highest abundance of foraminifers, low IRD content, bioproductivity peaks and high representation of phytodetritus species. At the beginning of the middle Holocene (7,4–8,2 cal. ka), a sharp decrease in foraminifera numbers was recorded, up to their complete disappearance in the core from 122 m water depth. In combination with extremely fine-grained composition of sediments this suggests the development of a thick ice cover, which might have caused a drop in bioproductivity. After 7,4 cal. ka the increasing amount of IRD together with the growing representation of both river-proximal benthic foraminifers and attached epifaunal species indicate climate cooling that has been also recorded previously for the western Laptev Sea. Its manifestations include the growing area of the sea-ice cover, southward shift of the seasonal drift ice margin, and the advance of ice caps on the Severnaya Zemlya Archipelago. The IRD peaks with the periodicity of 1–1,5 thousand years are almost synchronous in the west and east of the sea; they coincide with time intervals of 7–7,4, 6,4–6,6, 5–5,8, 2,8–3,8, 1,6–2 and 0,8–1,2 cal. ka.

Key words: paleoceanography, ice- and iceberg-rafted debris, foraminifers, Atlantic waters

Acknowledgements. Investigations of Ya.S. Ovsepyan and N.O. Averkina were financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-35-00362 mol-a). Taldenkova E.E. acknowledges support of the Russian Ministry of Science and Higher Education within the frame of the project «Arctic Transpolar System in climatic transition» (project no. RFMEFI61619X0108); Spielhagen R.F. and Bauch H.A. acknowledge financial support of the BMBF within the frame of the project «CATS Synthesis: The Changing Arctic Transpolar System» (project no. 03F0831).

REFERENCES

Aksenov Y., Ivanov V.V., Nurser A.J.G., Bacon S., Polyakov I.V., Coward A.C., Naveira-Garabato A.C., Beszczynska-Moeller A. The Arctic Circumpolar Boundary Current. *J. Geophys. Res.*, 2011, vol. 116, C09017, p. 1–28.

Alexandrov V., Martin T., Kolatschek J., Eicken H., Kreyscher M., Makshtas A.P. Sea ice circulation in the Laptev Sea and ice export to the Arctic Ocean: Results from satellite remote sensing and numerical modeling. *J. Geophys. Res.*, 2000, vol. 105, p. 17, 143–17, 159.

Alley R.B., Ágústsdóttir A.M. The 8^{k} event: Cause and consequences of a major Holocene abrupt climate change. *Quat. Sci. Rev.*, 2005, vol. 24, p. 1123–1149.

Bauch H.A., Mueller-Lupp T., Taldenkova E., Spielhagen R.F., Kassens H., Grootes P.M., Thiede J., Heinemeier J., Petryashov V.V. Chronology of the Holocene transgression at the North Siberian margin. *Glob. Planet. Change*, 2001, vol. 31, p. 125–139.

Bond G., Showers W., Cheseby M., Lotti R., Almasi P., deMenocal P., Priore P., Cullen H., Hajdas I., Bonani G. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 1997, vol. 278, p. 1257–1265.

Darby D.A. Ortiz J.D., Grosch C.E., Lund S.P. 1,500-year cycle in the Arctic Oscillation identified in Holocene Arctic sea-ice drift. *Nat. Geosci.*, 2012, vol. 5, p. 897–900.

Dmitrenko I.A., Hoelemann J.A., Kirillov S.A., Berezovskaya S.L., Kassens H. Rol' barotropnykh izmenenii urovnya morya v formirovanii rezhima techenii na shel'fe vostochnoi chasti morya Laptevykh [The role of barotropic sea-level changes in formation of current regime on the eastern Laptev Sea shelf], *DAN*, 2001, vol. 377, no. 1, p. 101–107. (In Russian)

Dmitrenko I.A., Kirillov S.A., Tremblay L.B., Bauch D., Hölemann J.A., Krumpen T., Kassens H., Wegner C., Heinemann G., Schröder D. Impact of the Arctic Ocean Atlantic water layer on Siberian shelf hydrography. *J. Geoph. Res.*, 2010, vol. 115, C08010.

Dobrovol'skii A.D., Zalogin B.S. Morya SSSR [Seas of the USSR], Moscow State Univ. Publ., 1982, 192 p. (In Russian)

Eicken H., Reimnitz E., Alexandrov V., Martin T., Kassens H., Viehoff T. Sea ice processes in the Laptev Sea and their importance for sediment export. *Cont. Shelf Res.,* 1997, vol. 17(2), p. 205–233.

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Pleistocene Paleogeography, Scientific Researcher; *e-mail*: natal-y@mail.ru

[2] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Pleistocene Paleogeography, Leading Scientific Researcher, PhD in Geography; *e-mail*: etaldenkova@mail.ru

[3] Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of ocean biostratigraphy and paleogeography, Scientific Researcher, PhD in Geology and Mineralogy; *e-mail*: yaovsepyan@yandex.ru

[4] Helmholz Center for Ocean Research Kiel (GEOMAR), Kiel, Germany, PhD in Geology; *e-mail*: rspielhagen@geomar.de

[5] Alfred Wegener Institute (AWI), Bremerhaven, Germany, PhD in Geology; *e-mail*: hbauch@geomar.de

[6] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Pleistocene Paleogeography, Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; *e-mail*: cdnikolaev@yandex.ru

Fahl K., Stein R. Modern seasonal variability and deglacial/Holocene change of central Arctic Ocean sea-ice cover: New insights from biomarker proxy records. *Earth Planet. Sci. Lett,* 2012, vol. 351–352, p. 123–133.

Fairbanks R.G., Mortlock R.A., Chiu T.-Ch., Cao L., Kaplan A., Guilderson T.P., Fairbanks T.W., Bloom A.L., Grootes P.M., Nadeau M.J. Radiocarbon calibration curve spanning 0 to 50,000 years BP based on paired ^{230}Th/^{234}U/^{238}U and ^{14}C dates on pristine corals. *Quat. Sci. Rev*., 2005, vol. 24, p. 1781–1796.

Fatela F., Taborda R. Confidence limits of species proportions in microfossil assemblages. *Mar. Micropal.,* 2002, vol. 45, p. 169–174.

Ivanov V.V., Timokhov L.A. Atlanticheskie vody v arkticheskoi tsirkulyatsionnoi transpolyarnoi sisteme [Atlantic waters in the Arctic Transpolar System], *Meteorol. i gidrol.*, 2019, no. 4, p. 36–53. (In Russian)

Korsun S.A., Pogodina I.A., Tarasov G.A., Matishov G.G. Foraminifery Barentseva morya (gidrobiologiya i chetvertichnaya paleoekologiya) [Foraminifera of the Barents Sea (hydrobiology and Quaternary paleoecology)], Apatity: KNTs RAN Publ., 1994, 136 p. (In Russian)

Lubinski D.J., Polyak L.A., Forman S.L. Freshwater and Atlantic water inflows to the deep northern Barents and Kara seas since *ca* 13 ^{14}C ka: foraminifera and stable isotopes. *Quat. Sci. Rev.,* 2001, vol. 20, p. 1851–1879.

Miller G.H., Alley R.B., Brigham-Grette J., Fitzpatrick J.J., Polyak L., Serreze M.C., White J. Arctic amplification: can the past constrain the future? *Quat. Sci. Rev*., 2010, vol. 29, p. 1779–1790.

Osterman L.E., Poore R.Z., Foley K.M. Distribution of benthic foraminifers (>125 мм) in the surface sediments of the Arctic Ocean. *USGS Bulletin,* 1999, vol. 2164, 28 p.

Ovsepyan Y.S., Averkina N.O., Taldenkova E.E., Spielhagen R.F., Bauch H.A., Tikhonova A.V. Bentosnye foraminifery kak indikatory proniknoveniya atlanticheskikh vod v arkticheskii bassein v kontse pozdnego pleistotsena – golotsene [Benthic foraminifers as indicators of Atlantic water influence in the Arctic during the Late Pleistocene and the Holocene], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr*., 2019, no. 6, p. 41–50. (In Russian)

Ovsepyan Y.S., Taldenkova E.E., Bauch H.A., Kandiano E.S. Late Pleistocene–Holocene events on the continental slope of the Laptev Sea: Evidence from benthic and planktonic foraminiferal assemblages. *Stratigraphy. Geol. Correlation,* 2015, vol. 23, no. 6, p. 645–660.

Polyak L., Alley R., Andrews J.T., Brigham-Grette J., Cronin T., Darby D., Dyke A.S., Fitzpatrick J.J., Funder S., Holland M., Jennings A.E., Miller G.H., O'Regan M., Savelle J., Serreze M., St. John K., White J.W.C., Wolff E. History of sea ice in the Arctic. *Quat. Sci. Rev.,* 2010, vol. 29, p. 1757–1778.

Polyak L., Korsun S., Febo L., Stanovoy V., Khusid T., Hald M., Paulsen B.E., Lubinski D.A. Benthic foraminiferal assemblages from the southern Kara Sea, a river-influenced arctic marine environment. *J. Foraminiferal Res*., 2002, vol. 32, no. 3, p. 252–273.

Rudels B., Jones E.P., Schauer U., Eriksson P. Atlantic sources of the Arctic Ocean surface and halocline waters. *Polar Res*., 2004, vol. 23, p. 181–208.

Rudenko O., Tarasov P.E., Bauch H.A., Taldenkova E. A Holocene palynological record from the northeastern Laptev Sea and its implications for palaeoenvironmental research. *Quat. Int.,* 2014, vol. 348, p. 82–92.

Ślubowska M.A., Koç N., Rasmussen T.L., Klitgaard-Kristensen D. Changes in the flow of Atlantic water into the Arctic Ocean since the last deglaciation: Evidence from the northern Svalbard continental margin, 80°N. *Palaeoceanography*, 2005, vol. 20, PA4014.

Spielhagen R.F., Erlenkeuser H., Siegert C. History of freshwater runoff across the Laptev Sea (Arctic) during the last deglaciation. *Glob. Planet. Change*, 2005, vol. 48, p. 187–207.

Stein R. Arctic Ocean sediments: processes, proxies, and paleoenvironment. Amsterdam, Elsevier, 2008, 592 p.

Stepanova A., Taldenkova E., Bauch H.A. Ostracod palaeoecology and environmental change in the Laptev and Kara seas (Siberian Arctic) during the last 18 000 years. *Boreas*, 2012, vol. 41(4), p. 557–577.

Stuiver M., Grootes P.M., Braziunas T. The GISP2 δ^{18}O climate record of the past 16,500 years and the role of the sun, ocean and volcanoes. *Quat. Res.,* 1995, vol. 44, p. 341–354.

Taldenkova E., Bauch H.A., Gottschalk J., Nikolae S., Rostovtseva Y., Pogodina I., Ovsepyan Y., Kandiano E. History of ice-rafting and water mass evolution at the northern Siberian continental margin (Laptev Sea) during Late Glacial and Holocene times. *Quat. Sci. Rev.,* 2010, vol. 29, p. 3919–3935.

Taldenkova E., Bauch H.A., Stepanova A., Ovsepyan Y., Pogodina I., Klyuvitkina T., Nikolaev S. Benthic community changes at the North Siberian margin in response to Atlantic water mass variability since last deglacial times. *Mar. Micropal*., 2012, vol. 96-97, p. 13–28.

Timokhov L.A. Regional characteristics of the Laptev and the East Siberian seas: climate, topography, ice phases, thermohaline regime, circulation. *Ber. Polarforsch*., 1994, vol. 144, p. 15–31.

Walker M, Head M.J., Berkelhammer M., Björck S., Cheng H., Cwynar L., Fisher D., Gkinis V., Long A., Lowe J., Newnham R., Rasmussen S.O., Weiss H. Formal ratification of the subdivision of the Holocene Series/Epoch (Quaternary System/Period): two new Global Boundary Stratotype Sections and Points (GSSPs) and three new stages/subseries. *Episodes*, 2018, vol. 41, p. 213–223.

Wollenburg J.E., Knies J., Mackensen A. High-resolution paleoproductivity fluctuations during the past 24 kyr as indicated by benthic foraminifera in the marginal Arctic Ocean. *Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol*., 2004, vol. 204, p. 209–238.

Received 04.05.2020
Revised 16.06.2020
Accepted 25.08.2020

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 911.9; 551.4.012; 551.4.042; 551.4.08

А.Ю. Сидорчук[1]

ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОЦЕНКИ ОВРАЖНОГО ПОТЕНЦИАЛА

Предложен экспресс-метод оценки овражного потенциала, основанный на учете критических характеристик потока, при которых начинается линейный размыв грунта. Новизна предложенного подхода заключается в переходе от расчета критической скорости потока к расчету критического слоя стока, при котором реализуется такая скорость. Все величины, необходимые для расчета критического слоя стока и уровня овражного потенциала как нормированной разности максимального слоя стока и его критической величины, вполне определенны и могут быть рассчитаны и/или определены по данным наблюдений. Метод легко и быстро реализуется в среде любой географической информационной системы; на выходе получаются схема распределения уровня овражного потенциала по территории (водосбору) и степень риска развития овражной эрозии для территории (водосбора) в целом. Сравнение результатов оценки уровня овражного потенциала экспресс-методом с данными расчетов овражной эрозии с помощью детальной динамической модели показало вполне удовлетворительное их соответствие. Это подтверждает применимость экспресс-метода для быстрой оценки возможности использования тех или иных территорий для освоения и риска нарушения ландшафтов при естественных процессах овражной эрозии.

Ключевые слова: овражная эрозия; критический слой стока; полуостров Ямал

Введение. Овражная эрозия была и остается одним из наиболее разрушительных видов эрозионных процессов. Если на сельскохозяйственных землях в РФ она в настоящее время в целом идет на убыль [Гафуров и др., 2018], то в пределах поселений и территорий новейшего техногенного освоения овражная эрозия, наоборот, увеличивается [Григорьев и др., 2016]. Это особенно заметно в условиях Арктики, где сочетание легко размываемых грунтов и неустойчивого растительного покрова приводит к возникновению как естественных, так и техногенных оврагов [Познанин, 2012; Sidorchuk, 2015].

Наиболее достоверные оценки потенциала овражной эрозии получаются при прямом расчете трансформации продольных профилей всех возможных линейных эрозионных форм с помощью той или иной динамической модели овражной эрозии для всех расходов воды на данном водосборе в течение характерного времени развития оврага. Этот метод, единственно верный при детальных проектных работах на конкретном водосборе, требует большого количества исходных данных и калибровки модели [Сидорчук, 1998а, 2020]. Для предварительной оценки овражного потенциала на большой территории, намеченной для последующего освоения, такой подход является избыточным.

Имеется значительное количество несложных методов оценки овражного потенциала некоторой территории. Большинство их базируется на оценках «критических скоростей начала размыва» в отечественной литературе [Мирцхулава, 1970; Зорина, 1979] или «геоморфологических пороговых величин» в литературе международной [Schumm, 1979]. Главным недостатком этих подходов является необходимость назначения некоторого особого расхода воды в овражной системе, для которого и рассчитывается критическая скорость начала размыва или пороговые величины уклона и площади водосбора. Так, например, в методе Е.Ф. Зориной [1979] предельная длина овражной формы L равна

$$L = 0{,}28\left(\frac{d}{W}\right)^{0{,}67}\frac{HQ^{0{,}67}}{n^2U_{cr}^{2{,}67}}. \qquad (1)$$

Здесь H – глубина базиса эрозии, Q – формирующий расход воды, n – коэффициент шероховатости Маннинга, U_{cr} – критическая неразмывающяя скорость, d и W – глубина и ширина потока в овраге.

Для расчета предельной длины овражной формы, как и входящих в формулу (1) морфометрических характеристик и критической скорости начала размыва, необходимо назначить расчетный расход воды. Желательно, чтобы результаты расчета при таком расходе воды были эквивалентны расчетам для всех расходов, формирующих овраг. Выбор эквивалентного расхода необходимо обосновать, что часто не делается. Для такого обоснования [Маккавеев, 1955; Wolman, Miller, 1960; Сидорчук, 1998б] требуются детальные сведения о гидрологическом режиме на водосборе.

Необходим такой экспресс-метод оценки, у которого не было бы указанных выше недостатков. В статье предлагается и обосновывается новый метод, а также приводится пример его применения для овражно-балочного водосбора на Бованенковском

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, вед. науч. с., докт. геогр. н.; *e-mail*: fluvial05@gmail.com

газоконденсатном месторождении (ГКМ) на полуострове Ямал.

Метод. Основой предлагаемого нового метода является переход от критической скорости начала линейного размыва к критической величине слоя стока, при превышении которой начинается размыв. Запишем критическую скорость потока U_{cr} по формуле Шези-Маннинга через уклон S, глубину d и коэффициент шероховатости n:

$$U_{cr} = \frac{\sqrt{S}}{n} d^{2/3}. \quad (2)$$

Если с помощью гидравлико-морфометрической зависимости заменить в ней глубину потока d степенной функцией от расхода воды Q (т.е. произведением слоя стока M на площадь водосбора F в данной точке $Q=kMF$):

$$d = pQ^m, \quad (3)$$

то получим

$$U_{cr} = \frac{\sqrt{S}}{n}\left(pQ^m\right)^{2/3} = \frac{\sqrt{S}}{n} p^{2/3}\left(kMF\right)^{2m/3}. \quad (4)$$

Здесь k = 1/84600000 – переходный коэффициент от размерности расхода воды (м^3/с) к размерности слоя стока (мм) при выражении площади водосбора в м^2; p и m – коэффициент и показатель степени в морфометрической зависимости (3). Для применения формулы (4), например, для расчетов по формуле (1), требуется задать расчетный расход воды или слой стока, в общем случае неизвестный. Для того, чтобы избавиться от этой неопределенности, достаточно решить формулу (4) относительно слоя стока:

$$M_{cr}^{2m/3} = \frac{nU_{cr}}{\sqrt{S_{cr}}\, p^{2/3}\left(kF\right)_{cr}^{2m/3}}. \quad (5)$$

Формула (5) означает, что если наблюдаемый слой стока M превышает рассчитанное критическое значение M_{cr}, то в данном пункте на водосборе возможен линейный размыв. Если наблюдаемый максимальный для данной территории слой стока не превышает рассчитанного критического, эрозионный размыв происходить не будет. Размыв будет тем существеннее, чем больше разность между максимальной для данной территории величиной $M_{\max}^{2m/3}$ и критическим значением $M_{cr}^{2m/3}$. Эту разность в данном пункте, приведенную к $M_{\max}^{2m/3}$, назовем уровнем овражного потенциала R_U

$$RU = \frac{M_{\max}^{2m/3} - M_{cr}^{2m/3}}{M_{\max}^{2m/3}}. \quad (6)$$

Отношение числа расчетных пунктов (пикселей) с положительной величиной эрозии $N_{RU>0}$ к общему числу N расчетных пунктов (пикселей) характеризует степень риска развития овражной эрозии R.

Необходимые величины для расчета R_U и R обычно доступны. Максимальный суточный слой стока для данной территории или водосбора M_{max} есть величина вполне определенная и может быть получена или по наблюдениям, или по гидрологической модели. Площадь водосбора и уклон в данном пункте получаются с топографической карты или из цифровой модели рельефа. Коэффициент шероховатости n для потоков на склонах или в оврагах необходимо установить из наблюдений, как и коэффициенты p и m. При отсутствии наблюдений эти параметры подбираются из опубликованных [Park, 1977] для близких условий. Критическая скорость начала размыва рассчитывается по известным формулам [Мирцхулава, 1970; Кузнецов, 1981; Sidorchuk, Grigor'ev, 1998] исходя из литологии размываемых грунтов и свойств растительного покрова.

Результаты. Расчеты овражного потенциала проведены для одного из участков Бованенковского ГКМ. Это водосбор балки площадью 1,14 км^2 с естественными и техногенными оврагами, на котором расположен поселок Передвижная база бурения (ПББ). Здесь в 1990–1997 гг. были проведены измерения стока воды, морфометрических характеристик склоновых потоков и темпов эрозии [Бобровицкая и др., 1999; Sidorchuk, 2015]. Имеются также режимные наблюдения на метеостанции Марресале [Булыгина и др., 2009] и данные экспедиционных измерений стока воды в 1986–1990 гг. на стационаре Государственного гидрологического института Северный [Гидрология …, 2009]. Исходя из этих исследований, параметры в формулах (5) и (6) имеют значения: m=0,3; p=0,21; n=0,06; M_{max}=62 мм (раз в 100 лет). В результате формула (5) приобретает вид

$$M_{cr}^{0,2} = \frac{6{,}57U_{cr}}{\sqrt{S_{cr}}\, F_{cr}^{0,2}}, \quad (7)$$

а формула (6) –

$$R_U = 1 - \frac{2{,}88U_{cr}}{\sqrt{S_{cr}}\, F_{cr}^{0,2}}. \quad (8)$$

Критическая скорость начала размыва для выбранного участка устанавливалась в ходе полевых экспериментов для разных литологических разностей грунтов и состояния растительного покрова, для которого в данном случае основной характеристикой является объем подземной биомассы (тонких корней) в поверхностном слое грунта [Sidorchuk, Grigor'ev, 1998]. Контрольные расчеты проведены для значений U_{cr}= 0,2 м/с (суглинистые грунты с полностью нарушенным растительным покровом) и U_{cr}= 0,5 м/с (суглинистые грунты под естественным мелкокустарничковым растительным покровом).

Расчеты по формуле (8) проведены с помощью модулей географической информационной системы QGIS [QGIS …, 2019]. Цифровая модель рельефа для участка Бованенковского ГКМ извлечена из большой цифровой модели рельефа Арктики ArcticDEM [2018] с горизонтальным разрешением 2 м. Площади водосбора рассчитаны в модуле ГИС SAGA Terrain Analysis – Hydrology – Catchment area, а уклоны –

Terrain Analysis – Morphometry – Slope, aspect, curvature – 9 parameter 2nd order polynom – [0]radians. Распределение R_U по площади получено в калькуляторе растров. Векторизация этого растра (модуль Vector ↔ raster – Raster values to points) позволяет получить таблицу атрибутов, установить количество пикселей с R_U>0 и вычислить степень риска развития овражной эрозии R. Эти процедуры занимают несколько минут, так что предложенный метод реализуется в среде QGIS очень быстро. Использованные для расчетов модули входят в любую географическую информационную систему, так что экс-пресс-метод может быть реализован в любой удобной для пользователя оболочке.

Значение U_{cr}= 0,2 м/с соответствует суглинистым грунтам с полностью нарушенным растительным покровом. Такие условия характерны для тех участков водосбора балки, где произошло нарушение растительного покрова как при техногенном воздействии (при строительстве и движении транспорта), так и в результате естественных склоновых процессов – быстрых сплывов. Таким образом, на рис. 1 показан максимально возможный потенциал (риск) процессов линейного размыва для данного водосбора. Степень риска развития овражной эрозии R составляет 0,17. Уровень овражного потенциала R_U максимален на крутых склонах балки и речной долины, в вершинах большинства оврагов. На этих же участках максимальна вероятность схождения быстрых сплы-

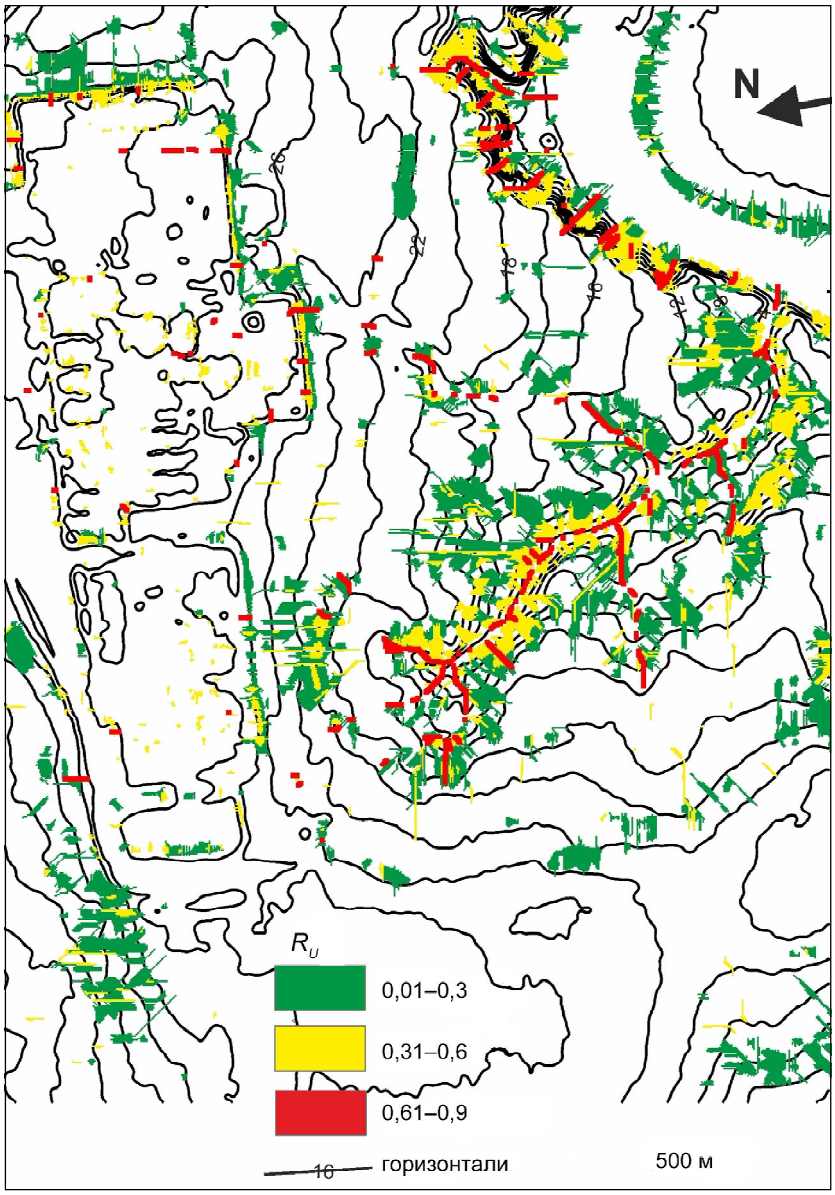

Рис. 1. Распределение уровня овражного потенциала R_U на водосборе балки на Бованенковском ГКМ, рассчитанного при критической скорости начала размыва U_{cr}= 0,2 м/с. Белый фон соответствует отрицательным значениям R_U

Fig. 1. Distribution of the gully erosion potential R_U at the catchment within the Bovanenkovo gas condensate field calculated for the critical velocity of erosion initiation U_{cr} = 0,2 m/s. White background corresponds to negative R_U values

вов [Воскресенский, 2001; Лейбман, Кизяков, 2007], так что принятое значение U_{cr}=0,2 м/с полностью соответствует реальной обстановке. Также на рис. 1 выделяются края песчаной площадки, на которой расположен поселок ПББ, где полевые наблюдения выявляют многочисленные линейные размывы.

Значение U_{cr}= 0,5 м/с соответствует суглинистым грунтам с ненарушенным растительным покровом. Это идеальные условия, которые не реализуются даже при полном отсутствии техногенного воздействия на ландшафт из-за естественных процессов нарушения целостности верхнего слоя грунта. В этих условиях значение R составляет 0,004. Тем не менее, даже при расчетах для идеальных условий ненарушенного растительного покрова в пределах основных эрозионных форм – в балке и в части оврагов – имеются участки с положительным овражным потенциалом (рис. 2).

Гистограммы положительных уровней овражного потенциала R_U (рис. 3) описываются функциями, близкими к экспоненциальной. Наибольшую повторяемость имеют малые значения R_U; с его увеличением повторяемость быстро уменьшается. Такое распределение R_U по частотам указывает в целом на благоприятные условия для освоения водосбора, на котором расположен поселок ПББ. Это подтверждается отсутствием серьезных угроз функционированию всех служб ПББ за более чем 30 лет

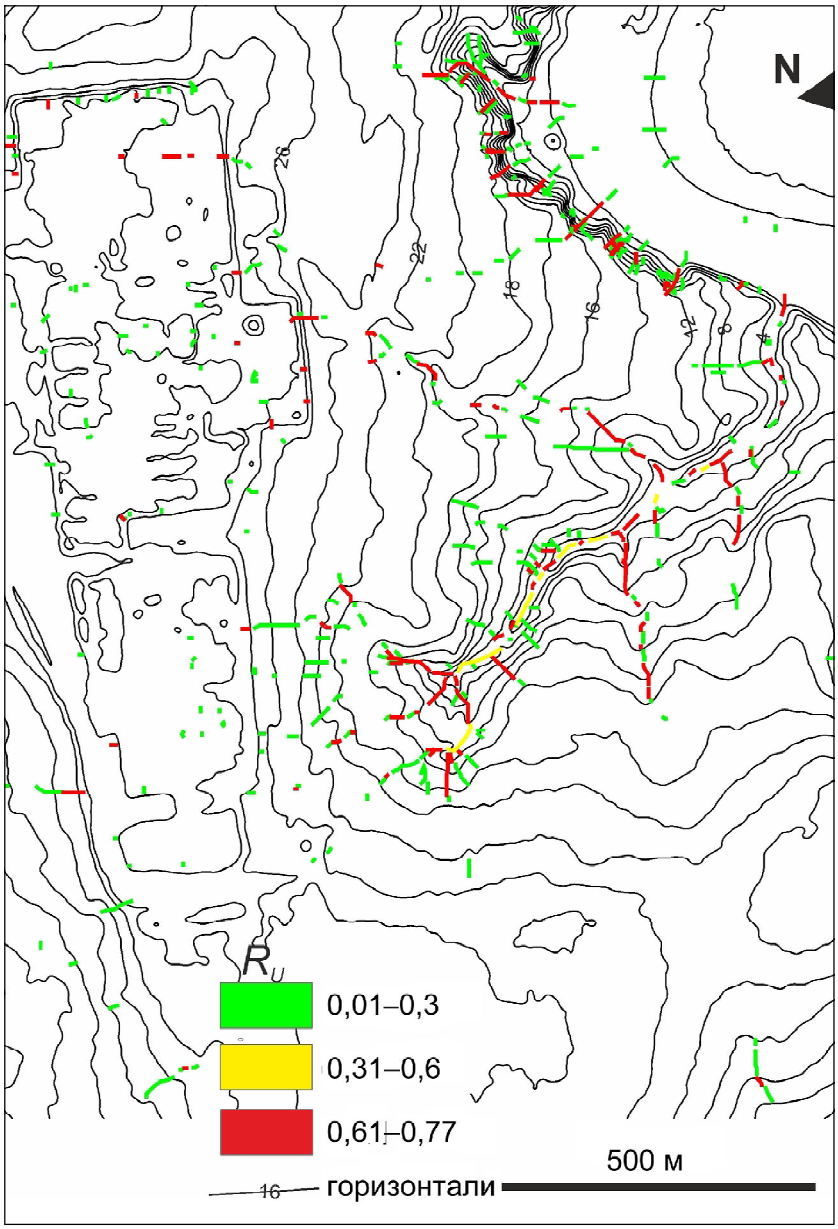

Рис. 2. Распределение уровня овражного потенциала R_U на водосборе балки на Бованенковском ГКМ, рассчитанного при критической скорости начала размыва U_{cr}= 0,5 м/с

Fig. 2. Distribution of the gully erosion potential R_U at the catchment within the Bovanenkovo gas condensate field calculated for the critical velocity of erosion initiation U_{cr} = 0,5 m/s

его существования [Sidorchuk, 2015]. Тем не менее, овраг Антропогенный подходит к самой площадке поселка. В его вершине выявляется риск высокой овражной эрозии как при критической скорости начала размыва 0,2 м/с, так и, что особенно важно, при U_{cr}=0,5 м/с, то есть даже при ненарушенном почвенно-растительном покрове (рис. 4).

Обсуждение результатов. Для балки на Бованенковском ГКМ были проведены расчеты глубины эрозионного вреза по всем линиям тока на водосборе с помощью полной динамической модели овражной эрозии и термоэрозии GULTEM [Сидорчук, 2020]. Можно сравнить результаты расчета величин эрозии по полной модели с оценками уровня овражного потенциала с помощью предлагаемого экспресс-метода по тем же линиям тока для положительных значений R_U (рис. 5). Для каждой отдельной линии тока имеется вполне удовлетворительная связь рассчитанных глубин эрозионного вреза Δh и величин уровня овражного потенциала R_U, которая описывается экспоненциальной функцией

$$\Delta h = a \exp(bR_U). \quad (9)$$

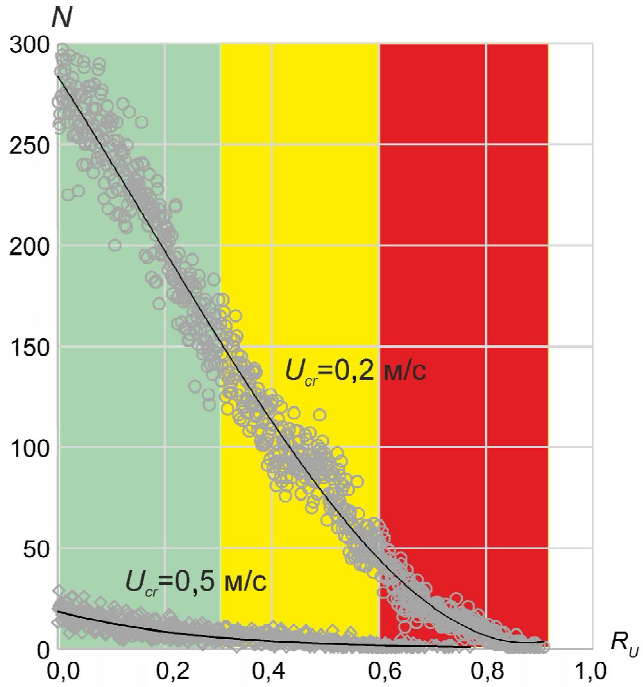

Рис. 3. Гистограммы ненулевого уровня овражного потенциала R_U на водосборе балки на Бованенковском ГКМ для разных критических скоростей начала размыва U_{cr}. N – число пикселей с ненулевым R_U в столбце гистограммы с интервалом 0,01

Fig. 3. Histograms of positive gully erosion potential R_U at the catchment within the Bovanenkovo gas condensate field for different critical velocities of erosion initiation U_{cr}. N is the number of pixels with positive R_U in the histogram column with 0,01 interval

Коэффициент b варьирует в довольно узких пределах 3,4–3,5, а коэффициент a изменяется от 0,017 до 0,045 для разных линий тока, определяя ширину полосы разброса для всех данных. Главной причиной того, что для разных линий тока зависимость (9) не совпадает по коэффициентам, является меньшее число факторов эрозии, которое учитывается в экспресс-методе по сравнению с полной моделью. В полной модели расчет трансформации продольного профиля оврага проводится для всей линии тока, учитывается положение базиса эрозии и изменение уклонов потока по его длине. Глубины вреза изменяются также в результате оползания материала со склонов оврага. В экспресс-методе учтены только местные уклон и площадь водосбора в данном пункте, а склоновые процессы вообще не принимаются во внимание.

Ширина полосы разброса значений R_U составляет 0,3 (см. рис. 5). Поэтому целесообразно использовать для классификации и картографирования уровня овражного потенциала три градации R_U: 0,01–0,3; 0,31–0,6 и 0,61–1, соответствующие слабому, среднему и высокому уровням.

Выводы:

– предложен экспресс-метод оценки овражного потенциала, основанный на традиционном учете пороговых величин в трансформации ландшафта, в данном случае, критических характеристик потока, при которых начинается линейный размыв грунта;

– новизна предложенного подхода заключается в переходе от расчета критической скорости потока (формула 2) к расчету критического слоя стока, при котором реализуется такая скорость (формула 5). В этом случае исчезает неопределенность, которая существует при выборе условий для расчета по формуле 2;

– все величины, необходимые для расчета критического слоя стока (формула 5) и нормированной разности максимального слоя стока и его критической величины (формула 6), вполне определенны и могут быть рассчитаны и/или получены по данным наблюдений;

– метод легко и быстро реализуется в среде любой географической информационной системы; на выходе получаются схема распределения уровня овражного потенциала по территории (водосбору) и степень риска развития овражной эрозии для всей территории;

– сравнение результатов оценки овражного потенциала экспресс-методом с данными расчетов овражной эрозии с помощью детальной динамической модели показало их вполне удовлетворительное соответствие. Это означает возможность применения метода для быстрой оценки перспектив использования тех или иных территорий для освоения и рисков нарушения ландшафтов при естественных процессах овражной эрозии.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 18-05-60147).

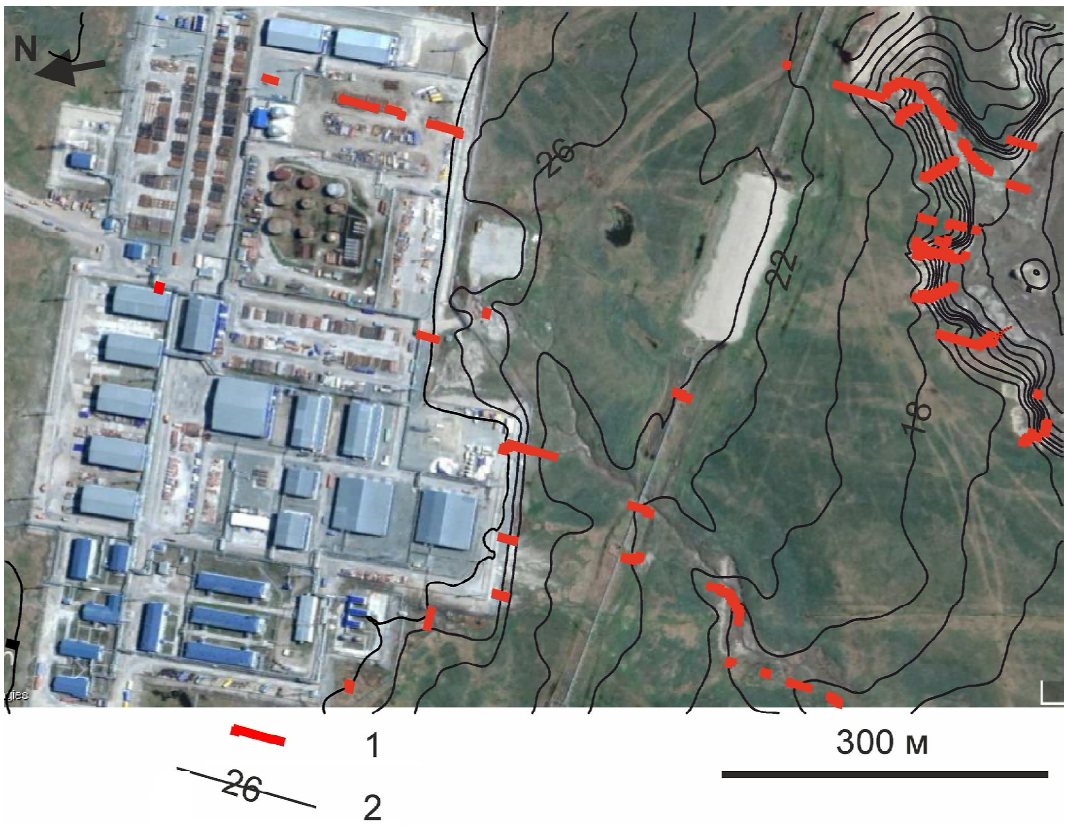

Рис. 4. Изображение площадки поселка ПББ и вершин оврага Антропогенный на снимке GOOGLE EARTH от 27 июня 2016 г. с областями рассчитанного высокого риска овражной эрозии при = 0,5 м/с (1). Также показаны горизонтали рельефа (2)

Fig. 4. The site of the PBB settlement and the heads of Antropogeniy gully on the GOOGLE EARTH image of June 27, 2016, with areas of the calculated high risk of gully erosion at U_{cr} = 0,5 m/s (1). The relief contours are also shown (2)

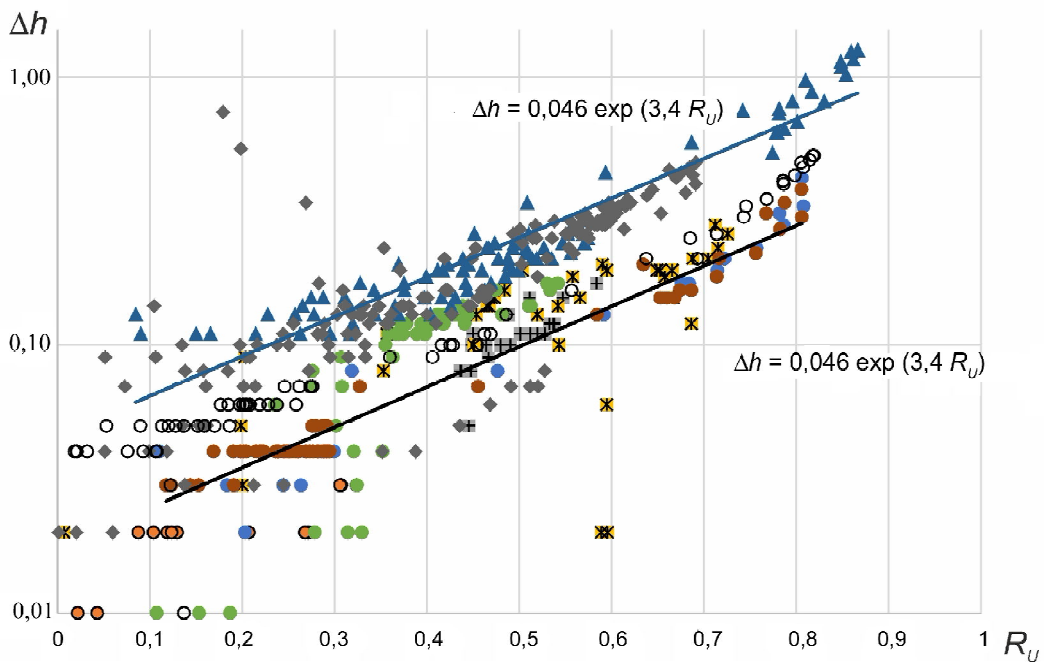

Рис. 5. Связь между значениями уровня овражного потенциала R_U, рассчитанными по экспресс-модели (формула 8), и величинами глубины овражного вреза Δh, полученными с помощью полной динамической модели овражной эрозии и термоэрозии GULTEM вдоль тех же линий тока

Fig. 5. The relationship between the values of gully erosion potential R_U calculated by the express model (formula 8) and the values of gully depth Δh obtained using the GULTEM dynamic model of gully erosion and thermal erosion along the same flow lines

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бобровицкая Н.Н., Баранов А.В., Василенко М.Н., Зубкова К.М. Сток воды и наносов на овражных водосборах // Эрозионные процессы центрального Ямала / Под ред. А.Ю. Сидорчука и А.В. Баранова. СПб: РНИИ Культурного и природного наследия, 1999. С. 90–105.

Воскресенский К.С. Современные рельефообразующие процессы на равнинах Севера России. М.: Изд-во МГУ, 2001. 240 с.

Гафуров А.М., Рысин И.И., Голосов В.Н., Григорьев И.И., Шарифуллин А.Г. Оценка современного роста вершин оврагов южного мегасклона Восточно-Европейской равнины с применением набора инструментальных методов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2018. № 5. С. 61–68.

Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири / Под ред. С.М. Новикова. СПб.: ВВМ, 2009. 536 с.

Григорьев И.И., Ковалев С.Н., Рысин И.И. Техногенные овраги // Геоморфология. 2016. № 2. С. 27–33.

Зорина Е.Ф. Расчетные методы определения потенциала овражной эрозии // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 7. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. С. 81–90.

Кузнецов М.С. Противоэрозионная стойкость почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. 136 с.

Лейбман М.О., Кизяков А.И. Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова. М.: Типография Россельхозакадемии, 2007. 206 с.

Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1955. 348 с.

Мирцхулава Ц.Е. Инженерные методы расчета и прогноза водной эрозии. М.: Колос, 1970. 240 с.

Познанин В.Л. Эрозионные процессы в криолитозоне // Пространство и время. 2012. № 1. С. 127–132.

Сидорчук А.Ю. Динамическая модель овражной эрозии // Геоморфология. 1998а. № 4. С. 28–38.

Сидорчук А.Ю. Модель для расчета морфометрии стабильного оврага // Геоморфология. 1998б. № 2. С. 43–52.

Сидорчук А.Ю. Оценка овражного потенциала территории на примере центрального Ямала // География и природные ресурсы. 2020. № 2(161). С. 109–118.

Park C.C. World-wide variations in hydraulic geometry exponents of stream channels: An analysis and some observations, *J. Hydrol.*, 1977, vol. 33, p. 133–146.

Schumm S.A. Geomorphic thresholds: the concept and its applications. *Trans. Inst. Brit. Geogr.*, 1979, NS4, p. 485–515.

Sidorchuk A. Gully erosion in the cold environment: Risks and hazards. *Advances in Environmental Research*, vol. 44, Hauppauge NY: Nova Science Publ., 2015, p. 139–192.

Sidorchuk A., Grigor'ev V. Soil erosion on the Yamal peninsula (Russian Arctic) due to gas field exploitation. *Advances GeoEcology*, 1998, vol. 31, p. 805–811.

Wolman M.G., Miller J.P. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. *Journal of Geology*, 1960, vol. 68(1), p. 54–74.

Электронные ресурсы

Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (TTTR). Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620942. URL: http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных (дата обращения 10.11.2019).

ArcticDEM, 2018. Harvard Data V1. URL: https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH (дата обращения 10.11.2019).

QGIS Development Team, 2004–2019. V3.10 URL: https://qgis.org (дата обращения 10.11.2019).

Поступила в редакцию 22.11.2019
После доработки 21.04.2020
Принята к публикации 25.08.2020

A.Yu. Sidorchuk[1]

EXPRESS METHOD OF ESTIMATION OF GULLY EROSION POTENTIAL

An express method for calculation of gully erosion potential is proposed. It is based on the estimation of critical flow characteristics at which linear erosion of soil begins. The novelty of the proposed approach is the transition from calculating the critical velocity of erosion initiation to calculating the critical runoff depth at which such velocity is realized. All values necessary for calculating the critical runoff depth and the gully erosion potential as the normalized difference between the maximum runoff depth and its critical value are well-defined and could be obtained both from measurements and by calculation. The method is easily and quickly implemented in any geographical information system; the output is the distribution of the level of the gully potential over the territory (catchment) and the degree of risk of the development of gully erosion for the entire territory (catchment). The results of evaluating the gully erosion potential by the express method were compared with the data of gully erosion calculation using the detailed dynamic model and showed the satisfactory agreement. This confirms the possibility of applying the express-method for quick assessment of development potential of particular territories, as well as the risks of landscape disturbance during natural processes of gully erosion.

Key words: gully erosion; critical runoff depth; Yamal Peninsula

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-05-60147).

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; *e-mail*: fluvial05@gmail.com

REFERENCES

Bobrovitskaya N.N., Baranov A.V., Vasilenko M.N., Zubkova K.M. Stok vody i nanosov na ovrazhnykh vodosborakh [Water and sediment runoff in gully catchments] *Erozionnyye protsessy tsentral'nogo Yamala* [Erosion processes in the Central Yamal Peninsula] A.Yu. Sidorchuk, A.V. Baranov (Eds.). St. Petersburg, RNII kul'turnogo i prirodnogo naslediya Publ., 1999, p. 90–105. (In Russian)

Gafurov A.M., Rysin I.I., Golosov V.N., Grigoriev I.I., Sharifullin A.G. Otsenka sovremennogo rosta vershin ovragov yuzhnogo megasklona Vostochno-Yevropeyskoy ravniny s primeneniyem nabora instrumental'nykh metodov [Estimation of the recent rate of gully head retreat on the southern megaslope of the East European Plain using a set of instrumental methods], *Vestnik Mosk. Un-ta. Series 5. Geogr*., 2018, no. 5, p. 61–68. (In Russian)

Gidrologiya zabolochennykh territoriy zony mnogoletney merzloty Zapadnoy Sibiri [Hydrology of wetlands within the permafrost zone of Western Siberia]. Novikov S.M. (Ed.). St. Petersburg, VVM Publ., 2009, 536 p. (In Russian)

Grigoriev I.I., Kovalev S.N., Rysin I.I. Tekhnogennyye ovragi [Technogenic gullies] *Geomorfologiya*, 2016, no. 2, p. 27–33. (In Russian)

Kuznetsov M.S. Protivoerozionnaya stoykost' pochv [Erosion resistance of soils]. Moscow, Moscow Univ. Publ., 1981, 136 p. (In Russian)

Leibman M.O., Kizyakov A.I. Kriogennyye opolzni Yamala i Yugorskogo poluostrova [Cryogenic landslides of the Yamal and Ugra peninsulas]. Moscow, Rossel'khozakademiya Publ., 2007, 206 p. (In Russian)

Makkaveev N.I. Ruslo reki i eroziya v eyo basseine [River channel and erosion in its basin]. Moscow, AN SSSR Publ., 1955, 348 p. (In Russian)

Mirtskhulava C.E. Inzhenernyye metody rascheta i prognoza vodnoy erozii [Engineering methods for calculating and predicting water erosion]. Moscow, Kolos Publ., 1970, 240 p. (In Russian)

Park C.C. World-wide variations in hydraulic geometry exponents of stream channels: An analysis and some observations, *J. Hydrol*., 1977, vol. 33, p. 133–146.

Poznanin V.L. Erozionnyye protsessy v kriolitozone [Erosion processes in the permafrost zone], *Prostranstvo i vremya*, 2012, no. 1, p. 127–132. (In Russian)

Schumm S.A. Geomorphic thresholds: the concept and its applications, *Trans. Inst. Brit. Geogr*., 1979, NS4, p. 485–515.

Sidorchuk A.Yu. Dinamicheskaya model' ovrazhnoy erozii [Dynamic model of gully erosion], *Geomorfologiya*, 1998a, no. 4, p. 28–38. (In Russian)

Sidorchuk A.Yu. Model' dlya rascheta morfometrii stabil'nogo ovraga [Model for calculating the morphometry of a stable gully], *Geomorfologiya*, 1998b, no. 2, p. 43–52. (In Russian)

Sidorchuk A. Gully erosion in the cold environment: Risks and hazards, *Advances in Environmental Research*. 2015, vol. 44. Hauppauge NY, Nova Science Publ., p. 139–192.

Sidorchuk A.Yu. Assessing the gully potential of a territory (a case study of Central Yamal, *Geography and Natural Resources*, 2020, vol. 41, no. 2, p. 178–186.

Sidorchuk A., Grigor'ev V. Soil erosion on the Yamal peninsula (Russian Arctic) due to gas field exploitation. *Advances GeoEcology*, 1998, vol. 31, p. 805–811.

Voskresenski K.S. Sovremennyye rel'yefoobrazuyushchiye protsessy na ravninakh Severa Rossii [Modern relief-forming processes on the plains of the North of Russia]. Moscow, Moscow Univ. Publ., 2001, 240 p. (In Russian)

Wolman M.G., Miller J.P. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes, *Journal of Geology*, 1960, vol. 68, no. 1, p. 54–74.

Zorina Ye.F. Raschetnyye metody opredeleniya potentsiala ovrazhnoy erozii [Methods of calculating gully erosion potential] *Eroziya pochv i ruslovye protsessy* [Soil erosion and channel processes]. Moscow, Moscow Univ. Publ., 1979, iss. 7, p. 81–90. (In Russian)

Web-sources

ArcticDEM, 2018. Harvard Data V1. URL: https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH (access date 10.11.2019).

Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Alexandrova T.M. Opisaniye massiva dannykh sutochnoy temperatury vozdukha i kolichestva osadkov na meteorologicheskikh stantsiyakh Rossii i byvshego SSSR (TTTR) [Description of the data array of daily air temperature and precipitation at meteorological stations of Russia and the former USSR (TTTR)]. Certificate of state registration of the database no. 2014620942, URL: http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#data-array (in Russian) (access date 10.11.2019).

QGIS Development Team, 2004 – 2019. V3.10, URL: https://qgis.org (access date 10.11.2019).

Received 22.11.2019
Revised 21.04.2020
Accepted 25.08.2020

УДК 614.1

А.Н. Панин[1], И.А. Рыльский[2], В.С. Тикунов[3]

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПАНДЕМИИ COVID-19 В РОССИИ И МИРЕ: КАРТОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Статья посвящена анализу пространственных закономерностей распространения COVID-19, география которого в полной мере проявилась в период с февраля по май 2020 г. Именно в этот период фиксируются четкие ареалы и границы региональных различий «расползания» инфекции, связанные с существующими логистическими, социально-экономическими и центр-периферийными факторами. Более поздний мониторинг COVID-19 показывает усреднение показателей (в расчете на 100 тыс. жителей) и своего рода выравнивание эпидемиологической обстановки в соответствии с плотностью населения.

В работе используются данные о заболеваемости в увязке с управленческими мерами, которые в свою очередь были продиктованы не только объективной эпидемиологической ситуацией, но и региональными особенностями общественно-политических процессов. Используются данные Yandex о самоизоляции и собственный мониторинг СМИ в отношении конфликтов и очагов социальной напряженности (повышенных страхов) в России. В качестве геоинформационной системы для анализа и картографирования COVID-19 используется ArcGIS.

Пространственный анализ выстроен в логике полимасштабности – Мир, Россия, Москва. Для всех трех уровней характерна «диффузия коронавирусных инноваций», связанная с началом распространения в благополучных и социально-экономически развитых городских центрах. Далее центр распространения смещается в периферийные менее развитые территории. Для России на начальных этапах распространения COVID-19 выделяются три основных центра – Москва и московский регион, нефтегазоносные районы и Север, Северный Кавказ. Главными факторам высокой скорости распространения вируса на этих территориях являются не только развитые транспортно-логистические параметры, но и набор уникальных региональных особенностей – повышенная контактность и слабая система здравоохранения в Дагестане, вахтовые потоки и скученность вахтовых поселков в случае ЯНАО, высокая доля креативного класса в московском регионе.

Работа представляет собой мониторинговое исследование и будет дополняться новыми данными, картами и аналитикой. В конце 2020 – начале 2021 гг. появится возможность оценить вклад COVID-19 в общую смертность, детально проанализировать демографические последствия распространения вируса.

Ключевые слова: коронавирус, ограничительные меры, пространственная дифференциация, ArcGIS, Москва, муниципалитеты

Введение. Картографирование – инструмент исследования реальности, позволяющий проводить анализ пространственного распределения разнообразных статистических категорий: абсолютных значений, плотностей, отношений, рейтингов и др. В случае эпидемических данных карты дают возможность визуализировать отдельные параметры заболеваемости, например, число заболевших или летальность, выявлять динамику и масштабы распространения болезни, сопоставлять ход эпидемии с ключевыми характеристиками регионов – природными, демографическими, социально-экономическими. Они помогают исследователю систематизировать информацию, «раскладывать» ее по странам, регионам и городам, проводить анализ, выявлять территориальные особенности и прогнозировать развитие событий. Вместе с тем, карта – это выразительный визуальный образ, политизация которого превращает его в пропагандистский плакат. Самая простая тематическая карта, подготовленная на основе открытой статистики о COVID-19, приобретает социальный резонанс и влияет на поведение людей. Поиск «своего места» на карте может породить как панические реакции, так и чувство беззаботности. Многие эксперты, комментировавшие развитие эпидемии в ее начальный период, подчеркивали – «пандемия страха» или, напротив, отсутствие у граждан ощущения опасности, формируют отдельную группу рисков, влияющих на рост заболеваемости, смертность и систему здравоохранения в целом [Рябова, 2010]. В этом смысле, картографирование острых социальных проблем, таких как распространение коронавируса, требует осторожности, деликатности и точности. Иначе карта становится средством спекуляций и манипуляции общественным мнением. Таких примеров немало в СМИ и политической риторике.

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, лаборатория комплексного картографирования, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: alex_panin@mail.ru

[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Центр Мировой системы данных по географии, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: rilskiy@mail.ru

[3] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, лаборатория комплексного картографирования, зав. лабораторией, профессор, докт. геогр. н.; *e-mail*: vstikunov@yandex.ru

Понимая и осознавая свою ответственность, мы постарались выстраивать исследование, опираясь на проверенные и проверяемые данные из открытых источников. В работе использовались классические приемы картографии, которые позволяют читателю самому разобраться в происходящих процессах.

Материалы и методы исследований. В рамках геоинформационного мониторинга пандемии Центром геодемографии и Научно-исследовательской лабораторией комплексного картографирования МГУ им. М.В. Ломоносова ежедневно собираются самые разнообразные данные из диверсифицированных источников. Они систематизируются в ГИС, образуя следующие тематические блоки:

– ***география распространения коронавируса*** – ежедневные адресные данные о количестве заразившихся, проведенных тестах, летальности и выздоровевших;

– ***меры государственной и региональной политики***, предпринимаемые в связи с эпидемией в различных странах, регионах и городах, данные о самоизоляции Yandex;

– ***динамика социально-демографических процессов*** – показатели естественного и механического движения населения с особым акцентом на индикаторах и структуре смертности, показатели уровня и качества жизни населения, образования, индикаторы социальных настроений, самоизоляции и перемещений;

– ***состояние системы здравоохранения*** – наличие и распределение медицинского персонала, квалификация работников, уровень развития медицинской инфраструктуры и сети лечебных учреждений.

Ключевыми принципами проводимого анализа являются полимасштабность и темпоральность. ***Полимасштабность*** предполагает учет различия факторов, действующих на разных территориальных уровнях. Детальность и разнообразие пространственных данных – от ситуации в стране или на континенте до состояния дел в отдельных локусах (регионе, муниципалитете, городе, микрорайоне) – позволяет включать в анализ демографический, социально-экономический, политический и экологический контекст пандемии. ***Темпоральность*** обеспечивает непрерывность изучения пандемии и происходящих изменений в режиме реального времени с момента первого зафиксированного случая. Например, существует возможность почасового отслеживания динамики Индекса самоизоляции, вычисляемого сервисом Яндекс для России и стран СНГ. Принципу темпоральности отвечает и систематический сбор менее актуализированных и «текучих» данных, таких как переписи населения, ежегодная, квартальная, месячная и недельная демографическая статистика, учет сезонных и маятниковых миграций, суточной мобильности горожан и многое другое.

Оба названных принципа важны в случае анализа пространственных закономерностей распространения пандемии: во-первых, глобальный характер COVID-19 делает невозможным прогнозирование развития ситуации в отдельно взятой локации в отрыве от мировых и региональных реалий, а во-вторых, их сочетание позволяет учесть большее количество факторов, включая их динамическую составляющую.

В качестве геоинформационной платформы мониторинга использовалась ArcGIS. Система обеспечивает автоматическую сборку данных из разнообразных источников информации, их геокодирование и привязку к картографическим основам, тематическое картографирование, математическо-картографическое моделирование, обмен данными и результатами анализа с заинтересованными сторонами – экспертными сообществами, управленческими структурами, СМИ, общественностью и др.

Связь географии городов и пандемии COVID-19 заставляет обратить внимание на теорию глобализации и связанные с ней показатели территориальной дифференциации, прежде всего, вовлеченности стран и городов в международный и региональный обмен, наличие инфраструктуры, обеспечивающей разнообразные коммуникации, уровень развития и «настройки» государственных институтов, призванных оберегать здоровье граждан. Исследования, проводившиеся последнюю четверть века, показали, что основными бенефициарами глобализации стали крупнейшие города развитых стран, стянувшие на себя финансовые, информационные и человеческие потоки. Это привело к возникновению «архипелагов богатства» на фоне стагнирующей или даже деградирующей периферии и усилению неравномерности территориального развития. Богатые становились богаче, а бедные – беднее. Желаемое перераспределение ресурсов развития происходило за счет индивидуальных миграционных стратегий, массового перемещения людей из государств «глобального Юга» в государства «глобального Севера», а не поддержки стран, не справлявшихся с вызовами глобализации и информатизации общества. Получаемая ими помощь парадоксальным образом вела к углублению переживаемого кризиса и дальнейшей периферизации.

Пандемия внесла коррективы в эту картину (рис. 1). Чем более экономически-периферийной и миграционно-непривлекательной была страна, тем меньшее количество заболевших было там зафиксировано. Мощная волна эпидемии, прокатившаяся по «старым» странам ЕС, куда меньше затронула его новых членов, а главной мишенью COVID-19 оказались Соединенные Штаты.

Если показатели общей заболеваемости дают почти зеркальное отражение результатов экономической глобализации, то индекс летальности позволяет говорить об усложнении пространственных трендов (рис. 2). Связь между числом заболевших и умерших от вирусной инфекции не линейна, она опосредована другими факторами. Если исключить персональное состояние здоровья, то основные из них являются следствием неравномерности территориального развития и установившихся политических режимов. Бедность и богатство оказались равнозначными полюсами, формирующими эпидемическое «пространство летальности».

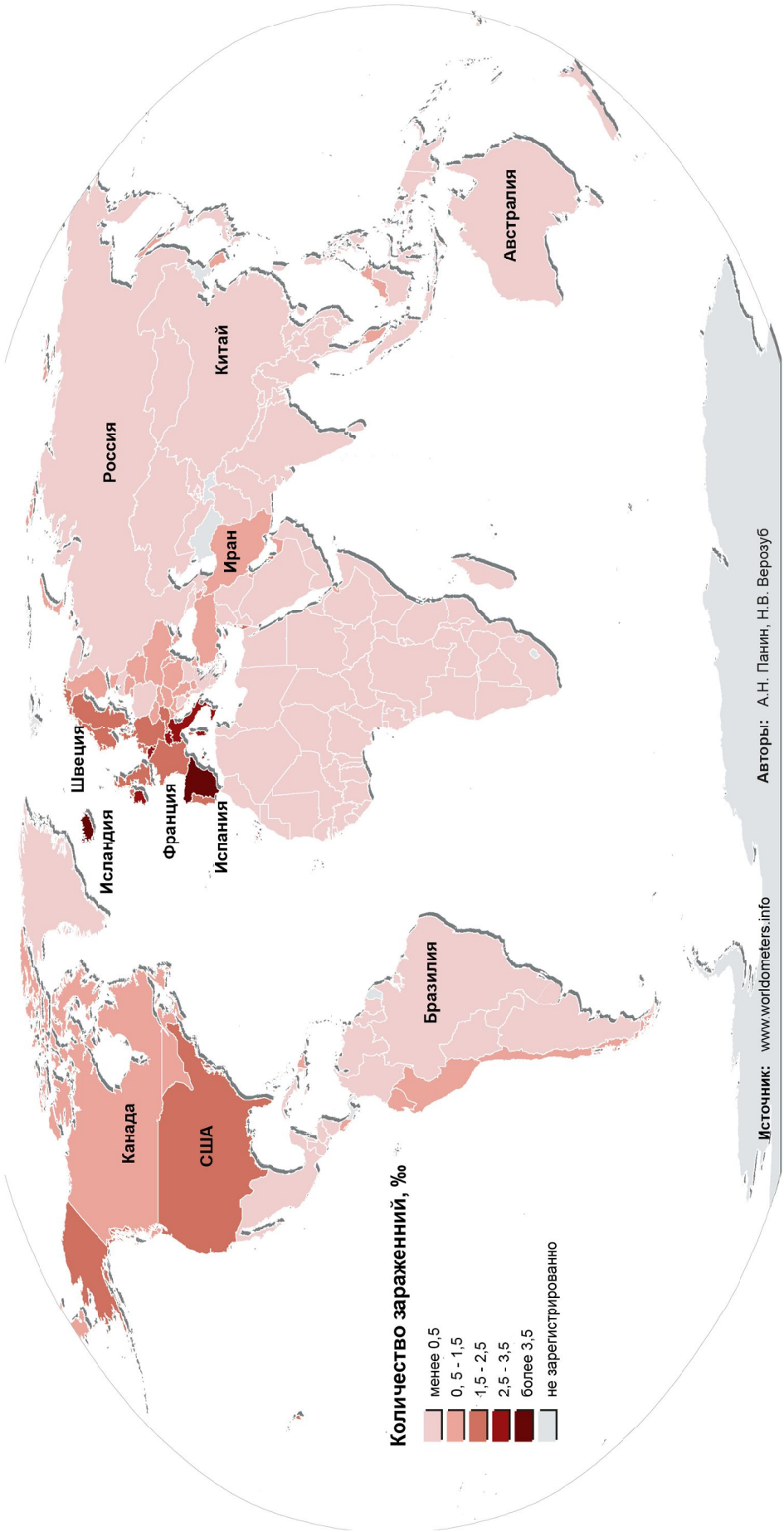

Рис. 1. Количество зафиксированных случаев заражения коронавирусом за весь период наблюдения пандемии (человек) на 24.04.2020 [ВОЗ, 2020]

Fig. 1. Number of infected with coronavirus (persons) during the entire period of pandemic observation, final date 24.04.2020 [WHO, 2020]

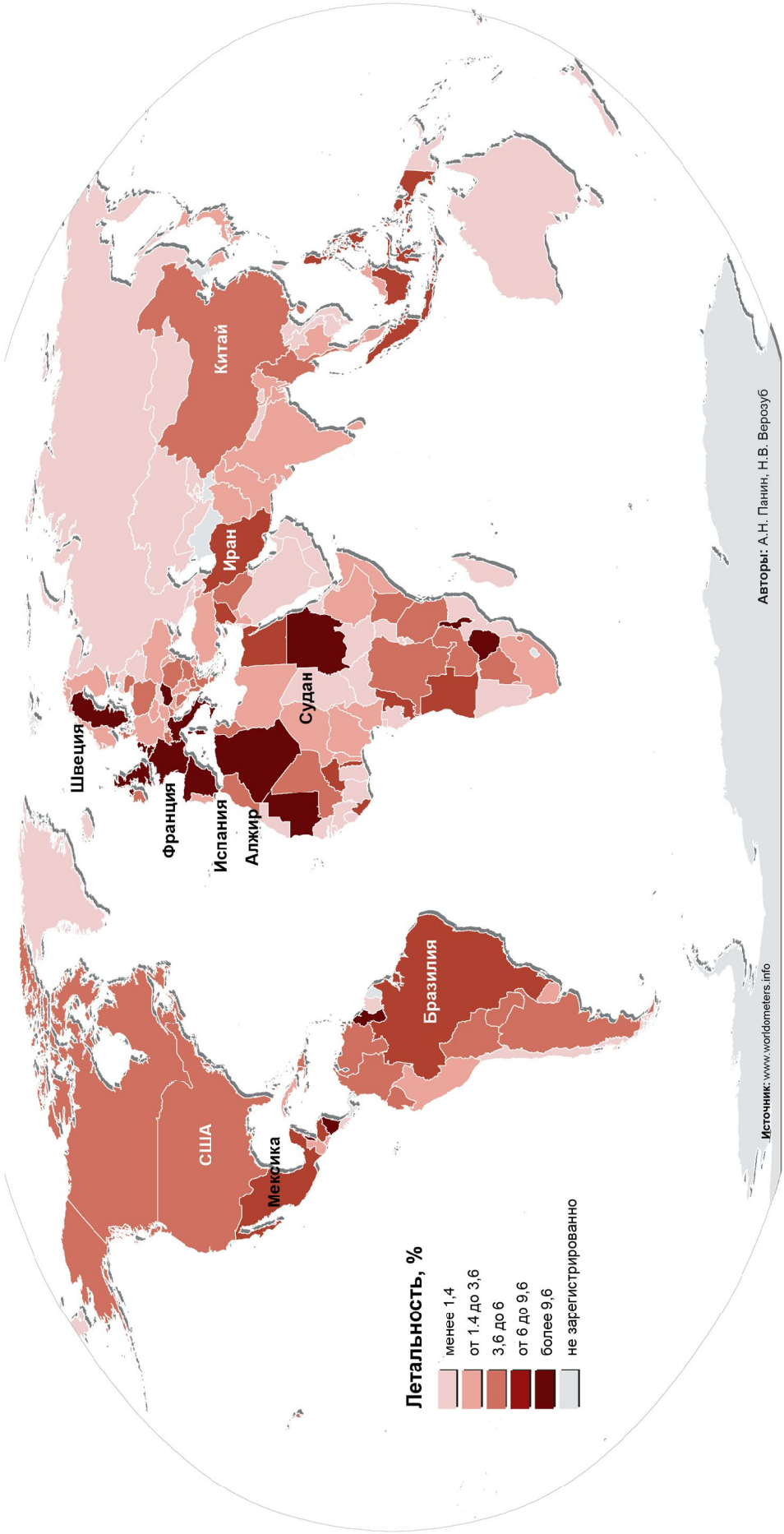

Рис. 2. Летальность от зафиксированных случаев заражения коронавирусом за весь период наблюдения пандемии на 24.04.2020 [ВОЗ, 2020]

Fig. 2. Lethality from recorded cases of coronavirus infection, during the entire period of pandemic observation, final date 24.04.2020 [WHO, 2020]

Вокруг полюса «бедности» группируются страны, жители которых характеризуются плохими показателями состояния здоровья и низкой доступностью системы социального обеспечения и здравоохранения. Данный фактор работает не только в «бедных» странах Африки, Азии и Латинской Америке, но и в США, где смертность от COVID-19 среди афроамериканского населения в разы превышает смертность среди белых и вносит основной вклад в общую картину летальности. Сходная ситуация наблюдается и среди этнических меньшинств в Великобритании.

На противоположном полюсе находятся страны, которым удалось создать развитую систему социального обеспечения и здравоохранения, добиться значительной продолжительности жизни населения. Сегодня «продолжительность жизни» как приоритет политики и «активная обеспеченная старость» как мечта работающих граждан оказались подорваны пандемией, которая поселилась в городах, заперла их жителей дома, остановила экономику и дезорганизовала работу лечебных учреждений. Именно возрастные когорты «70+» попали в группу повышенного риска заболеваемости, и именно среди них наблюдаются зашкаливающие показатели смертности. Эксперты при этом рассуждают о «естественности» смерти пожилых людей, умирающих от сопутствующих заболеваний.

Несколько особняком стоит шведский случай, но он также свидетельствует об эрозии системы ценностей благополучного общества под давлением пандемии. Страна расположена вдали от основной зоны распространения коронавируса (см. рис. 1), ее столица не относится к числу главных экономических перекрестков мира: Стокгольм находится на 40-м месте в рейтинге глобальных городов (2019) далеко позади Москвы (18-е место), однако показатели летальности от COVID-19 в Швеции значительно выше, чем в соседних скандинавских странах. Объяснить эту разницу возрастными различиями не получается. Главная причина – не демографическая структура населения, а проводимая политика. Теоретически она основана на важнейших демократических постулатах о взаимном доверии между обществом и властью. Власть не прибегает к жесткому административному контролю, поскольку высокий уровень самоконтроля в обществе позволяет избегать ограничительных мер, а общество доверяет власти, полагая, что та действует в его интересах. В каком-то смысле это манифест гражданственности и образец демократического правления. Но, как показывают показатели летальности, его реализация на практике превращается в известную максиму – «спасение утопающих – дело рук самих утопающих». То, что хорошо работает в условиях стабильности, оказывается недостаточным в кризисной ситуации.

Можно усомниться в сделанных предположениях, указав на значительную вариативность методик расчета используемых показателей, высокую вероятность манипуляции первичными данными, подтасовку информации и прочее. Например, по количеству тестов Россия занимает одно из лидирующих мест в мире – 76 тестов на одного выявленного больного. За ней следуют такие страны, как Австралия и Южная Корея, которые весьма успешно справляются с эпидемией. В то же время, в России, согласно официальным предписаниям, каждый наблюдаемый тестируется трижды. Если сопоставить количество «тестовых серий» с количеством больных, то российский показатель снизится – 25 тестов на одного больного. Это третий результат в мире, после Австралии и Южной Кореи.

Еще проблематичнее ситуация с показателями летальности COVID-19. Большинство стран включает в статистику умерших всех пациентов с положительным тестом на коронавирус. Но в Бельгии, например, в это число попадают и лица с подозрением на заражение, поэтому бельгийские показатели одни из самых высоких в мире. В США и Великобритании учитывают всех умерших во время пандемии, независимо от того был короновирус подтвержден лабораторно или диагностирован клинически. В России причина смерти устанавливается по результатам патологоанатомического исследования. Умершие от COVID-19 отделяются от инфицированных COVID-19, но умерших от других причин. Предполагается, что по окончании эпидемии данные цифры будут скорректированы Росстатом в зависимости от вклада коронавируса в течение болезни, а на сегодняшний день показатели эпидемической смертности в России чуть ли не самые низкие в мире. Однако даже троекратное их увеличение не выведет страну в «лидеры» смертности, и российские показатели останутся низкими.

Несмотря на все трудности, сопоставление данных, полученных из разных источников информации, позволяет их верифицировать, «дооценивать» и определять специфику отдельных стран. Конечно, еще рано подводить итоги, но уже видно, что пандемия COVID-19 меняет пространственную логику глобальных социальных процессов, перераспределяя издержки неравномерности территориального развития между полюсами мирового благополучия и неблагополучия.

Результаты исследований и их обсуждение. Остановимся на описании первых результатов о пространственных закономерностях распространения пандемии COVID-19 в мире и России, сделанных на основе мониторинга.

Мир. Распространение коронавируса в мире происходит неравномерно. Где-то эпидемия уже достигла своего пика, и количество заболевших стало снижаться (например, в Китае, Южной Корее или Австралии), где-то она находится в промежуточной фазе развития, как в России, а ряду стран еще предстоит с ней столкнуться. Тем не менее, уже сейчас видно, что наибольшее число случаев заражения приходится на территории, располагающиеся между 32,5° и 52,5° с. ш. (рис. 3). Текущий анализ и наши картографические материалы подтверждают это наблюдение.

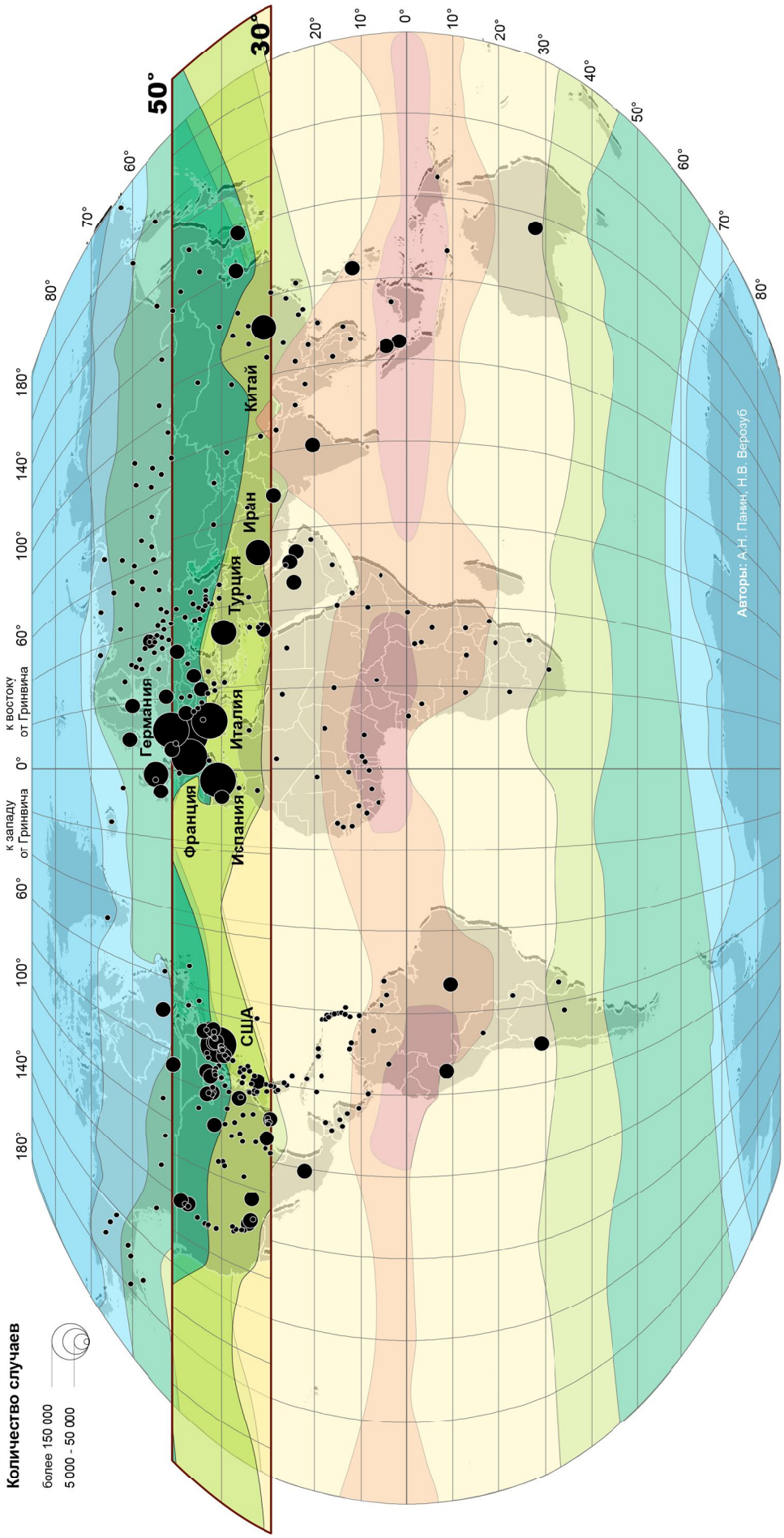

Рис. 3. Климатические особенности распространения коронавируса в мире: первые 4 месяца пандемии, число случаев за весь период наблюдения пандемии на 24.04.2020 [ВОЗ, 2020]

Fig. 3. Climate features of the coronavirus spread in the world: first 4 months of the pandemic, cases for the entire period of pandemic observation, final date 24.04.2020 [WHO, 2020]

Вирус появился и распространился мягкой влажной зимой в средней и северной полосе субтропического пояса Северного полушария. Его начало – Китай, а точнее Ухань и провинция Хубэй с субтропическим муссонным климатом, где, судя по статистике, сосредоточено до 90% всех зараженных в стране. Удар, который ощутила Южная Корея в зимний период, также пришелся на пояс субтропического муссонного климата. По субтропическому поясу на Среднем Востоке вирус пришел в Иран, а затем обрушился на Италию и Испанию. Пострадала не только северная полоса субтропиков, центральные и южные районы этого пояса – Турция, Северная Африка, Израиль, также оказались вовлечены в эпидемию.

Это очень интересное наблюдение, в очередной раз подтверждающее факт зависимости человека и человечества от природно-экологических факторов, несмотря на защищенность подавляющей части мирового населения от разнообразных природных угроз – холода, голода, жары, многих болезней, природных катаклизмов и пр. Пандемия заставляет задуматься о разнообразии форм взаимопроникновения двух сред – социальной и природной, с непредсказуемыми последствиями которого не может справиться ни природа, ни государства как наиболее мощные и эффективные институты общества. Первоначальный анализ показывает, что этапность распространения вируса хорошо согласуется с «гравитационными» моделями динамики, которые подробно расписаны в учебнике [Тикунов, 1997, с. 164–180].

Карта проявляет и другой феномен – связь географии коронавируса с плотностью городского населения, наличием крупных городских агломераций, экономических и туристических центров. Практически везде, где мы ведем детальный (на уровне муниципалитетов) мониторинг пандемии, очаг заболевания формируется в крупнейших городах, а затем стремительно распространяется на периферийные территории или соседние страны с более низким уровнем развития. Нельзя сказать, что это большая новость. Скажем, караваны Великого шёлкового пути, доходившие в средние века до процветающих городов Средиземноморья, несли с собой не только роскошные товары, но и опасные болезни, включая чуму. Из главных торговых центров инфекция затем разносилась по внутренним территориям стран. И все-таки то, что мы наблюдаем сегодня – это не продолжение известного тренда, а новый феномен, который можно определить как структурное расширение очагов возникновения эпидемий с постепенным оттеснением природных факторов на второй план.

Если раньше в случае массовых вирусных эпидемий речь велась преимущественно о биоценотических связях в природных очагах инфекций с мышиными, клещевыми и комариными механизмами трансмиссии, то теперь на первые роли выходят города и транспортные потоки. Конспирологические версии лабораторного происхождения пандемии COVID-19 усиливают данный вывод, но и без них возникновение эпидемии в городе с многомиллионным населением и ее распространение благодаря миграциям и туристическим пассажиропотокам делают высказанное предположение правомерным. Климатические условия оказываются благоприятными не только для деятельности людей, роста городов и государств, экономического и социального развития, но и для вирусов, которые «научились» успешно выдерживать антропогенную нагрузку. Выход возбудителей болезней из присущих им экологических ниш и расширение числа возможных очагов заболеваемости сопровождаются, по мнению вирусологов, появлением «более патогенных генотипов и вариантов возбудителей, склонных к эпидемическому распространению» [Борисевич и др., 2018]. Именно смутное ощущение необратимости произошедшего является источником пессимистических заявлений о том, что мир после завершения пандемии уже не будет прежним и изменится до неузнаваемости [Мир …, 2020].

Россия. Судя по показателям, российская ситуация пока выглядит менее драматично, чем итальянская, испанская или американская, но риски массового заражения населения постоянно нарастают. В течение апреля 2020 г. количество инфицированных в стране увеличилось в 40 раз – с 2,7 до 120 тыс. Пик ежедневного прироста числа заболевших к майским праздникам еще не был пройден, однако общество уже демонстрировало усталость от введенного режима самоизоляции, случаи его нарушения стали массовыми (рис. 4–7). Эксперты ожидают, что в мае произойдет увеличение количества инфицированных, вырастет и число регионов с высокими показателями заболеваемости. Серия карт, построенных на разные даты, показывает последовательное расширение географии коронавируса в России и одновременно рост масштабов проблемы (см. рис. 4–7). Хотя российский случай подтверждает общемировую логику пространственного распространения пандемии, которую определяют конфигурация системы крупно-городского расселения и логистические факторы, его отличает целый ряд особенностей.

Первая и главная – избыточная централизация всех функций в столице. Москва – безусловный лидер по числу заболевших: более половины всех инфицированных в стране. Она также выделяется по темпам распространения заболеваемости и количеству умерших. Это главный контактный центр РФ, обеспечивающий внутренние и внешние связи. Как и прочие глобальные города, Москва пострадала от пандемии в первую очередь. Характерно, что второй по значимости и численности населения город России – Санкт-Петербург – существенно отстает от Москвы по удельному числу инфицированных, пропуская вперед Московскую и Калужскую области. Возможно – это дефекты учета заболеваемости, но также возможно, что связь между численностью населения города и количеством заболевших является не линейной, а опосредованной теснотой и

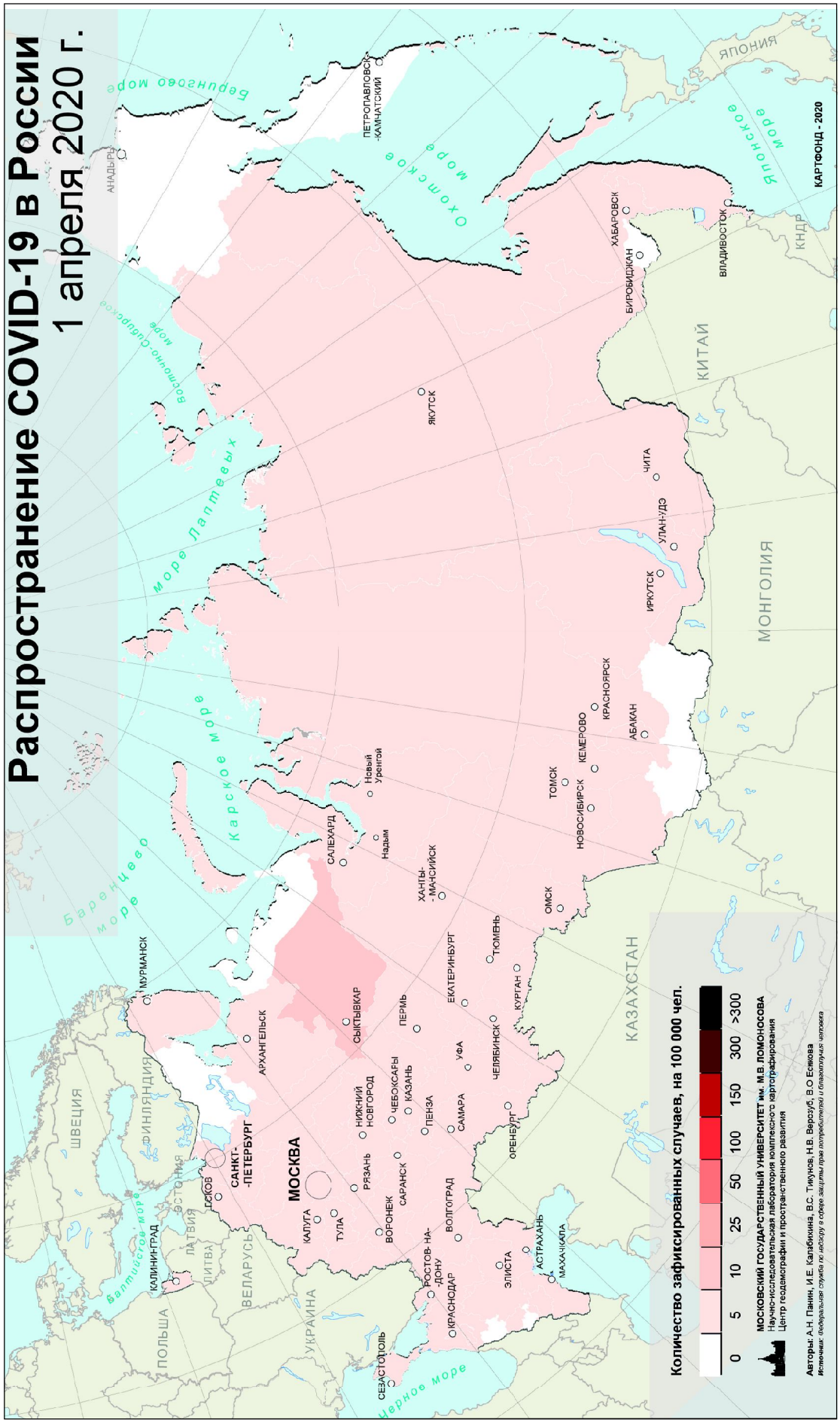

Рис. 4. География распространения коронавируса в России, число зарегистрированных заболевших на 100 тыс. человек на 01.04.2020 по данным Роспотребнадзора [Информация …, 2020]

Fig. 4. Geography of the coronavirus spread in Russia, number of recorded cases per 100 thousand people, 01.04.2020, according to Rospotrebnadzor [Informatsiya …, 2020]

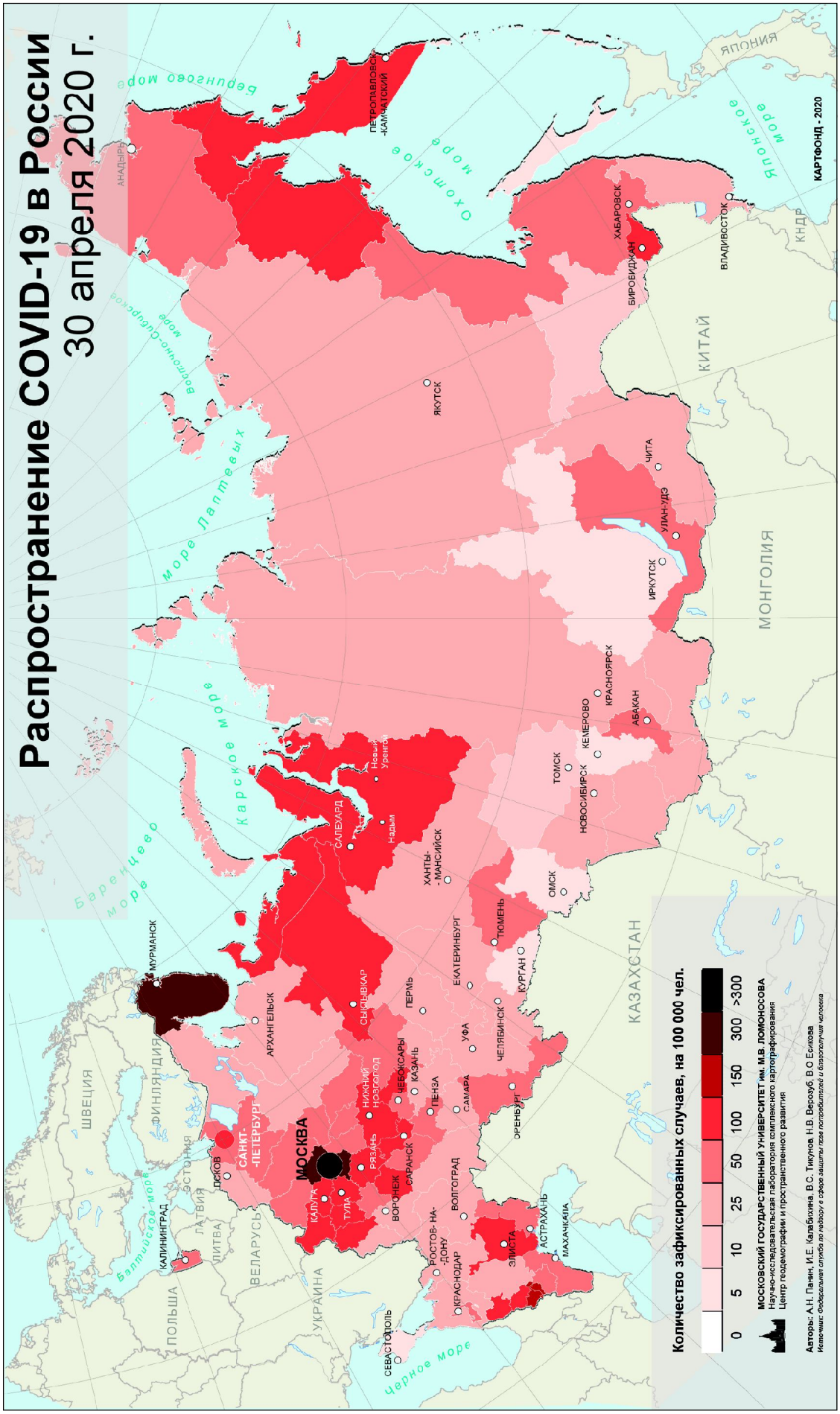

Рис. 5. География распространения коронавируса в России, число зарегистрированных заболевших на 100 тыс. человек на 30.04.2020 по данным Роспотребнадзора [Информация …, 2020]

Fig. 5. Geography of the coronavirus spread in Russia, number of recorded cases per 100 thousand people, 30.04.2020, according to Rospotrebnadzor [Informatsiya …, 2020]

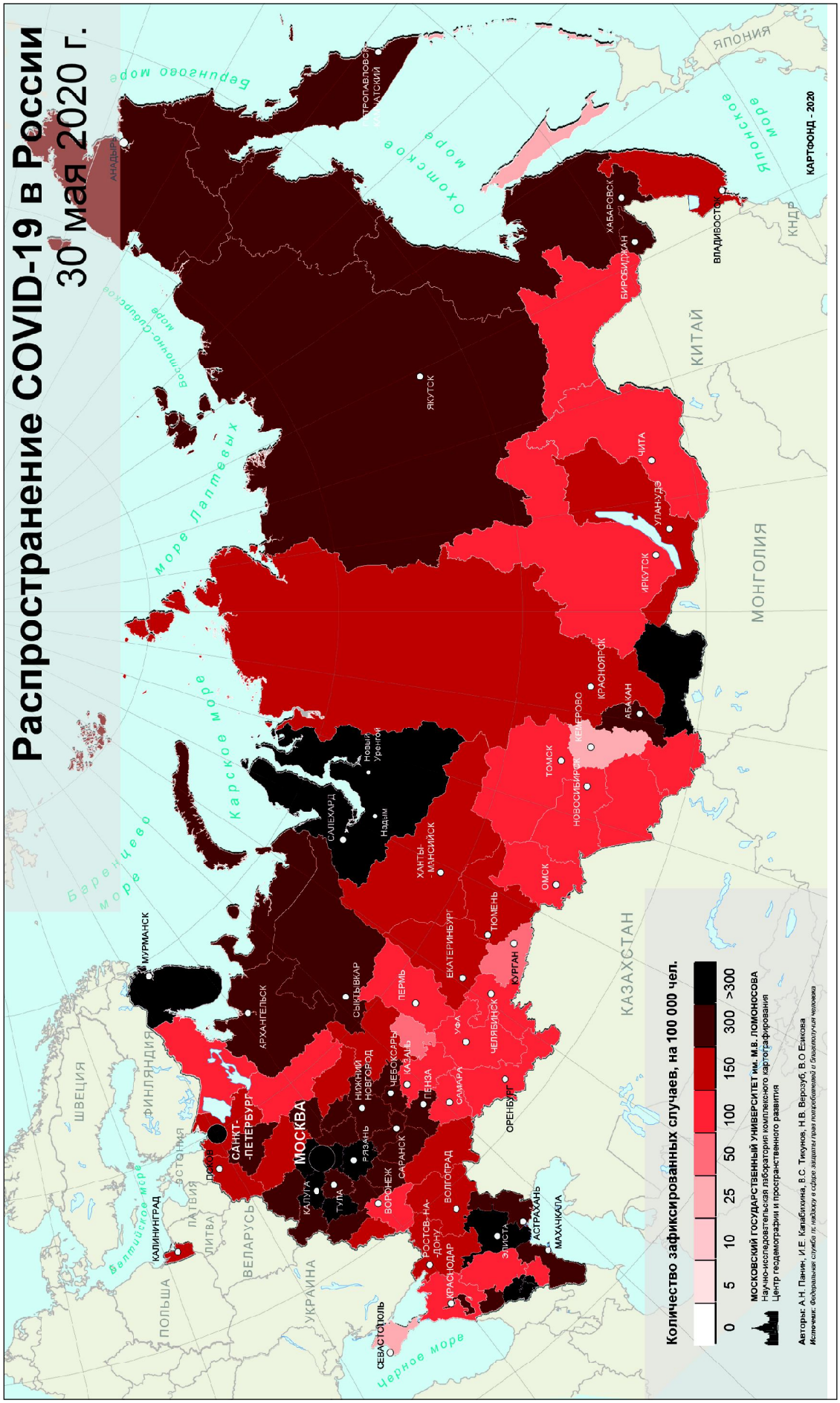

Рис. 6. География распространения коронавируса в России, число зарегистрированных заболевших на 100 тыс. человек на 30.05.2020 по данным Роспотребнадзора [Информация …, 2020

Fig. 6. Geography of the coronavirus spread in Russia, number of recorded cases per 100 thousand people, 30.05.2020, according to Rospotrebnadzor [Informatsiya …, 2020]

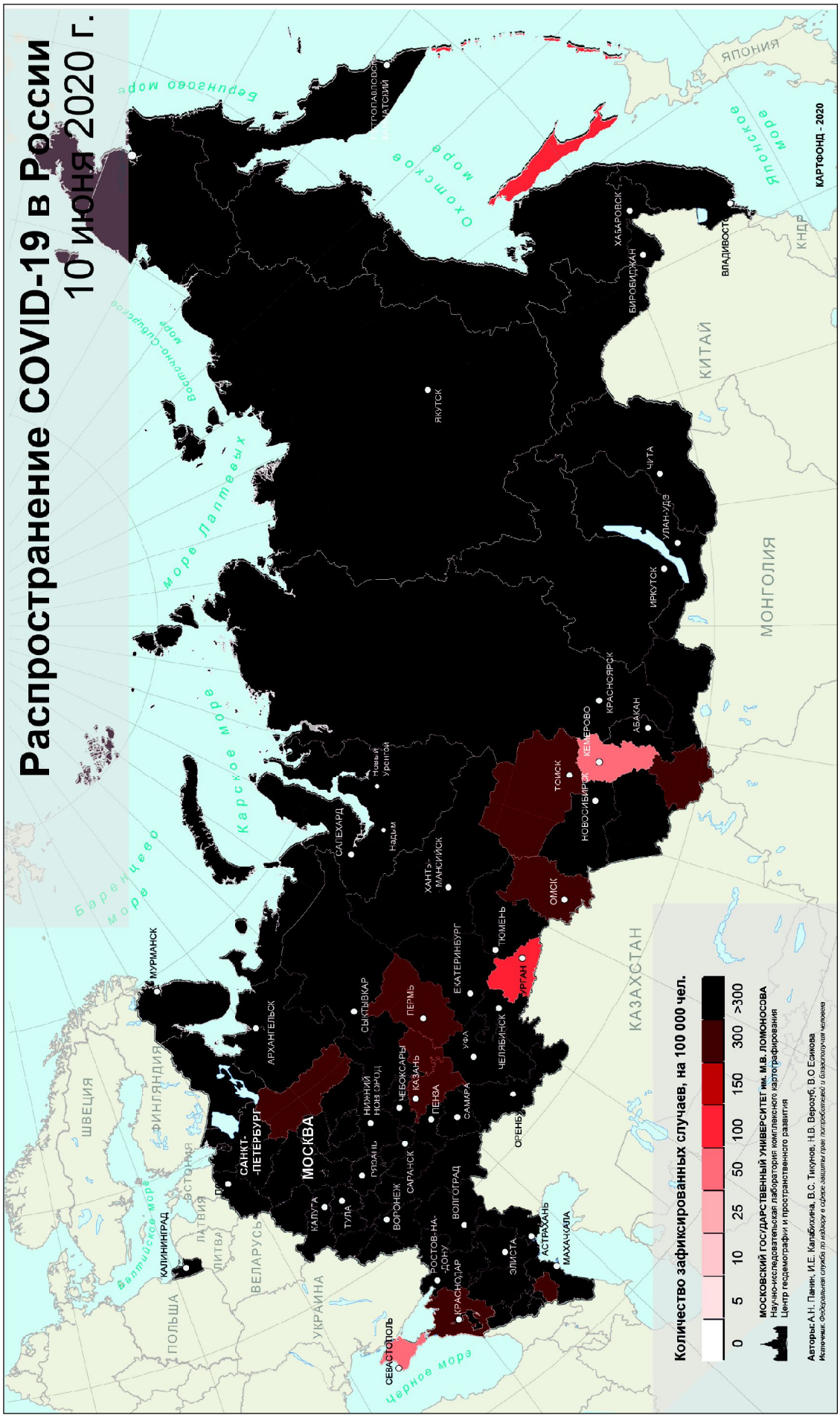

Рис. 7. География распространения коронавируса в России, число зарегистрированных заболевших на 100 тыс. человек на 10.06.2020 по данным Роспотребнадзора [Информация …, 2020]

Fig. 7. Geography of the coronavirus spread in Russia, number of recorded cases per 100 thousand people, 10.06.2020, according to Rospotrebnadzor [Informatsiya …, 2020]

интенсивностью непосредственных связей, осуществляемых в буквальном смысле «лицом-к-лицу». Если вспомнить метафору Мануэля Кастельса, разделявшего «пространство мест» и «пространство потоков», придавая последнему ключевое значение в текучем информационном мире, то можно сказать, что коронавирус вернул «пространству мест» его былую роль [Кастельс, 2020]. Это означает возвращение к идее барьерности социальных и физических границ как главного регулятора пространственных взаимодействий. Возможны и позитивные следствия: рост значения локальной социально-экономической и политической повестки, повышение внимания к особенностям общественного и экономического развития территорий, ответственности и самостоятельности местных властей, поддержка учреждений здравоохранения, более тесное взаимодействие администраций и населения, рост доверия в обществе и между обществом и властью. Однако судить о том, произойдет ли такой поворот, пока рано.

Сегодня пространственное «поведение» COVID-19 демонстрирует следование паттерну центр-периферийных отношений, что позволяет взглянуть на особенности его распространения через призму теории пространственной диффузии инноваций [Hagerstrand, 1967]. Одно из ее центральных положений состоит в следующем: интенсивность диффузии зависит не столько от расстояний, разделяющих города и регионы, сколько от их способности ретранслировать инновации и эффективности происходящих коммуникаций. Это теоретическое положение вскрывает еще одну российскую особенность – тесную связь столицы с основными нефтегазодобывающими регионами страны. Республика Коми, Ненецкий, Ханты-Мансийский и Ямало-Ненецкий автономные округа получили взрывной рост заболеваемости не из-за поездок местного населения на горнолыжные курорты Европы, а из-за сменяющейся «вахты». Основные потоки вахтовиков проходят через аэропорты Москвы, а «эффективность» коммуникаций в небольших вахтовых поселках обеспечивает быструю «ретрансляцию» коронавирусных инноваций.

Третья особенность России – многограничное положение страны и разнообразие каналов проникновения инфекции. Не только Москва является «воротами» инфекции, но и многочисленные пункты пропуска на границах, а малое приграничное движение выполняет те же функции, что и крупные мультимодальные транспортные центры, увеличивая число каналов проникновения инфекции. На карте России хорошо видны приграничные регионы, выделяющиеся по показателю удельного числа инфицированных. Среди них лидирует Мурманская область, где совокупное действие контактов с соседними Финляндией и Норвегией и вахтовой трудовой миграции привело к активизации вспышки коронавируса. Наиболее пострадавшие города области – Апатиты, Териберка, Мончегорск, Кировск. Более высоким удельным показателям заболеваемости в Дагестане, по сравнению с другими республиками Северного Кавказа, явно способствуют трансграничные контакты с Ираном и Азербайджаном. На Дальнем Востоке ту же роль сыграли контакты с Китаем, в Калининграде и Псковской областях – с Польшей и странами Балтии. В то же время, значение фактора приграничности нельзя преувеличивать и воспринимать его как угрозу. Необходимо понимать, что полученные там более высокие регистрируемые значения заболеваемости связаны с повышенным контролем на въезде в страну и обеспечением массового тестирования населения.

Наконец, стоит сказать о существенных региональных различиях в обыденной культуре населения. Действие этого фактора наглядно проявляется на Северном Кавказе в силу компактности расположения республик, их густонаселенности, приверженности «традициям предков», ценностям маскулинности и тесным контактам с соседними регионами. Пышные многолюдные свадьбы и массовые похороны – отличительная черта местной повседневной жизни. Так, именно свадьба привела к многочисленным заражениям и двум летальным случаям в Пятигорске, что заставило резко ужесточить карантинные меры в Ставропольском крае. Известен прецедент свадьбы в Дагестане, куда один из гостей завез вирус из Калининграда. В республике по-прежнему открыты мечети, куда на пятничную молитву собираются тысячи человек. К тому же на Северном Кавказе выше доля лиц, полагающих, что их личный риск заболеть – низкий, эпидемиологическая угроза сильно преувеличена, а объявленная пандемия – «заговор» мирового закулисья. Если к этому добавить высокий процент теневой занятости в регионе, то станет понятно, что введение режима самоизоляции и закрытие многих предприятий малого бизнеса вызвали крайне негативную реакцию населения. Массовый протестный митинг в центре Владикавказа, проведенный вопреки всем предупреждениям эпидемиологов, вывел Северную Осетию и Ингушетию в число «лидеров» по показателям удельной заболеваемости. Ситуация в этих республиках резко отличается в худшую сторону от соседних регионов.

Москва. Исследование пространственных закономерностей распространения пандемии в крупнейших городах и агломерациях имеет существенно больший набор ограничений. В действие вступают факторы плотности и разнообразия городской жизни, включая проживание в многоэтажных домах, необходимость пользоваться общественным транспортом, постоянные контакты с множеством незнакомых людей на улицах и в магазинах. Даже размер квартир и «скученность» жителей имеют значение. Тем не менее, Московский центр урбанистики и аналитическая компания Habidatum ведут мониторинг внутригородской ситуации с начала введения режима самоизоляции, основываясь на данных операторов мобильной связи, социальных сетей и опросы [Мониторинг состояния …, 2020].

Уже отмечалось, что Москва приняла на себя главный удар эпидемии, внеся наибольший вклад в

российскую заболеваемость и смертность. В значительной степени это обусловлено централизацией транспортных потоков и недостаточным уровнем развития межрегиональных связей. Не последнюю роль сыграл и фактор более активного тестирования населения Москвы, нежели в других регионах. В целом, удельные показатели заболеваемости в российской столице сопоставимы с другими крупнейшими городами мира, имеющими глобальное или макрорегиональное значение. Тем не менее, Москва выглядит несколько лучше на их фоне. Если сравнить ее с Нью-Йорком, то московские данные окажутся ближе таким нью-йоркским районам как Манхеттен и Бруклин, и вдвое ниже, чем показатели Бронкса или Куинса, где велика доля афроамериканского и испаноязычного населения. Аналогичным образом, ситуация в Москве ближе центральным округам Парижа, нежели его пригородам. Причина таких расхождений – отсутствие в российской столице резких социальных контрастов, кричащей бедности, гетто, этнических кварталов. Тем не менее, пространственная логика распространения COVID-19 в Москве и других глобальных городах очень похожа.

На ранней стадии эпидемии распространителями инфекции в Москве были так называемые «номады глобализации» – жители городов, придерживающиеся космополитических убеждений и свободно перемещающиеся по миру. Поэтому неудивительно, что первые случаи заболевания фиксировались среди представителей творческой интеллигенции, журналистов, менеджеров и студентов, которые в феврале и начале марта возвращались из зарубежных командировок и туристических поездок [Vendina et al., 2019, с. 245–256]. Некоторые из них уже имели контакты с носителями вируса, хотя и ничего не подозревали. Эта категория населения, как правило, проживала в районах столицы с более высоким репутационным статусом – в историческом центре и кварталах, тяготеющих к осевым магистралям юго-западного, западного и северо-западного секторов Москвы. Здесь отмечается высокая концентрация столичных функций, дорогой недвижимости, а также более образованного и обеспеченного населения [Вендина и др., 2019].

По мере введения режима самоизоляции картина стала меняться. В зоне риска оказались те, кто не мог перейти на удаленную работу, уехать из Москвы в провинцию или перебраться на дачу. Они должны были обеспечивать работу функциональной и социальной инфраструктуры города; многие продолжали ежедневно пользоваться общественным транспортом и контактировать с большим количеством людей. В наиболее уязвимой ситуации оказались трудовые мигранты, которые обеспечивали доставку различных покупок тем, кто самоизолировался дома. В результате новые случаи заболеваний стали чаще фиксироваться в обширной зоне спальных районов Москвы и ближнем пригороде. К маю окраины города, особенно его восточного, юго-восточного и северного секторов, намного опередили центральную часть столицы и по частоте, и по плотности случаев заражения. Пространство коронавируса пришло в соответствие с профилем плотности населения Москвы, которая постепенно нарастает от центра города к его периферии.

По мере того как росло число «обычных людей», затронутых эпидемией, стала нарастать тревожность московского социума. Это нашло выражение в социальных сетях. Наличие диффузных страхов прорывалось в массовых осуждениях нарушителей карантинного режима и «разносчиков инфекции», а также обилии вопросов о том, как жить в условиях пандемии. В отличие от населения республик Северного Кавказа, москвичи относятся к угрозе инфицирования серьезно. Согласно данным ФОМ, 75% московских респондентов стали чаще мыть руки и использовать дезинфекторы, и только порядка 10% не следят за социальной дистанцией. Несмотря на усталость от введенных ограничений, люди не сомневаются, что они являются необходимой профилактической мерой.

Сказалась пандемия и на городской среде Москвы, уровень разнообразия предлагаемого сервиса на улицах города упал до бытовавших в советское время социальных норм. Есть территории, где выбор снизился более чем на 85%, по сути, в жилых кварталах остались только магазины и аптеки. Такие территории есть не только на окраинах, но и в пределах исторического центра города. Но все-таки сильнее пострадали районы вне третьего транспортного кольца (ТТК), где появились целые ареалы низкого разнообразия. Прежде всего, это кварталы, отдаленные от метро, зоны, прилегающие к железнодорожным путям, промышленным территориям или МКАД. Здесь исчезли «бойкие места» и локальные центры. В целом, коронавирус «опустынил» социальное пространство города, сделав его больнично-аскетичным.

Согласно указу Президента РФ № 239 от 2 апреля 2020 года высшим должностным лицам субъектов РФ дано поручение разработать и реализовать комплекс мероприятий, направленных на обеспечение санитарно-эпидемиологического благополучия населения. Во исполнение этого указа главы регионов выпустили уже более 1000 нормативно-правовых актов (НПА). В каждом регионе осуществляется информационная кампания по разъяснению гражданам ситуации с новой коронавирусной инфекцией. Согласно экспертным оценкам и материалам мониторинга – ситуация в отдельных регионах становится достаточно напряженной. Предварительный анализ мер позволил создать карту (рис. 8). Все меры, отраженные в НПА, группируются в три крупных блока: а) меры по контролю передвижения граждан, б) меры по ограничению/поддержке бизнеса и экономики, в) меры по ограничению/поддержке граждан. Методика пространственного анализа требует дальнейшей проработки, однако уже сейчас понятно, что география мер и ограничений имеет существенные различия и эффекты.

Самые жесткие меры были задействованы в Москве, включая цифровые QR-коды для передвиже-

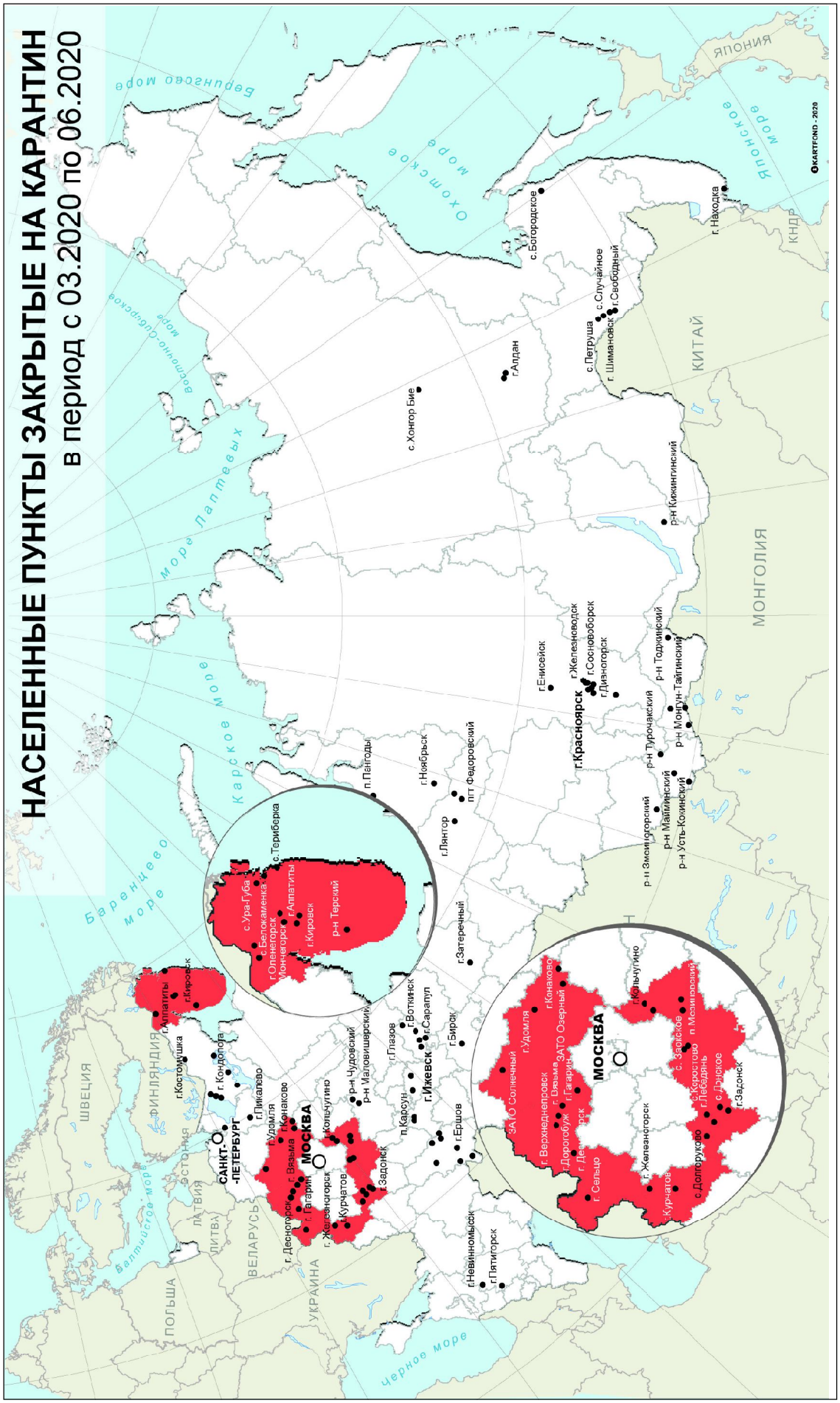

Рис. 8. Населенные пункты, закрытые на карантин с 03.2020 по 06.2020 по данным правовой системы Гарант [Гарант, 2020]

Fig. 8. Localities closed for quarantine from 03.2020 till 06.2020, according to the Garant portal data [Garant, 2020]

ния горожан. Вслед за Москвой целый ряд регионов в поясе влияния столицы, опасаясь «московского коронавируса» (Ярославская, Ивановская, Липецкая и др. области), сформировали свои ограничения, выраженные в логике жесткого контроля приезжающих из Москвы. Многие регионы пытались реализовывать жесткий контроль на дорогах (например, Нижегородская область). Республики Чечня и Крым в самом начале полностью закрыли въезд, однако потом несколько смягчили эти меры. Закрытие детских площадок, ресторанов, магазинов (за исключением продуктовых), большинства предприятий наблюдалось практически во всех регионах (за исключением Сахалина) (см. рис. 8). Определенные послабления были введены регионами, которые пытались найти баланс между эпидемиологической обстановкой и местной экономикой. Однако половинчатость мер не смогла полностью изменить тренд с заболеваемостью.

Выводы:

– обоснована необходимость приведения статистики, особенно по показателями летальности COVID-19, к сопоставимому виду;

– охарактеризована потребность в систематическом сборе менее актуализированных и «текущих» данных, таких как переписи населения, ежегодная, квартальная, месячная и недельная демографическая статистика, учет сезонных и маятниковых миграций, суточной мобильности горожан и др., связанных с пандемией;

– показана сохранность принципа полимасштабности на разных территориальных уровнях: от ситуации в стране или на континенте до состояния дел в отдельных локусах (регионе, муниципалитете, городе, микрорайоне);

– оценена возможность проведения анализа демографического, социально-экономического, политического и экологического контекста пандемии;

– показана возможность непрерывного изучения пандемии и происходящих изменений в режиме реального времени с момента первого зафиксированного случая;

– проверена гипотеза сохранения полосы повышенного числа случаев заражения на территории, располагающиеся между 32,5° и 52,5° с. ш., до настоящего времени.

Окончательные выводы по характеру распространения COVID-19 и масштабам последствий делать пока преждевременно. Самым острым вопросом, на который пока нет четкого ответа, остается вклад коронавируса в общую смертность населения. К сожалению, это станет понятно только через некоторое время, когда появится полноценная демографическая статистика. Тогда же будет возможность оценить вклад «отложенных демографических событий» и увидеть на карте пространственные диспропорции вклада коронавируса в общие параметры смертности в странах, регионах и муниципалитетах.

Благодарности. Статья подготовлена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-47-01001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Борисевич С.В., Грабарев П.А., Лукин Е.П., Мищенко О.А. Эколого-биоценотические связи и эпидемиология некоторых природно-очаговых инфекций // Инфекционные болезни: Новости. Мнения. Обучение. 2018. Т. 7. № 3. С. 114–126. DOI: 10.24411/2305-3496-2018-13017.

Вендина О.И., Панин А.Н., Тикунов В.С. Социальное пространство Москвы: особенности и структура // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2019. № 6. С. 115–122.

Кастельс М. Информационная эпоха: экономика, общество и культура. М.: Изд. дом ГУ-ВШЭ, 2000. 608 с.

Тикунов В.С. Моделирование в картографии: учебник. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1997. 405 с.

Hagerstrand T. Innovation Diffusion as a Spatial Process. Chicago and London: University of Chicago Press, 1967, 334 p.

Vendina O., Panin A., Tikunov V. Social space of Moscow: features and structure. *Regional Research of Russia,* Pleiades Publishing, Ltd (Road Town, United Kingdom), 2019, vol. 9, no. 3, p. 245–256.

Электронные ресурсы

ВОЗ. Всемирная организация здравоохранения. URL: https://www.who.int/ru/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019 (дата обращения 12.07.2020).

Гарант.RU. Информационно-правовой портал. URL: https://www.garant.ru/ (дата обращения 12.05.2020).

Информация о случаях заболевания COVID-19 Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. URL: https://www.rospotrebnadzor.ru/region/korono_virus/epid.php (дата обращения 12.05.2020).

Мир после пандемии. ФОМ: образ жизни, 05.05.2020. URL: https://fom.ru/Obraz-zhizni/14386 (дата обращения 05.05.2020).

Мониторинг состояния районов Москвы в период борьбы с коронавирусом. Совместный проект ТАСС, МЦУ и Habidatum. URL: https://tass.ru/monitoring-sostoyaniya-rayonov-moskvy-v-period-borby-s-koronavirusom (дата обращения 12.05.2020).

Рябова И. «Пандемия страха»: почему люди впадают в панику. Интернет портал «Эконс», 20 марта 2010. URL: https://econs.online/articles/coffee-break/pandemiya-strakha-pochemu-lyudi-vpadayut-v-paniku/ (дата обращения 15.05.2020)

Поступила в редакцию 19.08.2020
После доработки 24.08.2020
Принята к публикации 25.08.2020

A.N. Panin[1], I.A. Rilskiy[2], V.S. Tikunov[3]

SPATIAL PATTERNS OF COVID-19 DISTRIBUTION IN RUSSIA AND THE WORLD: CARTOGRAPHIC ANALYSIS

The article is devoted to the analysis of spatial patterns of COVID-19 distribution, the geography of which was fully manifested in the period from February to May 2020. It is during this period that clear areas and boundaries of regional differences of «spreading» are recorded, associated with existing logistical, socio-economic and center-peripheral factors. Later monitoring of COVID-19 shows an averaging of indicators (at dawn per 100 thousand inhabitants) and a kind of leveling of the epidemiological situation in accordance with the population density.

The paper uses data on morbidity in conjunction with management measures, which in turn were dictated not only by the objective epidemiological situation, but also by regional features of socio-political processes. We use Yandex data on self-isolation and our own media monitoring of conflicts and hotbeds of social tension (increased fears) in Russia. The COVID-19 geo-information system is used by ArcGIS for analysis and mapping.

Spatial analysis is built in the logic of multi-scale, i.e. World, Russia, Moscow. All three levels are characterized by a «diffusion of coronavirus innovations» associated with the beginning of spread in well-off and socially-economically developed urban centers. Then the center of distribution shifts to peripheral less developed territories. For Russia, at the initial stages of COVID-19 distribution, there are three main centers, namely Moscow and the Moscow region, oil and gas-bearing regions and the North, and the North Caucasus. The main factors of the high rate of virus spread in these territories are both the developed transport and logistics characteristics, and a set of unique regional features, such as increased contact and a weak health system in Dagestan, shift flows and crowding of shift settlements in the Yamal-Nenets Autonomous district, and a high share of the creative class in the Moscow region.

The work is a monitoring study and will be supplemented with new data, maps and analytics. By the end of 2020 – beginning of 2021, it will be possible to assess the contribution of COVID-19 to overall mortality and analyze in detail the demographic consequences of the spread of the virus.

Key words: coronavirus, restrictive measures, spatial differentiation, ArcGIS, Moscow, municipalities

Acknowledgements. The work was financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 20-47-01001).

REFERENCES

Borisevich S.V., Grabarev P.A., Lukin E.P., Mishchenko O.A. Ekologo-biotsenoticheskie sviazy i epidemiologiya nekotorych prirodno-ochagovych infeksiy [Ecological-biocenotical relations and epidemiology of some natural foci viral infections] *Infektsionnye bolezni: Novosti, Mneniya, Obuchenie*, 2018, vol. 7, no. 3, p. 114–126. DOI: 10.24411/2305-3496-2018-13017. (In Russian)

Hagerstrand T. Innovation Diffusion as a Spatial Process. Chicago and London: University of Chicago Press, 1967, 334 p.

Kastels M. Informatsionnaya epocha: economika, obshestvo i kul'tura [Epoch of information: economy, society and culture] Moscow, GU VShE Publ. House, 2000, 608 p.

Tikunov V.S. Modelirovanie v kartografii. [Modeling in cartography] Uchebnik, Moscow, MSU Publ., 1997, 405 p.

Vendina O.I., Panin A.N, Tikunov V.S. Socialnoe prostranstvo Moskvy: osobennosti i struktura [Social space of Moscow: peculiarities and patterns]. *Izvestiya RAN, ser. Geograficheskaya*, 2019, 6, pp. 3–17.

Vendina O.I., Panin A.N., Tikunov V.S. Social space of Moscow: features and structure. *Regional Research of Russia*, Pleiades Publishing, Ltd (Road Town, United Kingdom), 2019, vol. 9, no. 3, pp. 245–256.

Web-sources

World Health Organization, URL: https://www.who.int/ru/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019 (access date 12.07.2020).

Garant. RU. Information and legal portal, URL: https://www.garant.ru/ (access date 12.05.2020).

Informatsiya o sluchayakh zabolevaniya COVID-19 Federalnoj sluzhby po nadzory v sfere zaschity prav potrebitelej i blagopoluchiya cheloveka, URL: https://www.rospotrebnadzor.ru/region/korono_virus/epid.php (access date 12.07.2020).

Mir posle pandemii. FOM: obraz zhizni, 05.05.2020, URL: https://fom.ru/Obraz-zhizni/14386 (access date 12.07.2020).

Monitoring sostoyaniya rajonov Moskvy v period bor'by s koronavirusom. Sovmestnyj proekt TASS, MTsU and Habidatum, URL: https://tass.ru/monitoring-sostoyaniya-rayonov-moskvy-v-period-borby-s-koronavirusom (access date 12.07.2020).

Ryabova I. «Pandemiya strakha»: pochemu liudi vpadaut v paniku. Internet portal «Ekons», 20 Marta 2010. URL: https://econs.online/articles/coffee-break/pandemiya-strakha-pochemu-lyudi-vpadayut-v-paniku/ (access date 12.07.2020).

Received 19.08.2020
Revised 24.08.2020
Accepted 25.08.2020

[1] Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Integrated Mapping, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail*: alex_panin@mail.ru

[2] Moscow State University, Faculty of Geography, World Data Center for Geography, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail*: rilskiy@mail.ru

[3] Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Integrated Mapping, Head of the Laboratory, Professor, D.Sc. in Geography; *e-mail*: vstikunov@yandex.ru

УДК 631.445.5:631.445.4

Р.М. Дауд[1,2], С.И. Колесников[3], А.А. Кузина[4], Т.В. Минникова[5], К.Ш. Казеев[6], Д.Х. Нгуег[7], Х.К. Данг[8,9]

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ АРИДНЫХ ПОЧВ ЮГА ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ К ЗАГРЯЗНЕНИЮ КАДМИЕМ ПО БИОЛОГИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

Аридные почвы выполняют важные экологические функции, прежде всего, поддержание биологического разнообразия и устойчивости биосферы. Одним из приоритетных загрязнителей для них является кадмий. Аридные почвы Юга Европейской части России различаются по своей устойчивости к загрязнению кадмием и образуют следующий ряд по мере ее снижения: черноземы обыкновенные (haplic chernozem) ≥ темно-каштановые (haplic kastanozems) ≥ каштановые (haplic kastanozems) ≥ светло-каштановые (haplic kastanozems) > бурые полупустынные (haplic calcisols) > песчаные (calcaric arenosols). Чем тяжелее гранулометрический состав и больше органического вещества в исследованных почвах, тем сильнее связываются металлы и меньше проявляют токсичность. Также были разработаны региональные предельно допустимые концентрации (рПДК) кадмия в аридных почвах Юга Европейской части России на основе нарушения их экосистемных функций. Региональная ПДК кадмия для черноземов обыкновенных (haplic chernozem) и темно-каштановых почв (haplic kastanozems) составляет 3,0 мг/кг почвы, для каштановых (kastanozems haplic) – 2,4 мг/кг, для светло-каштановых (haplic kastanozems) – 1,9 мг/кг, для бурых полупустынных (haplic calcisols) – 1,6 мг/кг, для песчаных бурых полупустынных (calcaric arenosols) – 1,1 мг/кг. Разработанные рПДК могут быть использованы для нормирования содержания кадмия в аридных почвах других регионов мира. Также, разработаны прогнозные картосхемы, отражающие степени ухудшения биологического состояния аридных почв Юга России при загрязнении разными концентрациями кадмия.

Ключевые слова: каштановые почвы, бурые полупустынные почвы, биотестирование, нормирование, прогнозирование, региональные предельно допустимые концентрации

Введение. Основными антропогенными источниками загрязнения почв кадмием являются сжигание угля, нефти и нефтепродуктов, добыча и переработка цветных металлов и железа, сжигание твердых бытовых отходов, в частности поливинилхлоридного пластика, производство цемента, резины, текстиля, красителей, применение фосфатных удобрений и пестицидов, захоронение содержащих кадмий аккумуляторов и др. [Bro-Rasmussen, 1996; Jackson, Macgillivray, 1995; Jarup, 2003; Khan et al., 2017; Cadmium Toxicity …, 2019; Pan et al., 2010].

Кадмий относят к высокотоксичным тяжелым металлам, представляющим значительную опасность для окружающей среды даже в низких концентрациях. Он имеет длительный биологический период выведения и занимает седьмое место в списке приоритетных опасных веществ [Sidhu et al., 2017a; Wagner, 1993].

Механизмами токсичности кадмия для живых организмов является ингибирование ферментов, в том числе вследствие замещения кадмием цинка [Campbell, 2006; Wuana, Okieimen, 2011], а также снижение проницаемости биологических мембран [Kabata-Pendias, 2010].

В почве основной химической формой кадмия является Cd^{2+}. В такой форме он проникает в клетки корней растений с помощью регулируемых цинком и железом транспортеров [Asgher et al., 2015; Tudoreanu, Phillips, 2004].

Подвижность и биодоступность кадмия в почве зависит, прежде всего, от таких ее свойств, как гранулометрический состав, pH, Eh, содержание

[1] Южный федеральный университет, Академия биологии и биотехнологий им. Д.И. Ивановского, кафедра экологии и природопользования, Россия

[2] Университет Тишрин, Сирия, аспирант; *e-mail*: ramadaoud91@yahoo.com

[3] Южный федеральный университет, Академия биологии и биотехнологий им. Д.И. Ивановского, зав. кафедрой экологии и природопользования, докт. с.-хоз. н., профессор; *e-mail*: kolesnikov@sfedu.ru

[4] Южный федеральный университет, Академия биологии и биотехнологий им. Д.И. Ивановского, кафедра экологии и природопользования, канд. биол. н., ст. науч. с.; *e-mail*: nyuta_1990@mail.ru

[5] Южный федеральный университет, Академия биологии и биотехнологий им. Д.И. Ивановского, кафедра экологии и природопользования, канд. биол. н., ст. науч. с.; *e-mail*: loko261008@yandex.ru

[6] Южный федеральный университет, Академия биологии и биотехнологий им. Д.И. Ивановского, кафедра экологии и природопользования, докт. геогр. н., профессор; *e-mail*: kamil_kazeev@mail.ru

[7] Совместный Российско-вьетнамский тропический научно-исследовательский и технологический центр, институт тропической экологии, доцент, канд. геогр. н.; *e-mail*: danghoi110@gmail.com

[8] Южный федеральный университет, Академия биологии и биотехнологий им. Д.И. Ивановского, кафедра экологии и природопользования, Россия

[9] Совместный Российско-вьетнамский тропический научно-исследовательский и технологический центр, институт тропической экологии, аспирант; *e-mail*: danghungcuong@gmail.com

органического вещества, степень засоления. Чем тяжелее гранулометрический состав почвы, тем прочнее закрепляется кадмий. При увеличении pH кадмий из подвижной формы трансформируется в неподвижную и его биодоступность снижается. С увеличением Eh подвижность кадмия снижается. Увеличение засоленности также повышает подвижность кадмия в почве [Tang et al., 2016]. Органическое вещество адсорбирует кадмий, делая его менее подвижным [Khan et al., 2017].

Засушливые земли (аридные, семиаридные и сухие субгумидные районы) занимают 41% поверхности Земли. На них проживает более 38% населения мира, в результате чего эти территории подвергаются значительному антропогенному воздействию [Hu, Nan, 2018]. Аридные экосистемы очень важны своими экологическими функциями, в частности, поддержанием биологического разнообразия и устойчивости биосферы [Davidson, 2014; Kingsford et al., 2016; Greed et al., 2017; Menéndez-Serra et al., 2019]. Не составляют исключение и аридные экосистемы Юга Европейской части России.

Аридные почвы Юга Европейской части России представлены зональными каштановыми и бурыми полупустынными почвами, а также интразональными песчаными бурыми полупустынными [Национальный атлас …, 2011; Казеев, Колесников, 2015]. Эти почвы различаются по устойчивости к загрязнению тяжелыми металлами (ТМ), в том числе кадмием, поскольку обладают разными эколого-генетическими свойствам, обуславливающими подвижность кадмия в почве [Казеев, Колесников, 2015].

Среди тяжелых металлов, загрязняющих окружающую среду, кадмий является одним из наиболее токсичных элементов даже при незначительных концентрациях [Guidelines …, 2017; Goering et al., 1994]. Загрязнение почв кадмием широко распространено в аридных районах Юга Европейской части России. Основными его источниками являются удобрения и пестициды, теплоэлектростанции, автотранспорт, бытовые отходы, сточные воды, месторождения нефти и газа, строительство нефте- и газопроводов. В отдельных случаях предельно-допустимые концентрации (ПДК) кадмия в почве этих территорий превышены в пять и более раз [Отчет о научно-производственной деятельности …, 2016; Дьяченко, Матасова, 2016]. Загрязнение почв кадмием характерно и для других аридных территорий мира [Felix-Henningsen et al., 2007; Nan et al., 2011; Hu, Nan, 2018].

Цель работы – оценить устойчивость аридных почв Юга Европейской части России к загрязнению кадмием по биологическим показателям в модельном эксперименте.

Объекты и методы исследования. Было проведено лабораторное моделирование химического загрязнения кадмием всех основных аридных почв Юга Европейской части России, а также чернозема обыкновенного для сравнения. Места отбора и основные эколого-генетические характеристики исследованных почв представлены в табл. 1.

Корректность переноса результатов лабораторного моделирования химического загрязнения почв в натурные условия была установлена предшествующими исследованиями [Колесников и др., 2014].

Почву отбирали из верхнего 10-см слоя. В непахотных почвах основное количество металлов накапливается именно в нем [Kabata-Pendias, 2010].

Кадмий вносили в почву в количествах 1, 10, 100 предельно допустимых концентраций (ПДК) (3, 30 и 300 мг/кг, соответственно). ПДК кадмия в почве в России не разработана. ОДК кадмия в суглинистых и глинистых нейтральных почвах составляет 2 мг/кг, песчаных – 0,5 мг/кг [ГН 2.1.7.2511-09].

Таблица 1

Места отбора и эколого-генетические характеристики почв

Название почв по эколого-генетической классификации почв [Национальный …, 2011]	Название почв по [World Reference Base …, 2006]	Условные обозначения	Экосистема	Место отбора	Координаты	Содержание органического вещества, %	pH	Гранулометрический состав
Чернозем обыкновенный	haplic chernozem	Чо	Настоящая степь	Ростовская область, Октябрьский район, п. Персиановский	47°30'18,11" N 40°9'10,95" E	3,8	7,6	Тяжелосуглинистый
Темно-каштановая	haplic kastanozems	Кт	Сухая степь	Ростовская область, Орловский район, х. Майорский	47°2'13,91" N 42°5'23,53" E	3,5	7,6	Тяжелосуглинистый
Каштановая	haplic kastanozems	К	Сухая степь	Ростовская область, с. Ремонтное	46°34'23,24" N 43°36'28,64" E	2,8	7,8	Тяжелосуглинистый
Светло-каштановая	haplic kastanozems	Кс	Сухая степь	Республика Калмыкия, г. Элиста	46°18'58,77" N 44°22'53,96" E	1,4	8,1	Среднесуглинистый
Бурая полупустынная	haplic calcisols	Бп	Полупустыня	Республика Калмыкия, Яшкульский район, п. Хулхута	46°19'16,71" N 46°19'42,86" E	1,2	8,3	Легкосуглинистый
Песчаная бурая полупустынная	calcaric arenosols	П(бп)	Полупустыня	Астраханская область, Наримановский район, с. Новокучергановка	46°15'54,02" N 47°49'3,59" E	0,8	8,3	Песчаный

ПДК кадмия в почве, разработанная в Германии, равна 3 мг/кг [Kabata-Pendias, 2010]. Учитывая, что большинство использованных в исследовании аридных почв являются суглинистыми нейтральными, то есть буферными к загрязнению кадмием, моделировали загрязнение почв, начиная с 3 мг/кг.

Загрязнение почв кадмием происходит в большей степени в форме оксида [Kabata-Pendias, 2010], поэтому его вносили в почву в виде оксида кадмия (II). Кроме того, при использовании оксида металла, в отличие от соли, в почву не поступают сопутствующие анионы, способные повлиять на ее биологические свойства.

После загрязнения кадмием почву массой 1 кг инкубировали в пластиковых сосудах в трехкратной повторности при температуре 20–22°C и увлажнении 60% от полевой влагоемкости.

Из многочисленных показателей состояния почвы исследовали именно биологические свойства по той причине, что именно они первыми реагируют на внешнее воздействие, в том числе на загрязнение, и являются значительно более чувствительными и информативными по сравнению с другими свойствами почвы [Колесников и др., 2000]. Биологические показатели оценивали через один месяц после загрязнения. Как правило, их наибольшее ухудшение происходит в этот период, что позволяет выявить максимальную токсичность металла [Колесников и др., 2000].

Для определения биологических свойств почвы использовали общепринятые методы [Казеев и др., 2016]. Общую численность бактерий в почве определяли методом люминесцентной микроскопии, обилие бактерий рода *Azotobacter* – методом комочков обрастания на среде Эшби, активность каталазы – по скорости разложения перекиси водорода, активность дегидрогеназ – по скорости превращения хлорида трифенилтетразолия в трифенилформазан, целлюлозолитическую активность – по скорости разложения в почве хлопчатобумажного полотна, о фитотоксичности почв судили по длине корней редиса (сорт Корунд).

Все использованные биологические показатели отличаются высокой чувствительностью, отражающей степень снижения значений биологического показателя в вариантах с загрязнением по сравнению с контролем, и высокой информативностью, то есть теснотой корреляции между показателем и содержанием в почве загрязняющего вещества, что было подтверждено многочисленными исследованиями [Колесников и др., 2000, 2013, 2014].

На основе вышеперечисленных биологических показателей рассчитывали интегральный показатель биологического состояния (ИПБС) почвы [Колесников и др., 2000], который включает микробиологические, биохимические и фитотоксические параметры, характеризующие разные стороны протекающих в почве биологических процессов.

Расчет ИПБС почвы проводили следующим образом. Значения биологических показателей в незагрязненной почве (контроле) принимали за 100%, а в загрязненной (вариантах эксперимента) выражали в процентах относительно контроля (100%). Затем рассчитывали среднее значение всех биологических показателей для каждого варианта эксперимента. Применяемая методика позволяет объединить (интегрировать) значения разных биологических показателей, имеющих разные единицы измерения, в один общий показатель.

Результаты исследования. В результате загрязнения кадмием было зафиксировано снижение всех исследованных биологических показателей аридных почв Юга Европейской части России (рис. 1): общей численности бактерий, активности каталазы и дегидрогеназы, целлюлозолитической активности, обилия бактерий рода *Azotobacter*, длины корней редиса. Степень ухудшения биологических показателей зависела от концентрации кадмия в почве.

Аридные почвы Юга Европейской части России проявили разную устойчивость к загрязнению кадмием. Был сформирован следующий ряд по мере снижения устойчивости: черноземы обыкновенные (haplic chernozem) (79) ≥ темно-каштановые (haplic kastanozems) (78) ≥ каштановые (haplic kastanozems) (77) ≥ светло-каштановые (haplic kastanozems) (73) > бурые полупустынные (haplic calcisols) (65) > песчаные бурые полупустынные (calcaric arenosols) (58). В скобках представлены значения ИПБС почв (%), загрязненных кадмием (среднее для трех доз: 1, 10 и 100 ПДК); ИПБС незагрязненных почв (контроль) принят за 100%. Чем выше значение ИПБС в скобках, тем в меньшей степени снижаются биологические свойства почвы при ее загрязнении кадмием. Как видно из полученного ряда устойчивости почв, чем тяжелее гранулометрический состав и больше органического вещества в исследованных почвах (см. табл. 1), тем сильнее связывается кадмий и меньше проявляет токсичность по отношению к биологическим свойствам почв. Щелочно-кислотные и окислительно-восстановительные условия в исследованных почвах различаются не столь существенно, а, следовательно, не оказывают такого значительного влияния на подвижность в них кадмия и его токсичность. Аналогичные закономерности связи экотоксичности тяжелых металлов с гранулометрическим составом почв и содержанием в них органического вещества были получены для черноземов [Колесников и др., 2013], предгорных и горных почв Кавказа [Колесников и др., 2009].

Темно-каштановые почвы отличаются тяжелосуглинистым гранулометрическим составом, высоким содержанием органического вещества (3,5%), нейтральным pH (см. табл. 1). Эти свойства способствуют закреплению кадмия почвой и его меньшему влиянию на ее биологические свойства.

Для каштановых почв характерен также тяжелосуглинистый гранулометрический состав. Однако содержание органического вещества в них меньше (2,8%), соответственно, подвижность кадмия в них больше, чем в темно-каштановых почвах (3,5%).

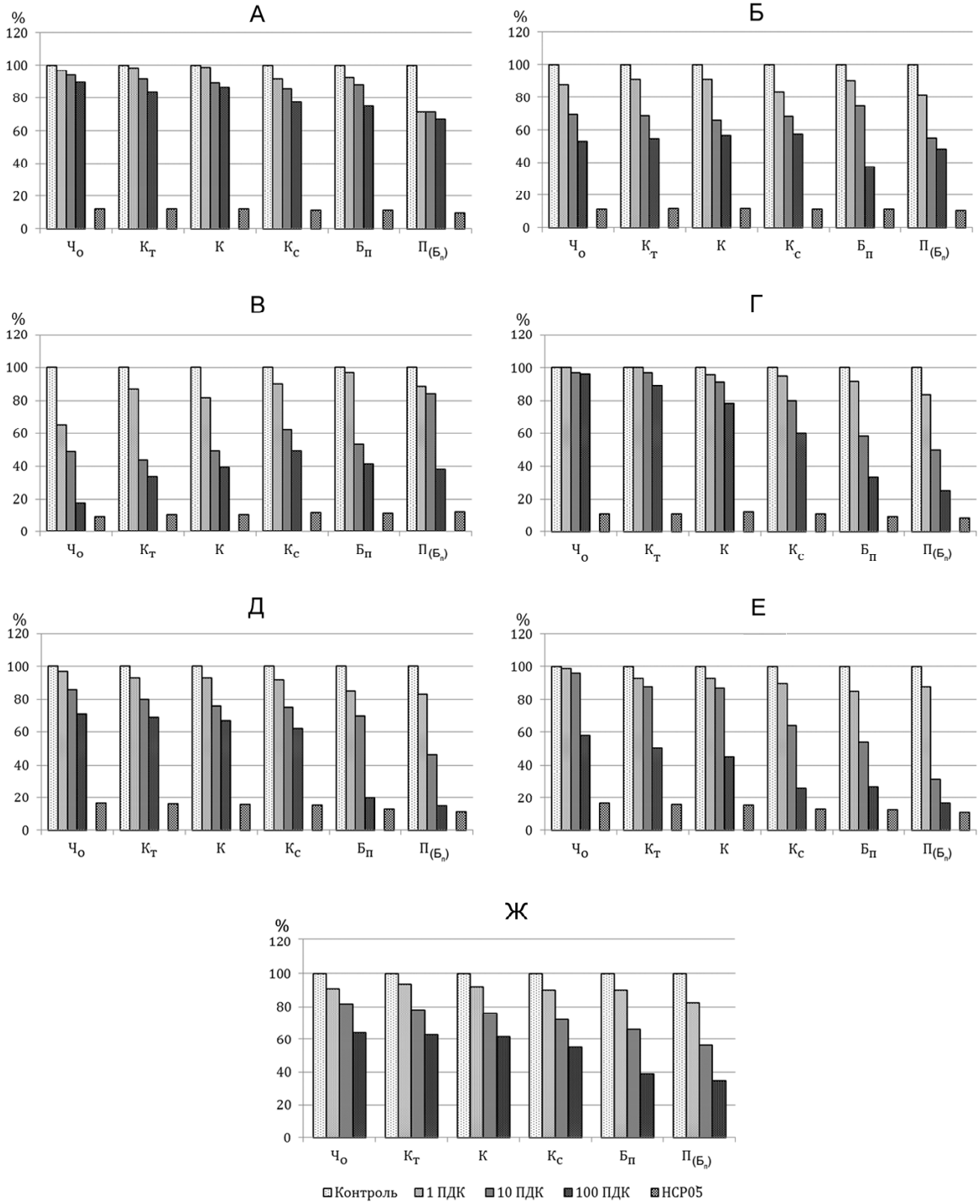

Рис. 1. Влияние загрязнения кадмием аридных почв Юга Европейской части России на биологические показатели, % от контроля: А – активность каталазы, Б – активность дегидрогеназ, В – общая численность бактерий, Г – обилие бактерий рода *Azotobacter*, Д – длина корней редиса, Е – целлюлозолитическая активность, Ж – интегральный показатель биологического состояния (ИПБС), НСР – наименьшая существенная разность. Почвы: $Ч_о$ – черноземы обыкновенные, $К_т$ – темно-каштановая, К – каштановая, $К_с$ – светло-каштановая, $Б_п$ – бурая полупустынная, $П_{Бп}$ – песчаная

Fig. 1. The impact of cadmium pollution on the biological properties of arid soils in the South of the European part of Russia, % of control: А – Activity of catalase, Б – Activity of dehydrogenases, В – Total number of bacteria, Г – Abundance of *Azotobacter* bacteria, Д – Root length (phytotoxicity), Е – Cellulolytic activity, Ж – Integral indicator of the biological state of soil (IIBS), LSD – Least significant difference. Soils: $Ч_о$ – ordinary chernozems, $К_т$ – dark chestnut, K – chestnut, $К_с$ – light chestnut, $Б_п$ – drawn semi-desert, $П_{Бп}$ – sandy

Для светло-каштановых почв свойственен еще более легкий (среднесуглинистый) гранулометрический состав и еще меньшее содержание органического вещества (1,4%), и следовательно, еще более высокая подвижность кадмия.

Бурые полупустынные почвы имеют легкосуглинистый гранулометрический состав, более легкий, чем у всех каштановых почв, и более низкое содержание органического вещества (1,2%). Это обуславливает высокую подвижность кадмия в этих почвах.

Песчаные бурые полупустынные почвы отличаются самым легким из всех исследованных почв гранулометрическим составом – песчаным. И самым низким содержанием органического вещества (0,8%). В результате подвижность кадмия в этих почвах наибольшая. Соответственно, на них в наибольшей степени проявляются последствия загрязнения кадмием.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой чувствительности и информативности использованных биологических показателей и целесообразности их применения для оценки устойчивости аридных почв к загрязнению кадмием.

Проведенное исследование позволило предложить региональные нормативы его предельно допустимого содержания в аридных почвах Юга Европейской части России на основе нарушения экологических и сельскохозяйственных функций почв.

Предыдущими исследованиями [Колесников и др., 2002] было установлено, что при химическом загрязнении почвы происходит нарушение ее экосистемных (биогеоценотических) функций. В зависимости от степени загрязнения в почве нарушаются либо все экосистемные функции, либо некоторые из них. Это зависит от концентрации загрязняющего вещества. При химическом загрязнении почвы нарушение (срыв) экосистемных функций происходит в определенной очередности. Первыми нарушаются информационные функции, затем – биохимические, физико-химические, химические и целостные, в последнюю очередь – физические. Установленную закономерность очередности целесообразно использовать при экологическом нормировании загрязнения почв. В качестве индикатора нарушения той или иной группы экосистемных функций почвы хорошо зарекомендовал себя интегральный показатель биологического состояния почвы. Как было установлено ранее, при снижении ИПБС менее чем на 5%, нарушения экосистемных функций почвы не происходит. Уменьшение ИПБС на 5–10% диагностирует нарушение информационных функций, на 10–25% – биохимических, физико-химических, химических и целостных, более чем на 25% – физических [Колесников и др., 2002].

Целью экологического нормирования является предотвращение нарушения основных экосистемных функций почвы. Следовательно, снижение ИПБС более чем на 10% свидетельствует о серьезных нарушениях в функционировании почвы. Таким образом, концентрация загрязняющего почву вещества, которая вызывает снижение ИПБС почвы на 10%, может считаться рПДК этого вещества, превышение которой недопустимо.

Для расчета концентраций загрязняющего вещества, вызывающего снижение ИПБС почвы в той или иной степени, были рассчитаны уравнения регрессии, описывающие зависимость снижения значений ИПБС от содержания в почве кадмия (табл. 2). Уравнения регрессии позволяют рассчитать концентрации загрязняющего вещества (кадмия), вызывающие нарушение тех или иных групп экосистемных функций почвы.

По результатам исследования разработана схема экологического нормирования загрязнения аридных почв Юга Европейской части России кадмием (табл. 3). Региональная ПДК кадмия в черноземах обыкновенных (haplic chernozem) и темно-каштановых почвах (haplic kastanozems) составляет 3,0 мг/кг кадмия в почве, каштановых (haplic kastanozems) 2,4 мг/кг, светло-каштановых (haplic kastanozems) – 1,9 мг/кг, бурых полупустынных (haplic calcisols) – 1,6 мг/кг, песчаных бурых полупустынных (calcaric arenosols) – 1,1 мг/кг. Разработанные рПДК могут быть использованы не только для аридных почв Юга Европейской части России, но и для аналогичных аридных почв других регионов мира.

По результатам исследования разработаны прогнозные картосхемы ухудшения биологического состояния аридных почв Юга Европейской части России при их загрязнении разными дозами кадмия: 3, 30 и 300 мг/кг (рис. 2). Например, если концентрация кадмия в черноземе обыкновенном составит 3 мг/кг, то его биологическое состояние, рассчитанное через ИПБС, ухудшится на 9%, 30 мг/кг – на 18%, 300 мг/кг – на 36% (табл. 4).

Таблица 2

Зависимость снижения значений ИПБС от содержания в почве кадмия

Почва	Уравнение регрессии
Черноземы обыкновенные (haplic chernozem)	$y = -5{,}213\ln x + 96{,}339$, $R^2 = 1$
Темно-каштановые (haplic kastanozems)	$y = -5{,}652\ln x + 96{,}858$, $R^2 = 1$
Каштановые (haplic kastanozems)	$y = -5{,}785\ln x + 95{,}916$, $R^2 = 1$
Светло-каштановые (haplic kastanozems)	$y = -6{,}809\ln x + 95{,}042$, $R^2 = 1$
Бурые полупустынные (haplic calcisols)	$y = -9{,}215\ln x + 95{,}122$, $R^2 = 1$
Песчаные бурые полупустынные (calcaric arenosols)	$y = -9{,}877\ln x + 91{,}407$, $R^2 = 1$

Таблица 3

Схема экологического нормирования загрязнения кадмием аридных почв Юга Европейской части России по степени нарушения экосистемных (биогеоценотических) функций почв

Почвы*	Незагрязненные	Слабозагрязненные	Среднезагрязненные	Сильнозагрязненные
Степень снижения ИПБС почвы**	<5%	5–10%	10–25%	>25%
Нарушаемые экосистемные функции***	–	Информационные	Химические, физико-химические, биохимические; целостные	Физические
Почва	Содержание кадмия в почве, мг/кг			
Черноземы обыкновенные (haplic chernozem)	<1,3	1,3–3	3–50	>50
Темно-каштановые (haplic kastanozems)	<1,3	1,3–3	3–40	>40
Каштановые (haplic kastanozems)	<1,1	1,1–2,4	2,4–30	>30
Светло-каштановые (haplic kastanozems)	<1	1–1,9	1,9–14	>14
Бурые полупустынные (haplic calcisols)	<1	1–1,6	1,6–6	>6
Песчаные бурые полупустынные (calcaric arenosols)	<0,8	0,8–1,1	1,1–4	>4

Примечание: * Классификация почв по [Колесников и др., 2002], ** Определение ИПБС почв по S.I. [Kolesnikov et al., 2019], *** Классификация экосистемных функций почвы по [Добровольский, Никитин, 2006].

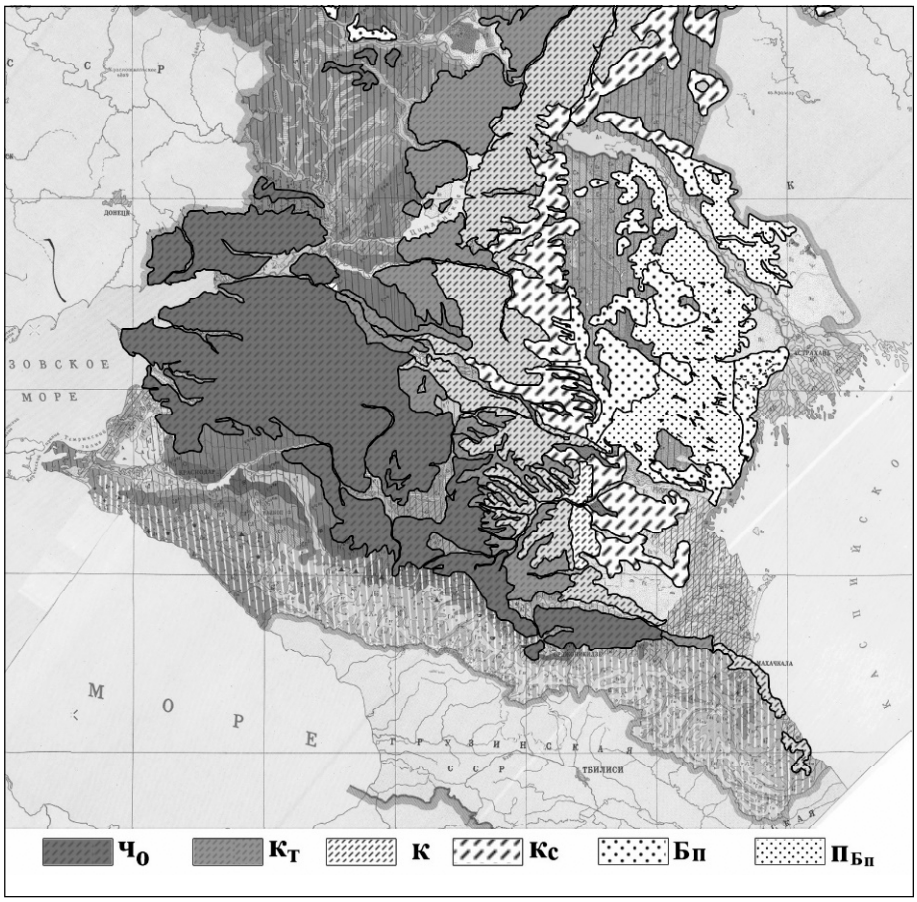

Рис. 2. Прогнозная картограмма степени ухудшения биологического состояния (в %) аридных почв Юга Европейской части России при их загрязнении 1, 10 и 100 ПДК кадмия (3, 30 и 300 мг/кг, соответственно). Почвы: $Ч_о$ – черноземы обыкновенные, $К_т$ – темно-каштановая, К – каштановая, $К_с$ – светло-каштановая, $Б_п$ – бурая полупустынная, $П_{Бп}$ – песчаная

Fig. 2. Cartogram of predicted degree of deterioration (%) of the biological state of arid soils in the South of the European part of Russia if contaminated by 1, 10 and 100 MPC cadmium (3, 30 and 300 mg/kg, respectively). Soils: $Ч_о$ – ordinary chernozems, $К_т$ – dark chestnut, K – chestnut, $К_с$ – light chestnut, $Б_п$ – drawn semi-desert, $П_{Бп}$ – sandy

Таблица 4

Ухудшение биологического состояния (в %) аридных почв Юга Европейской части России при их загрязнении 1, 10 и 100 ПДК кадмия

Почва	Доза загрязнения кадмием		
	1 ПДК (3 мг/кг)	10 ПДК (30 мг/кг)	100 ПДК (300 мг/кг)
Черноземы обыкновенные	9	18	36
Темно-каштановые	6	22	37
Каштановая	8	24	38
Светло-каштановая	10	28	45
Бурая полупустынная	10	34	61
Песчаная	17	44	65

Выводы:

– аридные почвы Юга Европейской части России проявили разную устойчивость к загрязнению кадмием. Был получен следующий ряд почв по мере снижения их устойчивости к загрязнению: черноземы обыкновенные (haplic chernozem) (79) ≥ темно-каштановые (haplic kastanozems) (78) ≥ каштановые (haplic kastanozems) (77) ≥ светло-каштановые (haplic kastanozems) (73) > бурые полупустынные (haplic calcisols) (65) > песчаные бурые полупустынные (arenosols calcaric) (58). Чем тяжелее гранулометрический состав и больше органического вещества в исследованных почвах, тем сильнее связываются металлы и меньше проявляют токсичность.

– разработаны региональные предельно допустимые концентрации (рПДК) кадмия в аридных почвах Юга Европейской части России на основе нарушения их экосистемных функций. Региональная ПДК кадмия для черноземов обыкновенных (haplic chernozem) и темно-каштановых почв (haplic kastanozems) составляет 3,0 мг/кг кадмия в почве, каштановых (haplic kastanozems) – 2,4 мг/кг, светло-каштановых (haplic kastanozems) – 1,9 мг/кг, бурых полупустынных (haplic calcisols) – 1,6 мг/кг, песчаных бурых полупустынных (arenosols calcaric) – 1,1 мг/кг. Разработанные рПДК могут быть использованы для нормирования содержания кадмия в аридных почвах других регионов мира.

– разработаны прогнозные картосхемы степени ухудшения биологического состояния аридных почв Юга России при их загрязнении разными дозами кадмия.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках госзадания (Южный федеральный университет, проект № 0852-2020-0029) и государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации (грант Президента РФ НШ-2511.2020.11).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ГН 2.1.7.2511-09. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы / Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. М., 2009. 10 с.

Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Экология почв. Учение об экологических функциях почв. М.: Наука, 2006. 362 с.

Дьяченко В.В., Матасова И.Ю. Региональные кларки химических элементов в почвах европейской части юга России // Почвоведение. 2016. № 10. С. 1159–1166.

Казеев К.Ш., Колесников С.И. Атлас почв Азово-Черноморского бассейна. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2015. 80 с.

Казеев К.Ш., Колесников С.И., Акименко Ю.В., Даденко Е.В. Методы биодиагностики наземных экосистем. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. 356 с.

Колесников С.И., Жаркова М.Г., Самохвалова Л.С., Кутузова И.В., Налета Е.В., Зубков Д.А., Казеев К.Ш. Оценка экотоксичности тяжелых металлов и нефти по биологическим показателям чернозема // Экология. 2014. № 3. С. 163–173.

Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Влияние загрязнения тяжелыми металлами на эколого-биологические свойства чернозема обыкновенного // Экология. 2000. № 3. С. 193–201.

Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Экологические функции почв и влияние на них загрязнения тяжелыми металлами // Почвоведение. 2002. № 12. С. 1509–1514.

Колесников С.И., Тлехас З.Р., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Изменение биологических свойств почв Адыгеи при химическом загрязнении // Почвоведение. 2009. № 12. С. 1499–1505.

Колесников С.И., Ярославцев М.В., Спивакова Н.А., Казеев К.Ш. Сравнительная оценка устойчивости биологических свойств разных подтипов черноземов юга России к загрязнению Cr, Cu, Ni, Pb (в модельном эксперименте) // Почвоведение. 2013. № 2. С. 195–200.

Национальный атлас почв Российской Федерации // С.А. Шоба, Г.В. Добровольский, И.О. Алябина и др. М.: АСТ, 2011. 632 с.

Отчет о научно-производственной деятельности за 2016 год ФГБУ «ГЦАС «Астраханский»: отчет НИР. Астрахань: ФГБУ «ГЦАС «Астраханский», 2016.

Asgher M., Khan M.I.R., Anjum N.A., Khan N.A. Minimizing toxicity of cadmium in plants – role of plant growth regulators. *Protoplasma*, 2015, vol. 252, p. 399–413.

Bro-Rasmussen F. Contamination by persistent chemicals in food chain and human health. *Sci. Total Environ*, 1996, vol. 188, p. 45–60. DOI: 10.1016/0048-9697(96)05276-X.

Cadmium Toxicity and Tolerance in Plants From Physiology to Remediation. Hasanuzzaman M., Majeti Narasimha V.P., Masayuki F. (Eds.), Elsevier, 2019, p. 163–183. DOI: 10.1016/C2017-0-02050-5.

Campbell P.G.C. Cadmium-A priority pollutant. *Environmental Chemistry*, 2006, vol. 3, no. 6, p. 387–388.

Davidson N.C. How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Mar. Freshw. Res.*, 2014, vol. 65, p. 934–941.

Felix-Henningsen P., Urushadze T.F., Narimannidze E.I., Wichmann L., Steffens D., Kalandadze B. Heavy metal pollution of soils and food crops due to mining wastes in an irrigation district south of Tbilisi, eastern Georgia. *Annals of Agrarian Science*, 2007, vol. 5, no. 3, p. 11–27.

Goering P.L., Waalkes M.P., Klaassen C.D. Handbook of experimental pharmacology, vol. 115. *Toxicology of Metals, Biochemical Effects.* Goyer R.A., Cherian M.G. (Eds.). Springer, New York, 1994, p. 189–214.

Greed I.F., Lane C.R., Serran J.N., Alexander L.C., McLaughlin D.L., Raanan-Kiperwas H., Rains M.C., Rains K.C., Smith L. Enhancing protection for vulnerable waters. *Nat. Geosci.*, 2017, vol. 10, no. 11, p. 809–815.

Guidelines for Drinking-water Quality, 4th Edition Incorporating the First Addendum. World Health Organization (WHO), Geneva (License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO), 2017.

Hu Y., Nan Z. Soil Contamination in Arid Region of Northwest China: Status Mechanism and Mitigation. *Twenty Years of Research and Development on Soil Pollution and Remediation in China*. Luo Y., Tu C. (Eds). Springer, Singapore, 2018, p. 365–374.

Jackson T., Macgillivray A. Accounting for cadmium: tracking emissions of cadmium from the global economy. *Chem. Ecol.*, 1995, vol. 11, no. 3, p. 137–181. DOI: 10.1080/02757549508039067.

Jarup L. Hazards of heavy metal contamination. *Br. Med. Bull.*, 2003, vol. 68, no. 1, p. 167–182.

Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. 4th Edition. Boca Raton, FL: Crc Press, 2010, 548 p.

Khan M.A., Khan S., Khan A., Alam M. Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments. *Sci. Total Environ.*, 2017, vol. 601, p. 1591–1605.

Kingsford R.T., Basset A., Jackson L. Wetlands: conservation's poor cousins. *Aquat. Conserv. Mar. Freshwat. Ecosyst.*, 2016, vol. 26, p. 892–916.

Kolesnikov S.I., Kazeev K.S., Akimenko Y.V. Development of regional standards for pollutants in the soil using biological parameters. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, p. 191–544.

Menéndez-Serra M., Triadó-Margarit X., Castańeda C., Herrero J., Casamayor O.E. Microbial composition, potential functional roles and genetic novelty in gypsum-rich and hypersaline soils of Monegros and Gallocanta (Spain). *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 650, no. 1, p. 343–353.

Nan Z.R., Liu X.W., Zhao Z.J., Wang S.L., Yang Y.M., Wang Z.W. Chemical behavior and ecological risk assessment of heavy metals in arid oasis region. Chinese Environmental Science Press, Beijing, 2011.

Pan J., Plant J.A., Voulvoulis N., Oates C.J., Ihlenfeld C. Cadmium levels in Europe: implications for human health. *Environ. Geochem. Health*, 2010, vol. 32, no. 1, p. 1–12.

Sidhu G.P.S., Singh H.P., Batish D.R., Kohli R.K. Tolerance and hyperaccumulation of cadmium by a wild, unpalatable herb Coronopus didymus (L.) Sm. (Brassicaceae). *Ecotoxicol. Environ.*, Saf, 2017a, vol. 135, p. 209–215.

Tang X., Li Q., Wu M., Lin L., Scholz M. Review of remediation practices regarding cadmium-enriched farmland soil with particular reference to China. *J. Environ. Manag.*, 2016, vol. 181, p. 646–662.

Tudoreanu L., Phillips C.J.C. Modelling cadmium uptake and accumulation in plants. *Adv. Agron*, 2004, vol. 84, p. 121–157.

Wagner G.J. Accumulation of cadmium in crop plants and its consequences to human health. *Adv. Agron*, 1993, vol. 51, p. 173–212.

World Reference Base for Soil Resources. FAO, Rome, 2006, 128 p.

Wuana R.A., Okieimen F.E. Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. *ISRN Ecology*, 2011, Article ID 402647, 20 p. DOI: 10.5402/2011/402647.

Поступила в редакцию 06.05.19
После доработки 10.05.2020
Принята к публикации 25.08.2020

R.M. Daoud[1,2], S.I. Kolesnikov[3], A.A. Kuzina[4], T.V. Minnikova[5], K.Sh. Kazeev[6], D.H. Ngueg[7], H.K. Dang[8,9]

ASSESSMENT OF THE CADMIUM POLLUTION RESISTANCE OF ARID SOILS IN THE SOUTH OF THE EUROPEAN PART OF RUSSIA USING BIOLOGICAL INDICATORS

Arid soils perform important ecological functions, primarily maintaining biodiversity and sustainability of the biosphere. Cadmium is among the priority pollutants for arid soils. The arid soils of the South of the European part of Russia differ in their resistance to cadmium pollution and form the following sequence (the soils are arranged in the descending order of their resistance): ordinary chernozems (haplic chernozem) ≥ dark brown (haplic kastanozems) ≥ chestnut (haplic kastanozems) ≥ light chestnut (haplic

[1] Southern Federal University, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Department of Ecology and Environmental Management, Russia

[2] University of Tishreen, Syria, postgraduate student; *e-mail*: ramadaoud91@yahoo.com

[3] Southern Federal University, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Professor, Head of the Department of Ecology and Nature Management, D.Sc. in Agriculture; *e-mail*: kolesnikov@sfedu.ru

[4] Southern Federal University, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Department of Ecology and Environmental Management, Senior Scientific Researcher, PhD. in Biology; *e-mail*: nyuta_1990@mail.ru

[5] Southern Federal University, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Department of Ecology and Environmental Management, Senior Scientific Researcher, PhD. in Biology; *e-mail:* loko261008@yandex.ru

[6] Southern Federal University, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Department of Ecology and Environmental Management, Professor, D.Sc. in Geography; *e-mail*: kamil_kazeev@mail.ru

[7] Vietnam-Russian Tropical Center, Institute of Tropical Ecology, Director, Associate Professor, PhD in Geography; *e-mail*: danghoi110@gmail.com

[8] Southern Federal University, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Department of Ecology and Environmental Management, Russia

[9] Vietnam-Russian Tropical Center, Institute of Tropical Ecology, postgraduate student; *e-mail*: danghungcuong@gmail.com

kastanozems)> brown semi-desert (haplic calcisols)> sandy (calcaric arenosols). The heavier the particle size and the higher the organic matter content in studied soils, the more bound and less toxic the metals are. Also, regional maximum permissible concentrations (rMPC) of cadmium in arid soils of the south of the European part of Russia were suggested basing on the violation of their ecosystem functions. Regional MPC of cadmium for ordinary chernozem (haplic chernozem) and dark chestnut soils (haplic kastanozems) is 3,0 mg/kg of soil, 2,4 mg/kg for chestnut (kastanozems haplic), 1,9 mg/kg for light chestnut (haplic kastanozems), 1,6 mg/kg for brown semi-desert (haplic calcisols), and 1,1 mg/kg for sandy brown semi-desert (calcaric arenosols). The developed rMPC can be used to standardize cadmium content in arid soils of other regions of the world. Also, prognostic maps of the degree of deterioration of the biological state of arid soils under different levels of cadmium pollution have been compiled for southern Russia.

Key words: chestnut soils, brown semi-desert soils, biotesting, standardization, forecasting, regional maximum allowable concentrations

Acknowledgements. The study was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of a state assignment (Southern Federal University, project No. 0852-2020-0029) and state support of the leading scientific schools of the Russian Federation (grant of the President of the Russian Federation NSh-2511.2020.11).

REFERENCES

Asgher M., Khan M.I.R., Anjum N.A., Khan N.A. Minimising toxicity of cadmium in plants–role of plant growth regulators. *Protoplasma*, 2015, vol. 252, p. 399–413.

Bro-Rasmussen F. Contamination by persistent chemicals in food chain and human health. *Sci. Total Environ*, 1996, vol. 188, p. 45–60. DOI: 10.1016/0048-9697 (96)05276-X.

Cadmium Toxicity and Tolerance in Plants From Physiology to Remediation. Hasanuzzaman M., Majeti Narasimha V.P., Masayuki F. (Eds.), Elsevier, 2019, p. 163–183. DOI: 10.1016/ C2017-0-02050-5.

*Campbell P.G.*C. Cadmium-A priority pollutant, *Environmental Chemistry*, 2006, vol. 3, no. 6, p. 387–388.

Davidson N.C. How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Mar. Freshw. Res*, 2014, vol. 65, p. 934–941.

Dobrovol'skij G.V., Nikitin E.D. Ekologiya pochv. Uchenie ob ekologicheskih funkciyah pochv [Soil ecology. The doctrine of the ecological functions of soils] Moscow, Nauka Publ., 2006, 362 p. (In Russian)

D'yachenko V.V., Matasova I.Yu. Regional clarkes of chemical elements in soils of southern European Russia. *Eurasian Soil Science*, 2016, vol. 49, no. 10, p. 1091–1098.

Felix-Henningsen P., Urushadze T.F., Narimannidze E.I., Wichmann L., Steffens D., Kalandadze B. Heavy metal pollution of soils and food crops due to mining wastes in an irrigation district south of Tbilisi, eastern Georgia *Annals of Agrarian Science*, 2007, vol. 5, no. 3, p. 11–27.

Goering P.L., Waalkes M.P., Klaassen C.D. Handbook of experimental pharmacology, vol. 115. *Toxicology of Metals, Biochemical Effects*. Goyer R.A., Cherian M.G. (Eds.), Springer, New York, 1994, p. 189–214.

Greed I.F., Lane C.R., Serran J.N., Alexander L.C., McLaughlin D.L., Raanan-Kiperwas H., Rains M.C., Rains K.C., Smith L. Enhancing protection for vulnerable waters. *Nat. Geosci*, 2017, vol. 10, no. 11, p. 809–815.

Hu Y., Nan Z. Soil Contamination in Arid Region of Northwest China: Status Mechanism and Mitigation. *Twenty Years of Research and Development on Soil Pollution and Remediation in China*. Luo Y., Tu C. (Eds), Springer, Singapore, 2018, p. 365–374.

Hygienic Standard 2.1.7.2511-09. Approximate permissible concentrations (APC) of chemicals in the soil: *Hygienic standards*. Moscow, Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2009, 10 p.

Jackson T., Macgillivray A. Accounting for cadmium: tracking emissions of cadmium from the global economy. *Chem. Ecol.*, 1995, vol. 11, no. 3, p. 137–181. DOI: 10.1080/ 02757549508039067.

Jarup L. Hazards of heavy metal contamination. *Br. Med. Bull*, 2003, vol. 68, no. 1, p. 167–182.

Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. 4th Edition. Boca Raton, FL: Crc Press, 2010, 548 p.

Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. Atlas pochv Azovo-Chernomorskogo bassejna. [Atlas of the soils of the Azov-Black Sea basin]. Rostov-on-Don, Publishing House of the Southern Federal University, 2015, 80 p. (In Russian)

Kazeev K.SH., Kolesnikov S.I., Akimenko Yu.V., Dadenko E.V. Metody biodiagnostiki nazemnyh ekosistem. [Methods of bio-diagnostics of terrestrial ecosystems]. Rostov-on-Don: Publishing House of the Southern Federal University, 2016, 356 p.

Khan M.A., Khan S., Khan A., Alam M. Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments. *Sci. Total Environ.*, 2017, vol. 601, p. 1591–1605.

Kingsford R.T., Basset A., Jackson L. Wetlands: conservation's poor cousins. *Aquat. Conserv. Mar. Freshwat. Ecosyst.*, 2016, vol. 26, pp. 892–916.

Kolesnikov S.I., Kazeev K.S., Akimenko Y.V. Development of regional standards for pollutants in the soil using biological parameters. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, p. 191–544.

Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Val'kov V.F. Effects of Heavy Metal Pollution on the Ecological and Biological Characteristics of Common Chernozem. *Russian Journal of Ecology*, 2000, vol. 31(3), p. 174–181.

Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Valkov V.F. Ecological Functions of Soils and the Effect of Contamination with Heavy Metals *Eurasian Soil Science*, 2002, no. 12, p. 1335–1340.

Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Val'kov V.F., Tlekhas Z.R. Chemical Contamination of Adygea Soils and Changes in Their Biological Properties. *Eurasian Soil Science*, 2009, vol. 42, no. 12, pp. 1397–1403.

Kolesnikov S.I., Yaroslavtsev M.V., Spivakova N.A. Kazeev K.Sh. Comparative Assessment of the Biological Tolerance of Chernozems in the South of Russia towards Contamination with Cr, Cu, Ni, and Pb in a Model Experiment. *Eurasian Soil Science*, 2013, vol. 46, no. 2, pp. 176–181.

Kolesnikov S.I., Zharkova M.G., Kazeev K.Sh., Kutuzova I.V., Samokhvalova L.S., Naleta E.V., Zubkov D.A. Ecotoxicity Assessment of Heavy Metals and Crude Oil Based on Biological Characteristics of Chernozem. *Russian Journal of Ecology*, 2014, vol. 45, no. 3, pp. 157–166.

Menéndez-Serra M., Triadó-Margarit X., Castañeda C., Herrero J., Casamayor O.E. Microbial composition, potential functional roles and genetic novelty in gypsum-rich and hypersaline

soils of Monegros and Gallocanta (Spain). *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 650, no. 1, p. 343–353.

Nacional'nyj atlas pochv Rossijskoj Federacii [National Atlas of Soils of the Russian Federation]. S.A. Shoba, G.V. Dobrovol'skij, I.O. Alyabin et al., Moscow, AST Publ., 2011, 632 p. (In Russian)

Nan Z.R., Liu X.W., Zhao Z.J., Wang S.L., Yang Y.M., Wang Z.W. Chemical behavior and ecological risk assessment of heavy metals in arid oasis region. Chinese Environmental Science Press, Beijing, 2011.

Otchet o nauchno-proizvodstvennoj deyatel'nosti za 2016 god FGBU «GCAS «Astrahanskij»: otchet NIR [Report on research and production activities for 2016, FSBI «GTSAS «Astrakhansky»: research report] Astrakhan: FGBU» GTSAS «Astrakhansky», 2016. (In Russian)

Pan J., Plant J.A., Voulvoulis N., Oates C.J., Ihlenfeld C. Cadmium levels in Europe: implications for human health. *Environ. Geochem. Health*, 2010, vol. 32, no. 1, p. 1–12.

Sidhu G.P.S., Singh H.P., Batish D.R., Kohli R.K. Tolerance and hyperaccumulation of cadmium by a wild, unpalatable herb *Coronopus didymus* (L.) Sm. (Brassicaceae). *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2017a, vol. 135, p. 209–215.

Tang X., Li Q., Wu M., Lin L., Scholz M. Review of remediation practices regarding cadmium-enriched farmland soil with particular reference to China. *J. Environ. Manag.*, 2016, vol. 181, p. 646–662.

Tudoreanu L., Phillips C.J.C. Modelling cadmium uptake and accumulation in plants. *Adv. Agron.,* 2004, vol. 84, p. 121–157.

Wagner G.J. Accumulation of cadmium in crop plants and its consequences to human health. *Adv. Agron.*, 1993, vol. 51, p. 173–212.

WHO, 2017. *Guidelines for Drinking-water Quality*, 4th Edition Incorporating the First Addendum. World Health Organization, Geneva (License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO).

World Reference Base for Soil Resources. FAO, Rome, 2006, 128 pp.

Wuana R.A., Okieimen F.E. Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. *ISRN Ecology*, 2011, Article ID 402647, 20 p. DOI: 10.5402/2011/402647.

Received 06.05.2019
Revised 10.05.2020
Accepted 25.08.2020

УДК 911.37

А.С. Чучкалов[1], А.И. Алексеев[2]

ВРЕМЯ ОСНОВАНИЯ СЕЛЬСКОГО НАСЕЛЕННОГО ПУНКТА КАК ФАКТОР ЕГО СТАБИЛЬНОСТИ (НА ПРИМЕРЕ ЛЕБЕДЯНСКОГО РАЙОНА ЛИПЕЦКОЙ ОБЛАСТИ)

В историко-географических исследованиях сельского расселения, как и городского, основное внимание обычно обращалось на процессы освоения территории и ее заселение – т. е. образование новых населенных пунктов, а их исчезновение мало кого интересовало. Выявленные нами материалы по Лебедянскому району Липецкой области позволили проследить долговременные тенденции динамики сельского расселения (как единого процесса образования новых поселений и исчезновения старых). В частности, были проанализированы связи между временем основания сельских населенных пунктов (СНП) и их дальнейшей судьбой. Самые «древние» СНП (в нашем случае – основанные в XVII в.) оказались самыми устойчивыми, подавляющее большинство из них сохранилось до наших дней. А чем позже был основан СНП, тем меньше у него было шансов сохраниться. Поэтому сельское расселение района в настоящее время состоит в основном из СНП, образованных в XVII–XVIII вв., а бóльшая часть СНП, возникших позднее (более 2/3), не сохранилась до нашего времени. Составляя 54% от общего числа СНП района, образованные в XVII–XVIII вв. селения сосредотачивают 92% всего населения. Их средняя людность – 347 чел., в то время как у «молодых» СНП (образованных в XIX в. и позже) – 45 чел. Таким образом, наиболее «старые» по времени основания поселения имеют бóльшую людность, гораздо чаще привлекают центральные функции и в целом очень устойчивы. Эту особенность, вероятно, можно интерпретировать как свойство инертности районной системы расселения Лебедянского района, сохранившей неизменной сеть центров расселения почти за четыре столетия.

Ключевые слова: история заселения, рисунок расселения, сельское расселение, Черноземье

Введение. В работах по геоурбанистике стали уже классическими упоминания о том, что многие города стабильно существуют на одном и том же месте, возрождаясь даже после сильных разрушений (пожалуй, самый яркий пример – Рим). И довольно редко упоминается о том, что такой-то город исчез с карты. Обобщающих работ по «экс-городам» практически не было до трудов Г.М. Лаппо [Лаппо, 1997, 2012], который рассмотрел наиболее распространенные причины исчезновения городов или их «разжалования» в села и провел их типологию. О.А. Константинов [Константинов, 1986] рассмотрел судьбы 176 городов, образованных в конце XVIII в. во время административной реформы Екатерины II. Из них 22 города были преобразованы в села до 1860-х гг., еще 30 городов – в 1918–1926 гг.; таким образом, «не удержалось» в ранге города около 1/3 всех возникших во время реформы городов.

Немногочисленные исследования долговременных тенденций развития сельского расселения проводились в основном историками и не касались XX в. [Дегтярев, 1980]. В лучшем случае анализ доводился до 1926 г. [Власова, 1976]. Н.А. Солдатова (2016) ссылается на данные историков о том, что среди современных СНП Вологодской области преобладают СНП, возникшие до середины XVII в. (но не указывается, насколько стабильными были возникшие позже СНП).

В географической литературе, как верно указывает А.А. Ткаченко [Ткаченко, 2018, с. 16], «процесс исчезновения СНП почти не изучался». Но надо отметить, прежде всего, его собственные труды [Ткаченко, 1999, 2018], а также работу Г.В. Иоффе и Г.М. Фингерова [Иоффе, Фингеров, 1987], в которой впервые выявлены этапы исчезновения СНП.

Из географов наиболее подробный анализ развития сельского расселения за длительный период выполнен С.А. Ковалевым [Ковалев, 1953]. Но в конце 1940-х гг., когда выполнялась эта работа, в распоряжении автора самыми последними массовыми статистическими данными были материалы переписи 1926 г., так что коренные преобразования расселения во время коллективизации (и последующего укрупнения колхозов) им не могли быть изучены.

Имеющаяся в распоряжении авторов статистическая база была гораздо обширнее, что позволило поставить задачу: выявление долговременных тенденций динамики сельского расселения (рассматриваемой как единый процесс образования новых селений и исчезновения старых), в том числе влияния времени образования СНП на их устойчивость.

Материалы и методы исследования. Источником информации послужили краткие описания исто-

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра экономической и социальной географии России, студент; *e-mail*: chuchkalov_sashka@mail.ru

[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра экономической и социальной географии России, докт. геогр. н., профессор; *e-mail*: alival@mail.ru

рии СНП из «Лебедянского историко-топонимического словаря» [Кривошеин, 2011], другие местные краеведческие и статистические материалы [Сборник …, 2020; Важинский, 2020 и др.], материалы ревизии 1859 г., учета населения 1880 г. и переписей населения 1897, 1926, 1959, 1970, 1979, 1989, 2002 и 2010 гг. Были составлены динамические ряды числа образованных и упраздненных СНП по 10-летним периодам, их общего количества, средней людности СНП. Составлены карты расселения района на 1859, 1880, 1926, 1989 и 2010 гг. Прослежена история каждого из СНП на даты переписей населения.

Результаты и их обсуждение. ***Образование и исчезновение СНП.*** В настоящее время на территории Лебедянского района находится 88 СНП. За рассматриваемый нами период (XVII – начало XXI вв.) в списках СНП появлялись еще 102 селения, которые к настоящему времени не сохранились. Именно они представляют для нас особый интерес.

Подсчет количества образованных или упраздненных населенных пунктов на протяжении XX–XXI вв. осуществлялся на момент начала десятилетних периодов (с 1900 по 1950 гг.) либо на момент переписей населения (после 1959 г.). Вследствие того, что годы образования/упразднения некоторых населенных пунктов в описаниях указывались приблизительно (например, как в случае формулировки «первая половина XX в.»), вероятность их появления/исчезновения условно считалась равной для всех соответствующих временных промежутков (так, СНП, возникший в первой половине XX в., с равной вероятностью мог появиться и в 1900-е, и в 1930-е гг.).

Приведенные на рис. 1 «минимальные» оценки количества образованных или упраздненных СНП предполагают, что ни один населенный пункт с приблизительным указанием времени появления или исчезновения не был образован/упразднен в течение соответствующего десятилетия. «Максимальные» оценки, наоборот, производились из расчета, что за соответствующее десятилетие были преобразованы все населенные пункты, возможность появления/исчезновения которых допускается авторами. Таким образом, реальное количество возникших или исчезнувших СНП находится в численных пределах между значениями «минимальной» и «максимальной» оценок для соответствующего периода.

При сопоставлении количества появившихся и исчезнувших СНП за различные десятилетия обнаруживается возрастание суммарного количества населенных пунктов на территории района в первой половине XX в. при последовательном сокращении

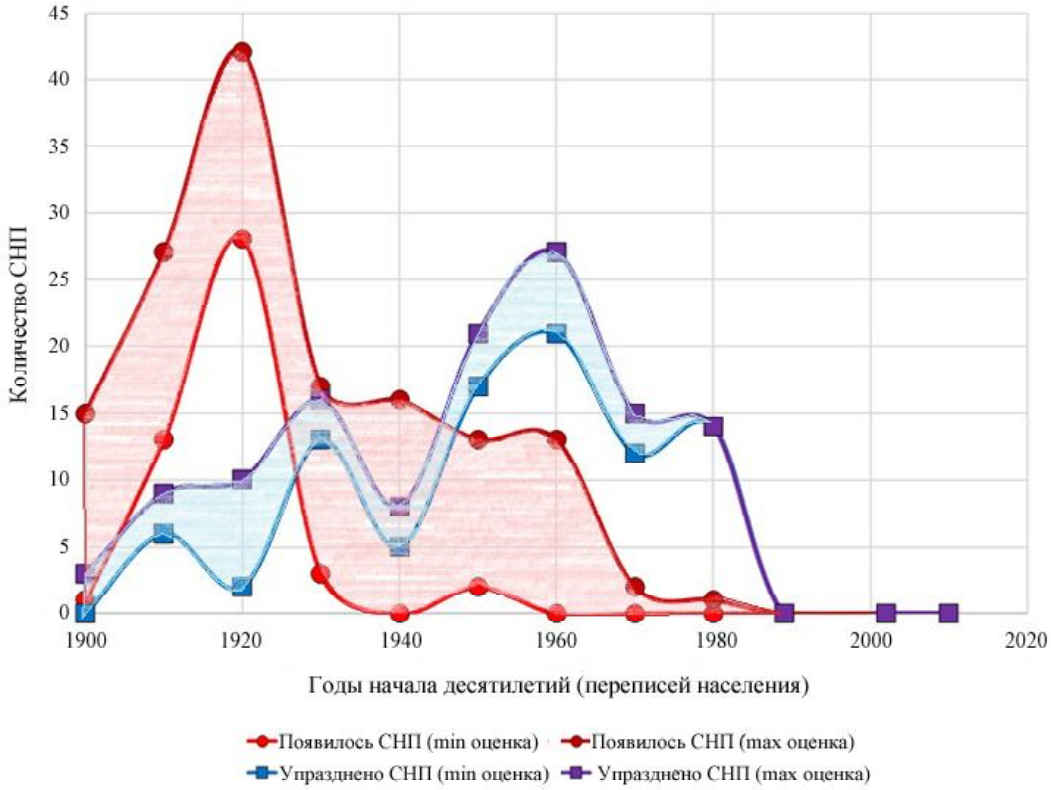

Рис. 1. Динамика количества образованных и упраздненных за соответствующие периоды СНП, расположенных на современной территории Лебедянского района, в 1900–2018 гг. *Примечание*: в качестве дат начала и окончания периодов образования/упразднения СНП рассматривались годы переписей населения 1959–2010 гг., а также 1900, 1910, 1920, 1930, 1940 и 1950 гг. *Источник*: составлено авторами по данным [Барков, Карандеев, 2007; Кривошеин, 2011; Важинский, 2020]

Fig. 1. Dynamics of the number of rural settlements established and eliminated during particular periods of 1900–2018 (within the actual territory of the Lebedyan district). *Note*: as the dates of the beginning and end of the periods of formation / abolition of rural settlement, the years of the census of the population of 1959–2010, as well as 1900, 1910, 1920, 1930, 1940 and 1950 were considered. *Source*: compiled by the authors based on data from [Barkov, Karandeev, 2007; Krivoshein, 2011; Vazhinsky, 2020]

(превышении числа упраздненных СНП над числом возникших) во второй половине XX в.

Возникновение новых населенных пунктов в 1910-е гг. было обусловлено проведением аграрной реформы П.А. Столыпина, в результате которой на территории Лебедянского района образовывались хутора. Заметим, что все появившиеся в это десятилетие хутора исчезли в течение 1930-х гг. вследствие вызванной коллективизацией борьбы с единоличными хозяйствами.

В 1919–1929 гг. отмечается наибольший прирост количества образованных населенных пунктов – это поселки на бывших помещичьих землях. Такая же картина наблюдается и в других районах Черноземного Центра. Так, С.А. Ковалев [Ковалев, 1953, с. 78] приводит данные В.А. Тутыхина: за период 1919–1924 гг. в пределах Орловщины возникло около 1000 новых селений. Но устойчивость их была низкой: на территории нынешнего Лебедянского района из 20 возникших поселков к настоящему времени как самостоятельные населенные пункты сохранились лишь три[3].

Начиная с 1930-х гг., интенсивность появления новых населенных пунктов начала сокращаться. Наибольшее сокращение числа СНП было отмечено на протяжении 1950-х гг., когда преимущественно исчезали деревни и поселки, образованные на протяжении XIX в. и в 1910–1920-е гг. Заметим, что, по крайней мере, из 17 исчезнувших за 1950-е гг. населенных пунктов 13 деревень и поселков прекратили существование по причине отсутствия жителей. Однако в 1968–1976 гг. основной причиной сокращения сети СНП являлось их административное присоединение к ближайшим более крупным селам: из как минимум 21 населенного пункта, исчезнувшего за этот период, лишь шесть деревень и поселков были сселены, остальные же вошли в состав сел – центров колхозов и совхозов. Начиная с 1977 г., основной причиной сокращения сети СНП вновь стало отсутствие в них жителей (из 27 исчезнувших с 1977 г. СНП лишь одна деревня была присоединена к другому населенному пункту).

На рис. 2 показаны границы диапазона (верхняя и нижняя, соответственно), отражающего количество существовавших на современной территории Лебедянского района СНП либо на момент начала десятилетия, либо на момент года переписи населения (начиная с 1959 г.). Наибольшее ко-

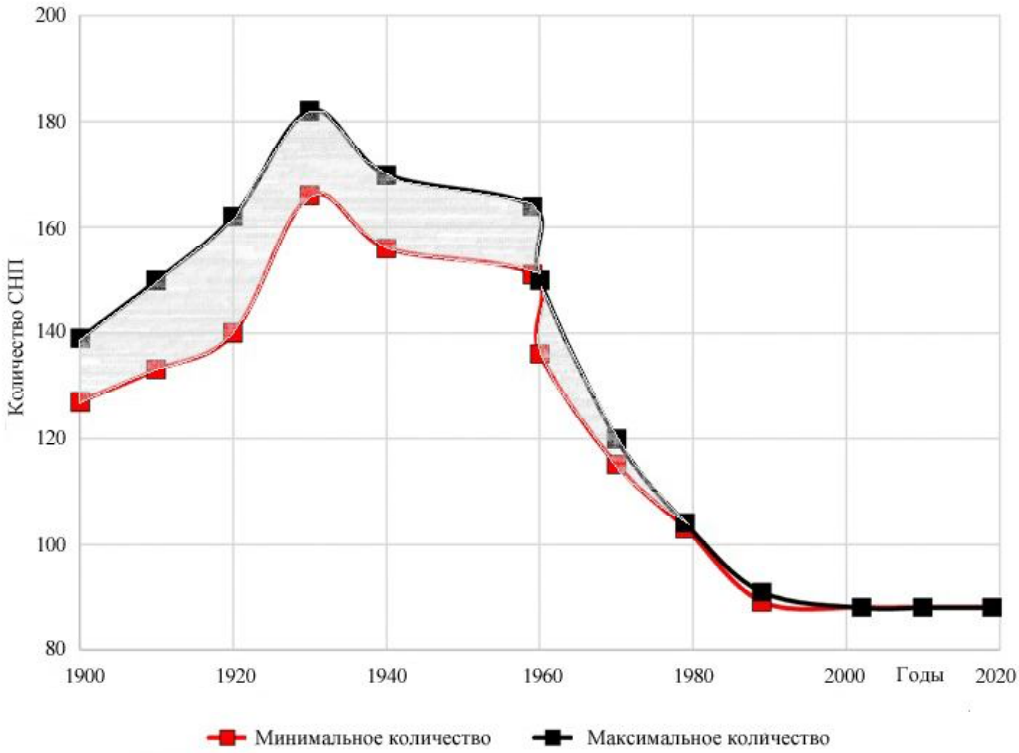

Рис. 2. Динамика количества СНП, расположенных на современной территории Лебедянского района, в 1900–2019 гг.
Источник: см. рис. 1

Fig. 2. Dynamics of the number of rural settlements within the actual territory of the Lebedyan district during 1900–2019

[3] Интересно, что такую же картину выявил М.Р. Мустафин [Мустафин, 1986] для Татарстана: практически все СНП, возникшие на помещичьих землях, быстро исчезли. Одному из авторов настоящей статьи, присутствовавшему на защите его диссертации в Институте географии, запомнилось яркое выступление М.Я. Лемешева, который сказал примерно так: «ну что же вы хотите – ведь помещичьи земли побежали занимать самые неимущие, плохие работники, из которых не получились нормальные хозяева …».

личество населенных пунктов было отмечено в 1930 г., когда «волна образования» новых населенных пунктов уже завершилась, а «волна упразднения» СНП одновременно с формированием колхозов только началась.

Среди населенных пунктов, которые к настоящему времени исчезли, основную массу составляют деревни, поселки и хутора, возникшие в XIX в. и позднее, не имевшие действовавших в какой-либо исторический момент колхозов и совхозов (не бывшие их центральными усадьбами) и не являвшиеся приходскими центрами. Впрочем, присутствуют и исключения. Так, из 102 исчезнувших к настоящему времени СНП (четыре слободы, присоединенные к г. Лебедяни, в расчет не брались), лишь одно село (бывшее село Кузьминки Яблоневского сельсовета) было приходским центром.

Из 49 населенных пунктов (вновь не включая слободы, вошедшие в состав Лебедяни), в которых когда-либо существовали центры колхозов, совхозов или сельскохозяйственных артелей, существуют к настоящему времени 43. Все шесть исчезнувших «колхозных» центров – это села, поселки и деревни, в которых колхозы исчезли еще до 1961 г. и которые к тому же на момент переписи населения 1926 г. не выделялись по численности населения (она не превышала 500 чел.). Все упомянутые населенные пункты расположены в восточной части Лебедянского района (на левобережье Дона).

Кроме того, среди 102 исчезнувших СНП лишь пять деревень и сел имеют первое упоминание на протяжении XVII и XVIII вв. (при общем числе образованных за эти два века селений, равном 57). Таким образом, населенные пункты, являвшиеся ранее приходскими или «колхозными» центрами, либо являвшиеся элементами систем расселения еще на протяжении XVII или XVIII вв., к настоящему времени сохранились в абсолютном большинстве.

Сеть поселений. Развитие расселения на современной территории Лебедянского района за 1859–2010 гг. представлено на рис. 3–5. При составлении картосхем использовались данные о численности населения СНП 1859 г., переписей населения 1926 и 2010 гг. Транспортная сеть на картосхемах отображалась в соответствии с имеющимися

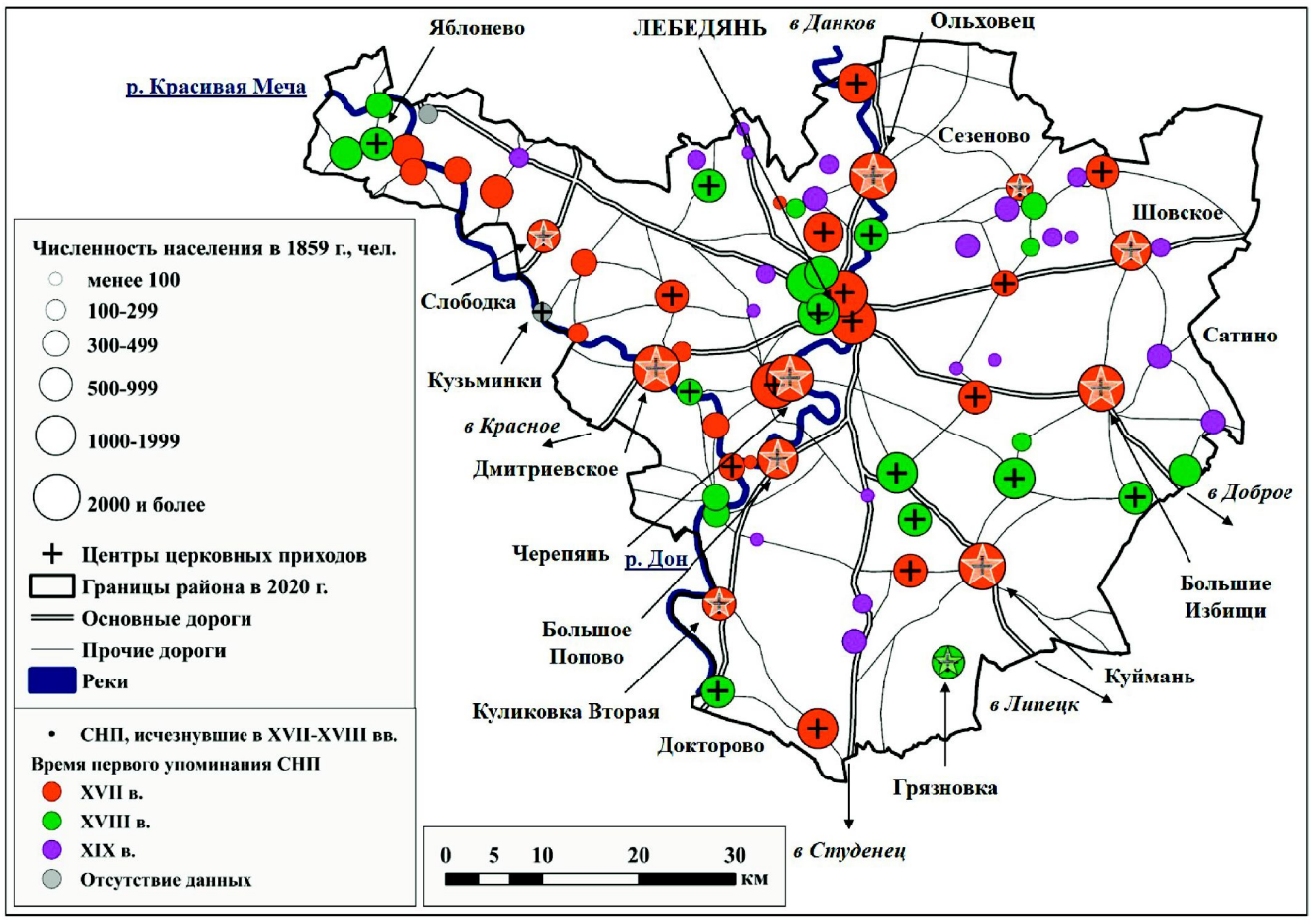

Рис. 3. Расселение на современной территории Лебедянского района в середине XIX в. *Примечание*: знаком пятилучевой звезды обозначены центры волостей на 1891 г. *Источник*: составлено авторами по данным [Кривошеин, 2007; Сборник ..., 2020; Важинский, 2020]

Fig. 3. Settlement pattern within the actual territory of the Lebedyan district in the middle of the 19th century. Note: the five-pointed star denotes the center of the volost in 1891. *Source*: compiled by the authors from [Krivoshein, 2007; Sbornik ..., 2020; Bazhinskii, 2020]

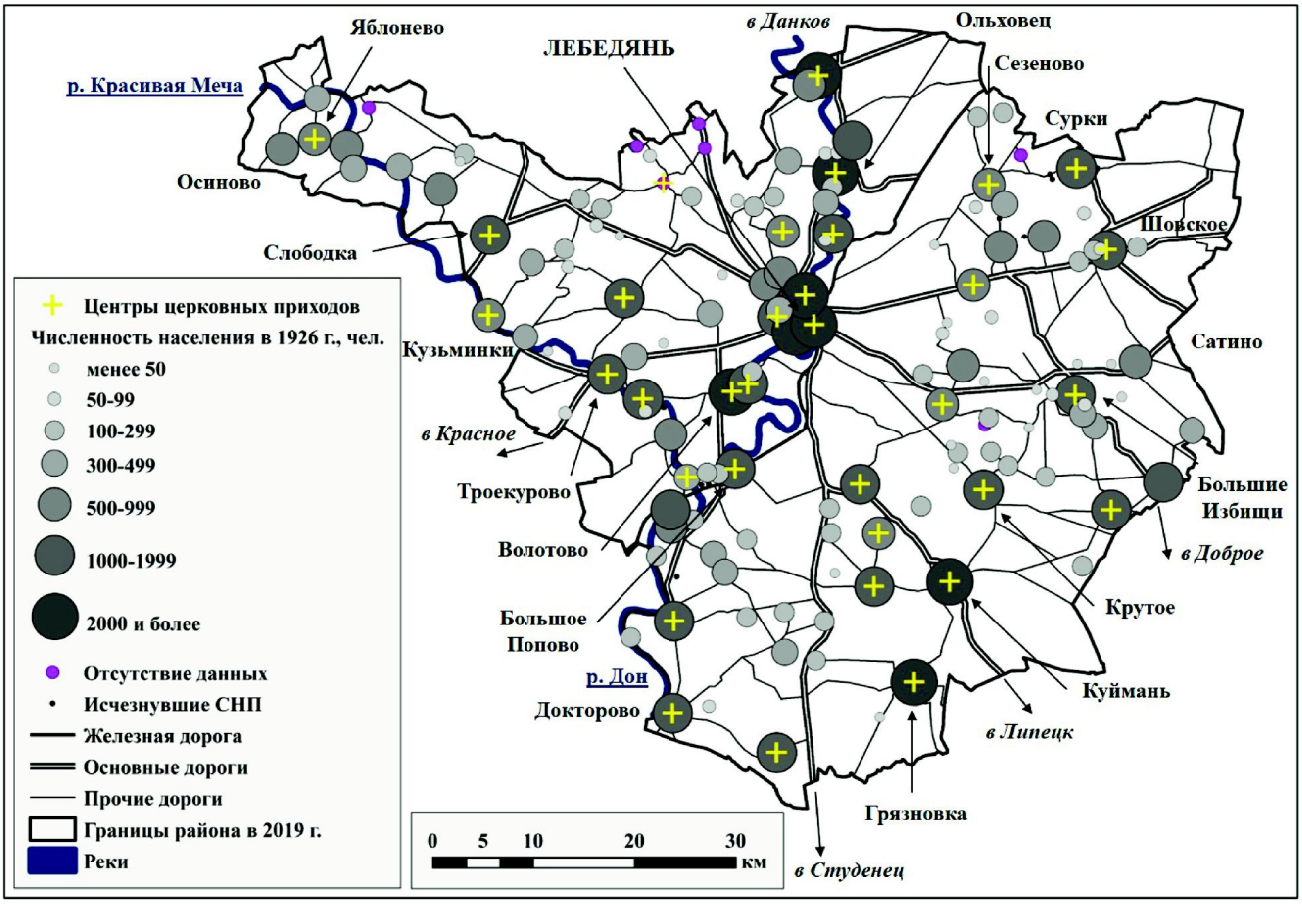

Рис. 4. Расселение на современной территории Лебедянского района в середине 1920-х гг. *Источник*: см. рис. 3

Fig. 4. Settlement pattern within the actual territory of the Lebedyan district in the mid-1920s. *Source*: see fig. 3

в открытом доступе картографическими источниками[4].

Особенность сети поселений Лебедянского района состоит в том, что из-за угрозы набегов крымских татар до XVII в. на этой территории отсутствовали населенные пункты. И только создание Белгородской оборонительной черты (в 1640-е гг.) позволило начать земледельческое освоение. Первые СНП были образованы вдоль рек Дон (на его правом берегу) и Красивая Меча. Кроме того, в направлении с юго-запада на северо-восток протягивается полоса наиболее древних населенных пунктов XVII в. в восточной части района, через которые проходили основные транспортные пути (уже защищенные Белгородской чертой, между реками Дон и Воронеж). Позже, в XVIII в., было заселено и левобережье. Именно эти СНП оказались самыми устойчивыми – почти все они сохранились до наших дней.

К сожалению, из-за отсутствия нужного картографического материала невозможно составить карты расселения для XVII–XVIII вв. Но на карте 1859 г. хорошо видно, что правобережье Дона имеет гораздо бóльшую густоту СНП (и более высокую плотность населения), чем левобережье, где основная часть СНП возникала в XIX–XX вв.

Процесс образования новых СНП резко ускорился в результате отмены крепостного права (1861 г.) и Столыпинской реформы (после 1906 г.). Максимальные значения числа СНП и численности сельского населения наблюдались в 1926 г. (см. рис. 4), когда густота СНП на левобережье практически сравнялась с правобережьем.

Общеизвестно, что Центральное Черноземье в конце XIX – начале XX вв. испытывало острый экономический кризис, вызывавший отток сельского населения. Откуда же появлялись жители новых СНП? Как показано в работе С.А. Ковалева [Ковалев, 1953], главным источником населения для новых СНП (которые образовывались, в основном, на водоразделах) были старые долинные СНП. Но степень их участия в заселении новых населенных пунктов сильно различается в пределах Черноземья. Так, в Орловской области (самой мелкоселенной) доля населения в новых СНП – более 70%. А вдоль Белгородской черты эта доля колеблется почти от нуля

[4] А именно, в соответствии с картой Европейской России и Кавказского края 1862 г., картой востока Европейской части России Стрельбицкого 1871 г., военно-дорожной картой Европейской России 1888–1910 гг., картой Лебедянского уезда 1914 г., топографической картой Липецкой области 2001 г., автомобильным атласом Липецкой области 2015 г.

до 20%, и здесь «отчетливо сохранился древний рисунок расселения» с наиболее крупными селами [Ковалев, 1953, с. 81]. Новые села имели гораздо меньшую людность – и это было одной из причин (если не главной) того, что они потом гораздо быстрее ликвидировались.

Начиная с 1930-х гг., процессы исчезновения СНП стали преобладать над процессами их образования. Подавляющее большинство исчезнувших населенных пунктов составляют деревни, возникшие в XIX и XX вв., и появившиеся в 1920-х гг. поселки. Поэтому карта расселения 2010 г. гораздо больше похожа на карту 1859 г., чем на карту 1926 г.: видны резкие различия между густозаселенной западной частью района и «обезлюдевшей» восточной.

Таким образом, восточная часть территории Лебедянского района, которая осваивалась позднее западной, характеризуется более интенсивным сокращением небольших по людности СНП. Указанную особенность, вероятно, можно интерпретировать как *свойство инертности районной системы расселения Лебедянского района*, почти сохранившей неизменной сеть центров расселения еще с XVII–XVIII вв.

Почему же восточная часть Лебедянского района заселялась позднее, и СНП там были гораздо менее крупными? У историков и краеведов нет однозначного ответа на этот вопрос. Можно высказать осторожную гипотезу, что это обусловлено природными условиями. Сильно расчлененная оврагами и балками западная часть Лебедянского района представляет собой отроги Среднерусской возвышенности, а более низменная восточная часть – переходная между Среднерусской возвышенностью и Окско-Донской равниной, и для нее менее характерно неглубокое залегание карбонатных пород. Исходя из этого, выщелоченные черноземы восточной части Лебедянского района являются менее плодородными в сравнении с черноземными и дерново-карбонатными почвами западной части.

Факторы устойчивости поселений. Рассмотрим, какие характеристики СНП оказывают влияние на их дальнейшую судьбу. Одна из них – наличие центральных функций, пусть даже и исчезнувших впоследствии. Яркий пример – наличие церковных приходов. Как известно, большинство церквей было закрыто еще в 1920–1930-х гг. (а почти все оставшиеся – во времена Н.С. Хрущева). Но наличие этих

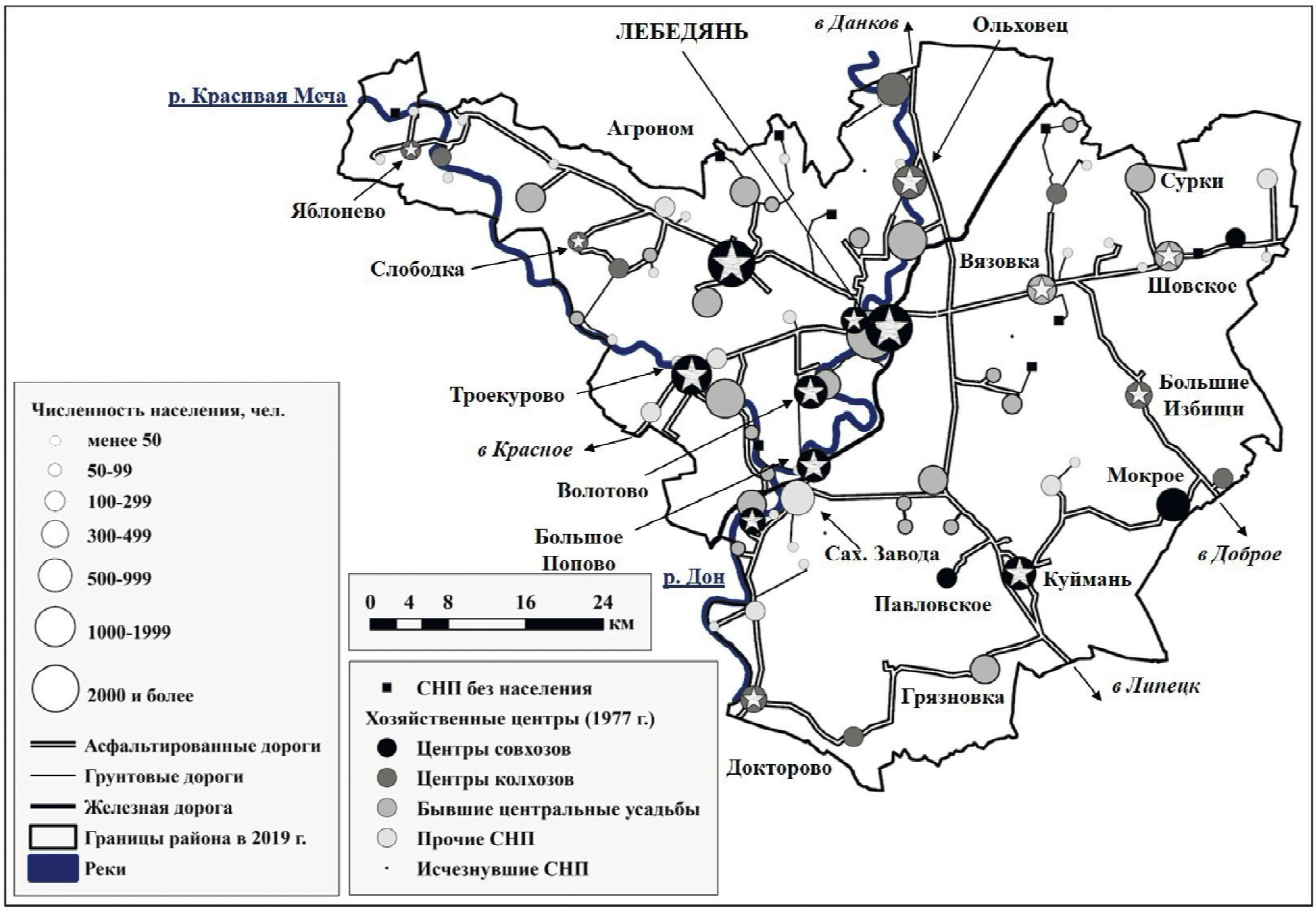

Рис. 5. Расселение на современной территории Лебедянского района в 2010 г. *Примечание*: знаком белой пятилучевой звезды обозначены населенные пункты – центры сельсоветов. *Источник*: составлено авторами по [Кривошеин, 2011]

Fig. 5. Settlement pattern within the actual territory of the Lebedyan district according to 2010 data. Note: the white five-pointed star indicates the settlement – the ctnter of the village councils. Source: compiled by the authors after [Krivoshein, 2011]

функций в прошлом оказало влияние на «колхозное строительство»: 34 из 35 центров церковных приходов с началом коллективизации являлись центральными усадьбами колхозов.

Время образования СНП, как выяснилось, также имеет влияние на его будущую историю. Вначале это проявилось в 1930-х гг. Из 34 СНП, образованных в XVII в., центры колхозов появились в 29 (в 80% случаев). Из 23 СНП, образованных в XVIII в. – в 16 (70%). Из 55 СНП, возникших в XIX в. – только в 8 (14%). А из 44 СНП, образованных в XX в. (по состоянию на 1926 г.) – только в двух (около 4%). Конечно, *влияние оказывал не возраст сам по себе, а, прежде всего, численность населения, которая в «старых» СНП была гораздо выше*.

«Возраст» СНП повлияло и на устойчивость хозяйственных центров. Неоднократные укрупнения колхозов и совхозов привели к тому, что их число сократилось в три раза. При этом, если из 29 центральных усадеб колхозов и совхозов, находящихся в СНП, основанных в XVII в., к 1961 г. сохранила статус таковых примерно половина населенных пунктов (14 из 29), то преобладающая часть центральных усадеб в появившихся в XVIII и XIX вв. населенных пунктах уже к 1961 г. прекратила существование (лишь пять из 17 населенных пунктов XVIII в. и один из 8 населенных пунктов XIX в. сохранили статус центров колхозов или совхозов).

Обобщающую характеристику истории СНП в зависимости от их возраста дает приведенная таблица. Если количество населенных пунктов, существовавших еще в XVII в., почти не изменилось за период с 1859 по 2010 гг., то число появившихся в XIX в. населенных пунктов с 1926 по 2010 гг. сократилось более чем в 3 раза. Их средняя людность в 2010 г. (около 19 чел. без учета СНП без населения) заметно уступает средней людности деревень, сел и поселков, возникших до начала XIX в. В то же время за весь период с середины XIX в. до настоящего времени крупнейшими неизменно оставались населенные пункты, возникшие в XVII в., средняя людность которых в 2010 г. составляла 402 чел.

Заметим, что в целом (за исключением категории населенных пунктов, возникших в 1900–1920-е гг.), выполняется эмпирическое «правило»: *чем «моложе» СНП, объединенные в категории по принципу единства времени их возникновения, тем меньшие значения составляет их средняя людность*. Указанная закономерность справедлива для всех годов с отмеченными значениями людности СНП (1859, 1880, 1926, 1989, 2002 и 2010 гг.).

Выводы:

– традиционное изучение процесса заселения территории и образования новых СНП было нами дополнено исследованием процессов их исчезновения. Это позволило рассмотреть развитие расселения как единый процесс образования/отмирания селений. Имеющиеся материалы дали возможность рассмотреть этот процесс почти за четыре столетия (1640–2010-е гг.);

– особенность исследованной территории (Лебедянский район Липецкой области) состоит в том, что несколько веков она была частью «Дикого поля», и образование постоянных селений началось лишь после 1640-х гг., когда была построена Белгородская оборонительная черта. Под ее защитой уже в XVII в. образуются первые 34 СНП, и еще 23 – в XVIII в. Сейчас в этих селениях, составляющих немногим более половины всех СНП района, сосредоточено 92% всего населения. А их средняя людность – 347 чел., в то время как у «молодых» СНП (образованных в XIX в. и позже) – 45 чел;

– среди 102 исчезнувших населенных пунктов района лишь пять деревень и сел имеют первое упоминание на протяжении XVII и XVIII вв. (при общем числе образованных за эти два века селений – 57). Селения, образованные в XIX – первой половине XX вв., обладали гораздо меньшей устойчивостью. Среди населенных пунктов, которые к настоящему времени исчезли, основную массу составляют деревни, поселки и хутора, возникшие в XIX в. и позднее, не имевшие действовавших в какой-либо исторический момент колхозов и/или совхозов и не являвшиеся приходскими центрами;

– наличие центральных функций, пусть даже и исчезнувших впоследствии, оказывает влияние на судьбы СНП. Из 35 существовавших в начале XX в. церковных приходов в 34 с началом коллективизации были образованы центры колхозов (хотя боль-

Таблица

Характеристики сельских населенных пунктов Лебедянского района в зависимости от времени их возникновения

Время возникновения СНП	Количество сельских населенных пунктов						Средняя людность, чел.					
	1859	1880	1926	1989	2002	2010	1859	1880	1926	1989	2002	2010
Существовали в XVII в.	34	34	34	30	30	30	1109	1053	1229	435	420	402
XVIII в.	23	23	23	19	19	18	712	744	1017	276	290	270
XIX в.	22	46	55	21	21	17	180	155	199	27	18	19
1900–1910	–	–	14	3	3	3	–	–	110	40	30	28
1920-е	–	–	30	10	10	9	–	–	116	110	98	111
1930–1950-е	–	–	–	15	11	11	–	–	–	4	2	1
Нет точных данных	–	–	5	–	–	–	–	–	36	–	–	–

Источник: составлено авторами по [Барков, Карандеев, 2007; Кривошеин, 2011; Сборник ..., 2020; Важинский, 2020].
Примечание: расчеты средней людности населенных пунктов произведены без учета численности населения поселков Агроном и Сахарного Завода, возникших в 1920-е и 1930-е гг. и отчасти обладающих промышленной специализацией.

шинство церквей к тому времени было закрыто). Конечно, скорее всего, здесь сыграло роль не наличие в прошлом такого центра, а то, что сами эти центры образовывались в наиболее крупных селах (а наличие приходского центра – это своего рода маркер). «Возраст» СНП повлиял и на устойчивость «колхозных» центров;

– самые ранние по времени образования СНП (основанные в XVII–XVIII вв.) сохранились почти полностью на протяжении всех четырех столетий, в то время как более «молодые» в основном исчезли. Поэтому картина расселения района 2010 г. гораздо больше похожа на ситуацию 1859 г. (до того, как начались бурные процессы создания новых СНП), чем на ситуацию 1926 г. (когда отмечалась максимальная густота селений). Можно сказать, что расселение района, сложившись в XVII–XVIII вв., претерпело в конце XIX – начале XX вв. период взрывного расширения, но эти изменения оказались эфемерными: более 2/3 новых СНП не дожило до наших дней. По выражению С.А. Ковалева [Ковалев, 1953, с. 81], на подобных территориях Центрального Черноземья «отчетливо сохранился древний рисунок расселения»;

– итоговый вывод: *наиболее «старые» по времени основания селения имеют бóльшую людность, гораздо чаще привлекают центральные функции и в целом очень устойчивы. Этот вывод сделан нами для условий именно исследованного района* (*и, вероятно, верен для похожих районов Центрального Черноземья*). *Выявление ситуации в других районах России – дело дальнейших исследований*.

Благодарности. Сбор материала, его обработка и анализ выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 18-05-00394).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Барков Р.Н., Карандеев Ю.Т. География Лебедянского района: учеб. пособие. Липецк: ЛГПУ, 2007. 136 с.

Власова И.В. Сельское расселение в Устюжском крае в XVIII – первой четверти XX в. М.: Наука, 1976. 118 с.

Дегтярев А.Я. Русская деревня в XV–XVII веках. Очерки истории сельского расселения. Л.: Изд-во ЛГУ, 1980. 176 с.

Иоффе Г.В., Фингеров Г.М. Сельское хозяйство и рекреация: вопросы взаимоотношений. Территориальная организация хозяйства как фактор экономического развития / Сб. науч. труд. М.: Институт географии АН СССР, 1987. С. 122–138.

Ковалев С.А. География сельских населенных пунктов в областях Черноземного Центра // Вопросы географии. 1953. Сб. 32. С. 66–116.

Константинов О.А. Место городов, образованных в конце XVIII в., в современных системах расселения СССР // Вопросы географии. 1986. Сб. 129. С. 146–156.

Кривошеин Н.В. Лебедянский историко-топонимический словарь. М.: Древлехранилище, 2011. 146 с.

Лаппо Г.М. География городов: учеб. пособие. М.: Гуманитар. изд. центр «ВЛАДОС», 1997. 478 с.

Лаппо Г.М. Города России. Взгляд географа. М.: Новый хронограф, 2012. 503 с.

Мустафин М.Р. Исторические изменения структуры сельского расселения Татарии за период 1859–1984 гг.: автореф. дис. … кан. геогр. наук. М., 1986.

Солдатова Н.А. Трансформация системы сельского расселения Вологодской области // Вопросы географии. 2016. Сб. 141. С. 338–357.

Ткаченко А.А. О сокращении числа сельских поселений. Доклады и сообщения 7 российской юбилейной научно-практической конференции «Сельская Россия: прошлое и настоящее» (Тула, 26–28 ноября 1999 г.). 1999. С. 84–86.

Ткаченко А.А. О реальном и номинальном количестве сельских населенных пунктов в современной России // Известия Русского географического общества. 2018. Т. 150. № 2. С. 15–24.

Электронные ресурсы

Важинский В.М. Сельские поселения Липецкого края в XVII веке / Липецкий сайт. URL: https://lipetsky.ru/articles/218-selskie-poselenija-lipeckogo-kraja-v-xvii-veke-v-m-vazhinskii-lipeck.html (дата обращения 01.06–17.08.2020).

Сборник статистических сведений по Тамбовской губернии / Электронная библиотека Тамбовской области. URL: https://elibrary.tambovlib.ru/?ebook=325#n=109 (дата обращения 01.06–17.08.2020).

Поступила в редакцию 19.08.2020
После доработки 24.08.2020
Принята к публикации 25.08.2020

A.S. Chuchkalov[1], A.I. Alekseev[2]

FOUNDATION TIME OF A RURAL SETTLEMENT AS A FACTOR OF ITS STABILITY (CASE STUDY OF THE LEBEDYAN DISTRICT, LIPETSK REGION)

Historical and geographical studies of rural settlement, as well as urban one, usually focused on the processes of territory development and settlement, i.e. on the formation of new settlements, while their disappearance was of little interest. The materials we revealed for the Lebedyan district of the Lipetsk region of Russia made it possible to trace the long-term trends in the dynamics of rural settlement as a

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Economic and Social Geography of Russia, student; *e-mail*: chuchkalov_sashka@mail.ru

[2] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Economic and Social Geography of Russia, Professor, D.Sc. in Geography; *e-mail*: alival@mail.ru

uniform process of new settlements formation and the disappearance of old ones. In particular, we analyzed the links between the foundation time of rural settlements and their future. The most «ancient» rural settlements which in our case were founded in the 17th century, turned out to be the most sustainable; the vast majority of them have survived to this day. The later the rural settlement was founded, the less chance it had to survive. Therefore, the present-day rural settlements of the district are mainly those established during the 17th–18th centuries, while more than 2/3 of the settlements that came into existence later have not survived to our time. Settlements formed in the 17th–18th centuries account for 54% of the total number of rural settlements in the district and concentrate 92% of the total population. Their average population is 347 people, while that of «young» settlements established in the 19th century and later is 45 people. Thus, the oldest settlements are more populous, much more often attract central functions and are generally very sustainable. This is probably due to the inertness of the settlement system of the Lebedyan district, where the network of settlement centers remained unchanged for almost four centuries.

Key words: settlement history, settlement pattern, rural settlement, Chernozem zone

Acknowledgements. Collection of material, its processing and analysis were financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-05-00394).

REFERENCES

Barkov R.N., Karandeev Yu.T. Geografiya Lebedyanskogo raiona [Geography of Lebedyansky District], Lipetsk, Lipetsk St. Pedagogical Univ. Publ., 2007, 136 p. (In Russian)

Vlasova I.V. Sel'skoe rasselenie v Ustyuzhskom krae v XVIII – pervoi chetverti XX v. [Rural settlement in the Ustyuzhsky region in the 18th – first quarter of the 20th century], Moscow, Nauka Publ., 1976, 118 p. (In Russian)

Degtyarev A.Ya. Russkaya derevnya v XV–XVII vekakh. Ocherki istorii sel'skogo rasseleniya [Russian village in the 15th–17th centuries. Essays on the history of rural settlement], Leningrad, Leningrad St. Univ. Publ., 1980, 176 p. (In Russian)

Ioffe G.V., Fingerov G.M. [Agriculture and Recreation: Relationship Issues], *Territorial'naya organizatsiya khozyaistva kak faktor ekonomicheskogo razvitiya*. Sbornik nauchnykh trudov [Territorial organization of the economy as a factor of economic development], Moscow, Inst. of Geography, USSR Academy of Sciences Publ., 1987, p. 122–138. (In Russian)

Kovalev P.A. Geografiya sel'skikh naselennykh punktov v oblastyakh Chernozemnogo Tsentra [Geography of rural settlements in the regions of the Chernozem Center], *Voprosy geografii*, 1953, no. 32, p. 66–116. (In Russian)

Konstantinov O.A. Mesto gorodov, obrazovannykh v kontse XVIII v., v sovremennykh sistemakh rasseleniya SSSR [The place of cities and towns, formed at the end of the 18th century, in current settlement systems of the USSR], *Voprosy geografii*, 1986, no. 129, p. 146–156. (In Russian)

Krivoshein N.V. Lebedyanskii istoriko-toponimicheskii slovar' [Lebedyan historical and toponymic dictionary], Moscow, Drevlekhranilische Publ., 2011, 146 p. (In Russian)

Lappo G.M. Geografiya gorodov [Geography of cities]. Moscow, Humanitarian Publ. Center «VLADOS», 1997, 478 p. (In Russian)

Lappo G.M. Goroda Rossii. Vzglyad geografa. [Cities of Russia. Geographer's View], Moscow, Novyi Khronograf Publ., 2012, 503 p. (In Russian)

Mustafin M.R. Istoricheskie izmeneniya struktury sel'skogo rasseleniya Tatarii za period 1859–1984 gg. [Historical changes in the structure of rural settlement in Tatarstan for the period 1859–1984], Extended Abstract of PhD Thesis in Geography, Moscow, 1986. (In Russian)

Soldatova N.V. Transformaciya sistemy' sel'skogo rasseleniya Vologodskoj oblasti [Transformation of the Rural Settlement System: A Case Study of Vologda Oblast] *Voprosy geografii*, 2016, no. 141, p. 338–357. (In Russian)

Tkachenko A.A. [About reduction in the number of rural settlements], *Doklady i soobscheniya 7 rossiiskoi yubileinoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sel'skaya Rossiya: proshloe i nastoyaschee»* [Proc. of the Conference «Rural Russia: past and present»], 1999, p. 84–86. (In Russian)

Tkachenko A.A. O real'nom i nominal'nom kolichestve sel'skikh naselennykh punktov v sovremennoi Rossii [About real and nominal numbers of rural settlements in modern Russia], *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*, 2018, vol. 150, no. 2, p. 15–24. (In Russian)

Web sources

Vazhinskii V.M. Sel'skie poseleniya Lipetskogo kraya v XVII veke [Rural settlements of the Lipetsk region in the 17th century], Lipetskii sait [Lipetsk site], URL: https://lipetsky.ru/articles/218-selskie-poselenija-lipeckogo-kraja-v-xvii-veke-v-m-vazhinskii-lipeck.html (access date 01.06-17.08.2020). (In Russian)

Sbornik statisticheskikh svedenii po Tambovskoi gubernii [Collection of statistical information on the Tambov province], Elektronnaya biblioteka Tambovskoi oblasti [Electronic library of the Tambov region], URL: https://elibrary.tambovlib.ru/?ebook=325#n=109 (access date 01.06–17.08.2020). (In Russian)

Received 19.08.2020
Revised 24.08.2020
Accepted 25.08.2020

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 911.2:556.5

В.Г. Маргарян[1], Н.Л. Фролова[2]

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЗИМНЕГО МИНИМАЛЬНОГО ДЕКАДНОГО СТОКА РЕК БАССЕЙНА ОЗЕРА СЕВАН В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

В работе обсуждаются результаты анализа изменчивости зимних минимальных декадных расходов воды для 12 постов, имеющих наиболее длинный ряд наблюдений на реках, впадающих в озеро Севан.

На основе статистического анализа определены значения норм зимних минимальных декадных расходов рек, коэффициентов вариации (C_v) и асимметрии (C_s), построены кривые обеспеченности минимальных расходов воды рек, проведен анализ пространственной и временной изменчивости исследуемых гидрологических характеристик.

Для расчета стока неизученных рек получены корреляционные зависимости между величиной расхода воды и площадью водосбора. Построена карта распределения модуля среднего минимального зимнего стока за декаду.

Исследования показывают, что для зимних минимальных декадных расходов воды рек бассейна озера Севан характерно очень неравномерное пространственное распределение. Для изучаемой территории рассматриваемые характеристики колеблются в среднем от 0,049 до 2,63 м^3/сек (от 1,15 до 5,63 л/(с км^2). Наибольший зимний минимальный декадный расход рек бассейна озера составляет 3,81 м^3/сек, а наименьший – 0,006 м^3/сек. На отдельных реках бассейна озера с малой площадью водосбора и относительно большой высотой за счет незначительного грунтового питания и низких температур воздуха в зимний период характерно явление отсутствия стока за счет перемерзания.

Временная изменчивость стока рассматриваемых рек невелика. Коэффициент вариации (изменчивости) зимних минимальных декадных расходов составляет 0,14–0,63. Для большинства рек бассейна озера Севан наблюдается тенденция роста зимних минимальных декадных расходов, что обусловлено ростом средней температуры воздуха и увеличением количества осадков за зимний период.

Ключевые слова: меженный сток, характеристики стока, потепление, Армения

Введение. В зимний период года реки в основном переходят на питание подземными водами, величина стока за этот период составляет от 5 до 24% от его годового значения. Период зимней межени является дефицитным для многих видов водопользования. Удовлетворение потребностей ирригации, водоснабжения, гидроэнергетики, водного транспорта и рекреации во многом лимитировано низкой водностью рек. В этих условиях снижается надежность работы предприятий гидроэнергетики, речного транспорта, коммунального хозяйства. Знание минимального стока необходимо для эффективного управления водными ресурсами, решения экологических проблем, проектирования и функционирования гидротехнических сооружений и т. д. [Алексеевский, Фролова, 2011; Kireeva et al., 2016]. Особую актуальность исследования и расчеты стока для сезонных и многолетних маловодных периодов приобретают для уникальных водных объектов, каким является озеро Севан.

Озеро Севан – крупнейший высокогорный пресноводный водоем Южного Кавказа, характеризуемый нарушенным биотическим балансом. Трудно переоценить значение для Армении этого водоема, который одновременно является хранилищем стратегического запаса пресной воды, ресурсом для гидроэнергетики и орошения, объектом культурного наследия, туризма и рекреации, источником ценной рыбной продукции, крупным водохозяйственным комплексом регионоформирующего воздействия [Матишов и др., 2019].

В настоящее время для Республики Армении продолжает оставаться актуальной проблема восстановления экосистемы озера Севан после длительного регулирования его уровня. Результаты работы могут быть полезны для описания механизмов использования водных ресурсов и развития природно-хозяйственных комплексов оз. Севан, оценки водно-ресурсного и водно-экологического потенциалов территории с элементами прогноза изменений при реализации возможных видов использования; определения приоритетных направлений и целей экологически обоснованного водопользования и водопотребления на водосборе как основы для сохранения/

[1] Ереванский государственный университет, географический и геологический факультет, кафедра физической географии и гидрометеорологии, доцент, канд. геогр. н.; *e-mail*: *vmargaryan@ysu.am*

[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, зав. кафедрой, докт. геогр. н., профессор; *e-mail*: *frolova_nl@mail.ru*

улучшения качества и количества вод. Особый интерес представляют условия формирования водных ресурсов в маловодный (зимний и летне-осенний) период года.

Вопросы минимального стока рек Армении рассматривались в работах Л.Р. Варданяна и Л.В. Азизяна [Варданян, Азизян, 2014], М.В. Шагиняна и Б.П. Мнацаканяна [Шагинян, Мнацаканян, 1982], В.Г. Марганяна [Маргарян и др., 2018], З.З. Мурадяна, [Мурадян, 2014], Т.Г. Варданяна [Варданян, 1991] и др. Однако, в Армении специализированных научных работ по изучению зимнего минимального декадного стока рек до сих пор не было.

Таким образом, целью данного исследования является оценка пространственно-временных закономерностей изменения зимних средних декадных минимальных расходов воды рек, впадающих в озеро Севан, с учетом наблюдающихся климатических изменений и хозяйственной деятельности в бассейне озера.

Материалы и методы исследования. В качестве исходных данных в работе использованы материалы многолетних наблюдений за расходами воды за период со дня открытия станции до 2018 г., опубликованные в соответствующих выпусках «Гидрологических ежегодников» (данные «Службы по гидрометеорологии и активному воздействию на атмосферные явления» МЧС Республики Армении). Отметим, что с течением времени изменилось как количество наблюдаемых рек, так и число расположенных на них гидрологических постов. Так, на изучаемой территории в разные годы действовали 41 метеорологическая станция, 39 гидрологических постов, а в настоящее время действуют всего 7 метеорологических станций и 12 гидрологических постов.

Как на реках республики, так и на реках изучаемой территории минимальные расходы воды наблюдаются в периоды летне-осенней и зимней межени. Для характеристики водности определяются средний суточный, срочный, средний за декаду с наиболее низкой водностью, средний месячный, средний за весь меженный период расходы воды. В настоящей работе для анализа используется средний за декаду с наиболее низкой водностью расход воды (или далее минимальный декадный сток (расход)) в течение зимнего маловодного периода. Именно эта характеристика нашла широкое применение во многих водохозяйственных организациях Армении для проведения различных гидрологических расчетов.

Представленные в работе карты построены с помощью пакета QGIS 3.10. Статистическая обработка данных проводилась с помощью пакетов Statistica и Excel.

Краткая физико-географическая характеристика бассейна озера Севан. Бассейн Севана, который расположен между Малым Кавказом и Армянским вулканическим нагорьем, имеет сложную геологическую структуру, разные формы рельефа с пестротой переобработанных форм. По особенностям геологической структуры бассейн озера делится на две части: северо-восточную, принадлежащую складчато-глыбовым областям Армении, и юго-западную, составляющую часть Армянского вулканического нагорья. В юго-западной части имеют широкое распространение сильно пористые и водопроницаемые породы с трещинами, а в высокогорных районах – чингилы, которые выполняют роль регулятора для питания рек. Северо-восточная часть бассейна выделяется отсутствием более или менее крупных источников, наличием множества маленьких притоков, характерны селевые стоки. Почти все выпавшие здесь осадки по склону текут в ручьи или сразу в озеро. Многие из рек в период маловодья не достигают озера [Экология …, 2010; Физическая …, 1971].

В озеро Севан впадают 28 рек и два крупных подземных источника, на 24 из них в разные годы проводились наблюдения за уровнем и расходами воды. Большая часть рек бассейна имеет незначительную длину и площадь водосбора. В бассейне насчитывается 930 рек длиной до 10 км. Сравнительно крупные реки, площадь бассейна которых больше 100 км^2, – Масрик, Карчахпюр, Варденис, Аргичи, Бахтак, Гаварагет (табл. 1).

Реки бассейна в основном имеют смешанное питание: снеговое, дождевое и подземное [Маргарян, Варданян, 2011]. Причем из-за значительного разнообразия геологических, в особенности гидрогеологических, условий источники питания рек сильно различаются. Питание рек, берущих начало с Гегамских и Варденисских гор вулканического происхождения, преимущественно подземное (60–80%), а питание рек, берущих начало с Арегунийского и Севанского горных хребтов складчато-глыбового происхождения, в основном происходит талыми и дождевыми водами (60–70%). Реки только с дождевым питанием, за исключением некоторых, имеющих временный сток, отсутствуют. Водосборным бассейнам, имеющим благоприятные условия для просачивания, характерно подземное питание. Преимущественно подземное питание имеют реки Масрик, Карчахбюр, Цаккар, Гаварагет, исключительно подземное – Личк [Гидрография …, 1981].

На изучаемой территории речная сеть отличается неравномерным распределением, средняя плотность составляет 0,77 км/км^2. Густой гидрографической сетью выделяется бассейн Большого Севана, в особенности его южная и юго-западная части. Здесь протекают все сравнительно большие реки. В бассейне имеются также протяженные территории, где нет поверхностного стока: например, участок от Гаварагета до истоков реки Раздан. Здесь распространены молодые вулканические породы, которые имеют сильные трещины и водопроницаемость, из-за которых атмосферные осадки почти полностью просачиваются и не преобразуются в поверхностный сток (рис. 1) [Экология …, 2010].

Результаты и обсуждение. Как правило, после весенне-летнего половодья в бассейнах рек, впадающих в озеро Севан, как и в других регионах республики, начинается период межени, который про-

Таблица 1

Основные гидрографические характеристики рек и их водосборов бассейна озера Севан

Река – пункт	Расстояние от устья, км	Длина реки, м	Уклон реки от наиболее удаленной точки, ‰		Основные характеристики водосбора		
			средний	средневзвешенный	площадь, км^2	средняя высота, м	Средний уклон, ‰
Р. Дзыкнагет – п. Цовагюх	1,0	22,0	34	30	82,6	2220	211
Р. Драхтик – п. Драхтик	0,8	11,2	51	43	39,2	2270	246
Р. Памбак – п. Памбак	1,8	10,0	104	92	20,4	2540	433
Р. Масрик – п. Цовак	2,8	45,0	27	16	673	2310	158
Р. Карчахпюр – п. Карчахпюр	1,1	26,0	54	49	116	2650	174
Р. Ваденис – п. Варденик	4,1	28,0	48	44	117	2680	279
Р. Мартуни – п. Геховит	7,2	27,0	60	46	84,5	2760	285
Р. Аргичи – п. Геташен	6,0	51,0	14	8	366	2470	144
Р. Цахкашен – п. Вагашен	2,3	–	–	–	92,4	2570	–
Р. Личк – п. Личк	3,0	8,0	37	31	33,0	2060	87
Р. Бахтак – п. Цаккар	6,0	30,0	47	42	144	2570	123
Р. Гаварагет – п. Норатус	7,0	24,0	29	24	467	2430	133

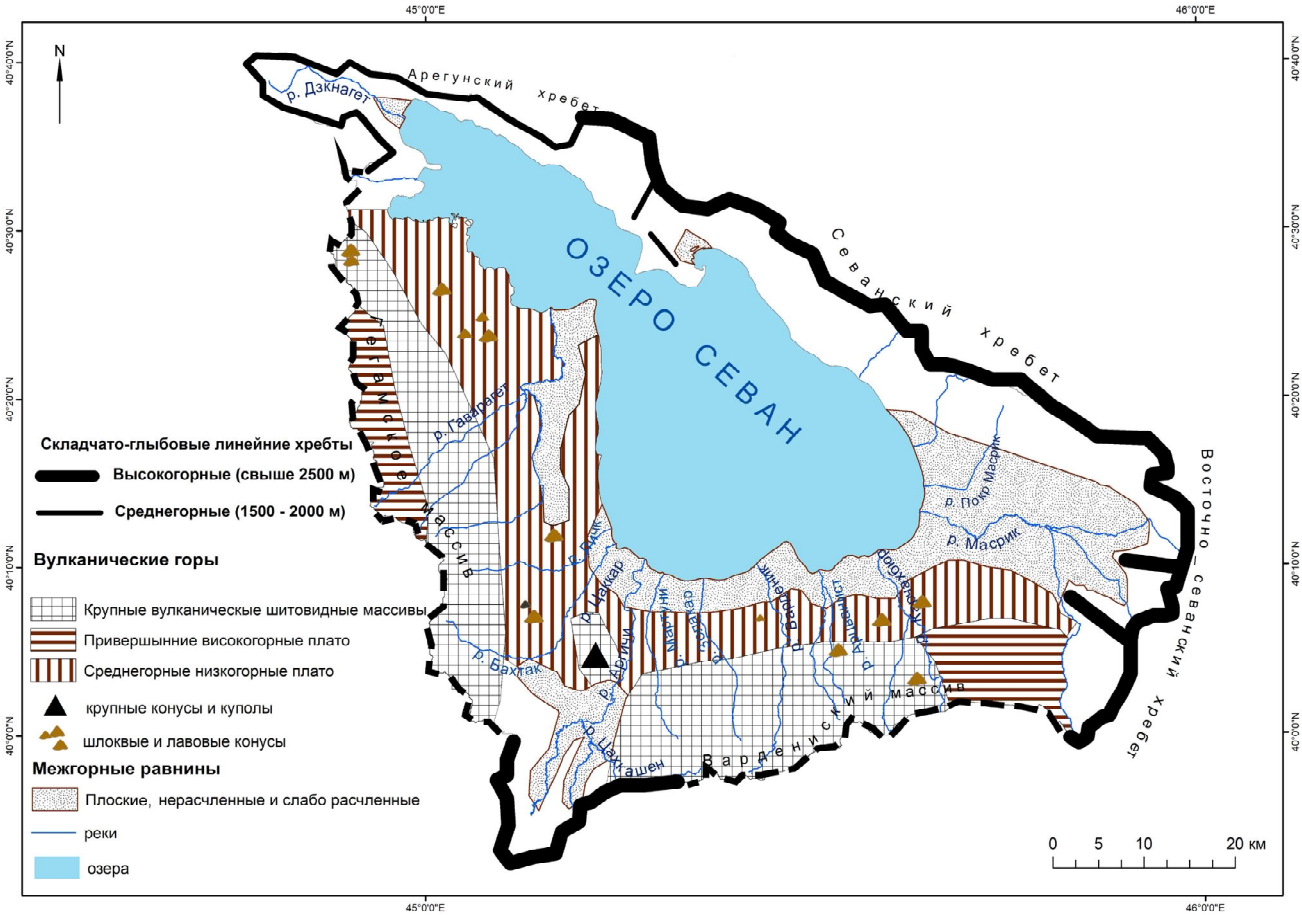

Рис. 1. Орографическая карта-схема бассейна оз. Севан

Fig. 1. Schematic orographic map of the Sevan Lake basin

должается до марта. Обычно период низкого стока длится до 8–9 месяцев. По условиям формирования и величине стока меженный период делится на летне-осенний и зимний. В обоих случаях питание рек происходит преимущественно подземными водами. Однако летне-осенние дожди часто могут нарушить режим питания рек и даже быть причиной наводнений.

Зимний маловодный период устанавливается с конца ноября–декабря по февраль–март, то есть продолжительность зимней межени составляет примерно 3–4 месяца. Десятидневный минимальный сток наблюдается в середине февраля.

Минимальный сток рек бассейна озера формируется в сложных природных условиях: разнообразный горный рельеф и геологическая структура, меняющиеся климатические условия и ряд других природных факторов. Их влияние нашло свое отражение в неравномерном пространственном распределении минимального декадного стока зимнего маловодного периода рек. Естественные и антропогенные факторы, обусловливающие минимальный сток и его изменение, рассматриваются во многих работах отечественных и зарубежных авторов [Волчек, Грядунова, 2010; Гуревич, 2009; Евстигнеев и др., 1990 и др.].

Так, на изучаемой территории зимние минимальные декадные расходы воды колеблются в пределах 0,049–2,63 м^3/сек (табл. 2). Наибольший из них составил 3,81 м^3/сек (1948 г.) и наблюдался на р. Гаварагет – п. Норатус, а наименьший – на р. Драхтик – п. Драхтик – 0,006 м^3/сек (1961 г.). Сравнительно меньшие значения зимних минимальных декадных расходов воды обусловлены формированием устойчивого снежного покрова в бассейне озера в холодный период года, замерзанием отдельных участков рек, а сравнительно большие значения имеют преимущественно реки с подземным питанием. Кроме того, некоторая часть речной воды расходуется на образование льда при замерзании.

Для исследуемой территории коэффициент вариации (изменчивости) C_v зимних минимальных декадных расходов составляет 0,14–0,63. Для всего бассейна его среднее значение равно 0,33. Как правило, небольшие значения C_v наблюдаются на тех реках, которые имеют большую естественную за-

Таблица 2

Характеристики временных рядов зимних минимальных декадных расходов воды рек бассейна озера Севан

Река – пункт	Период наблюдений	Зимние декадные минимальные расходы		Коэффициенты	
		Средний расход, м^3/с	Модуль стока, л/(с км^2)	Вариации, C_V	Асимметрии, C_S
Р. Дзыкнагет – п. Цовагюх	1936–39, 1941–44, 1947–2017	0,14	1,69	0,32	0,75
Р. Драхтик – п. Драхтик	1958–63, 1972–92, 1999–2017	0,045	1,15	0,63	0,74
Р. Памбак – п. Памбак	1947–50, 1952–53, 1955–68, 1970–89, 1998–2017	0,069	3,38	0,33	0,36
Р. Масрик – п. Цовак	1953–2017	2,33	3,46	0,22	–0,23
Р. Карчахпюр – п. Карчахпюр	1952–63, 1965–94, 1998–2017	0,84	7,24	0,24	–0,47
Р. Ваденис – п. Варденик	1935–38, 1940–43, 1945–46, 1949–94, 1998–2017	0,49	4,19	0,39	0,39
Р. Мартуни – п. Геховит	1963–2017	0,64	7,57	0,19	1,03
Р. Аргичи – п. Геташен	1935–2017	1,96	5,36	0,25	0,37
Р. Цахкашен – п. Вагашен	1971–99, 2004–2017	0,47	5,09	0,28	–0,24
Р. Личк – п. Личк	1960–62, 1976–94, 1998–2017	1,51	45,8	0,38	1,06
Р. Бахтак – п. Цаккар	1951–2017	0,12	0,83	0,62	0,80
Р. Гаварагет – п. Норатус	1936–44, 1947–48, 1950, 1952–92, 1998–2017	2,63	5,63	0,14	0,21

регулированность стока (сравнительно большее подземное питание). На изучаемой территории относительно большим подземным питанием (то есть, где подземное питание на 70% и более превышает поверхностное) выделяются реки Масрик, Карчахпюр, Гаварагет. Сравнительно большие значения C_v наблюдаются на реках с питанием дождевыми и талыми водами, а также на маленьких реках. Расчетные значения коэффициента асимметрии зимних минимальных декадных расходов составляют 0,47–1,06. Определенной зависимости коэффициента вариации от высоты не выявлено.

В зимний период расходы воды в реках на изучаемой территории резко уменьшаются, составляя 5–24% от величины среднего годового стока. Реки переходят в основном на питание подземными водами (табл. 3). Отметим, что часть высокогорных рек зимой промерзает до дна. Расчеты показывают, что средний расход воды за зимний маловодный период (XI–II) меньше или почти равен расходу за летне-осенний маловодный период (VII–IX), за исключением нескольких рек. Такое соотношение, в принципе нехарактерное для рек Армении, скорее всего, связано с использованием воды на хозяйственные нужды.

Вследствие перемерзания из-за незначительного грунтового питания и низких зимних температур наблюдается отсутствие стока на реках Бахтак, Гегаркуник, Гридзор. Наибольшая продолжительность данного явления наблюдается на реке Гегаркуник – 3,0–3,5 месяца, на Гридзоре и Бахтаке – 2,5–3,0 месяца. Площадь водосбора этих рек сравнительно мала – от 40 до 150 км^2, их средняя высота – более 2500–2600 м.

Воды рек, впадающих в озеро, используются в питьевых, бытовых, оросительных, промышленных, гидроэнергетических целях, а также в рыбном хозяйстве, в целях обводнения. Однако из-за крайне неравномерного пространственного и внутригодового распределения речного стока здесь возникают значительные трудности с их использованием. Согласно табл. 4 на изучаемой территории в 2018 г. водозабор (без ГЭС) составил 53,4 млн м^3, потери при транзитной переброске – 22,6 млн м^3 (42,3%). Значительная часть водопотребления (57,1%) выпадает на долю сельского, рыбного и лесного хозяйства. В 2014–2018 гг. объем водозабора составил 41,3–53,4 млн м^3, причем на 64,6–79,9% за счет подземных источников. Рассматриваемый за зимний период сток можно принять близким к естественному, так как в это время нет орошения – главного потребителя водных ресурсов изучаемой территории.

Как правило, с высотой обычно растет модуль минимального стока [Варданян, 1991; Маргарян

Таблица 3

Сток зимнего маловодного периода рек бассейна озера Севан

Река – пункт	Месячный сток, млн м^3			Годовой сток, млн м^3	Отношение стока зимнего маловодного периода, %		Отношение стока зимнего и летне-осеннего маловодных периодов
	XII	I	II		к годовому	к летне-осеннему маловодному периоду	
Р. Дзыкнагет – п. Цовагюх	0,63	0,52	0,58	34,6	5,01	7,93	0,63
Р. Драхтик – п. Драхтик	0,23	0,19	0,20	6,72	9,26	13,6	0,68
Р. Памбак – п. Памбак	0,26	0,23	0,21	6,59	10,6	17,4	0,61
Р. Масрик – п. Цовак	7,16	6,79	6,29	105	19,3	19,7	0,98
Р. Карчахпюр – п. Карчахпюр	2,63	2,55	2,29	33,4	22,4	19,5	1,15
Р. Ваденис – п. Варденик	1,90	1,77	1,52	49,5	10,5	17,0	0,61
Р. Мартуни – п. Геховит	2,01	1,97	1,78	53,0	10,9	17,2	0,63
Р. Аргичи – п. Геташен	6,39	6,16	5,57	172	10,5	8,97	1,17
Р. Цахкашен – п. Вагашен	1,48	1,57	1,63	47,9	9,75	12,2	0,8
Р. Личк – п. Личк	4,72	4,63	4,04	56,8	23,6	26,1	0,9
Р. Бахтак – п. Цаккар	0,50	0,49	0,48	20,5	7,20	5,06	1,42
Р. Гаварагет – п. Норатус	7,95	7,93	7,11	110	20,8	19,1	1,09

Таблица 4

Объемы водозабора и водопользования в бассейне оз. Севан за 2018 г., млн м^3 (без ГЭС)

Водозабор	Водопользование	В т. ч. по назначению		
		Питьевое водоснабжение	Промышленность, строительство, коммунальное хозяйство	Сельское, рыбное, лесное хозяйство
53,4	30,8	11,7	1,5	17,6

и др., 2018; Мурадян, 2014; Ресурсы …, 1973]. Однако, в бассейне озера некоторые отклонения от этих закономерностей наблюдаются на посту р. Бахтак – Цаккар (0,83 л/(с км^2)) и на посту р. Личк – Личк (45,7 л/(с км^2)) (рис. 2). По нашему мнению, такие отклонения обусловлены физико-географическими особенностями речных бассейнов, а также местными особенностями питания, и во многом определяются надежностью данных.

Полученные зависимости (см. рис. 2, 3) можно использовать для предварительных расчетов зимнего минимального стока неизученных рек рассматриваемой территории.

Для всех действующих постов рек бассейна озера построены графики изменений минимальных декадных расходов воды. Анализ результатов показал, что для большинства рек (58%), впадающих в озеро Севан, наблюдается тенденция роста зимних минимальных декадных расходов (рис. 4). На пяти реках в юго-западной и восточной частях бассейна (Масрик, Мартуни, Бахтак, Личк и Гаварагет) (в 42% случаев) наблюдается тенденция их уменьшения.

Тенденция увеличения зимнего стока характерна для многих регионов России и прилегающих территорий [Бейсембаева и др., 2016; Болгов и др., 2014; Волчек, Грядунова, 2010; Джамалов и др., 2017; Филиппова, 2014; Frolova et al., 2017; Rets et al., 2018; Telegina, 2015]. Так, например, для большинства исследуемых рек Беларуси отмечается стабильная тенденция увеличения летне-осенних (73% исследуемых рек) и зимних (80%) минимальных расходов воды, причем на большей части рек величина изменения стока в зимний период больше, чем в летне-осенний [Волчек, Грядунова, 2010]. Практически на всей территории ЕТР отмечается увеличение нормы минимального стока, причем наибольший рост наблюдается в южных частях бассейна, в степной и лесостепной зонах [Филиппова, 2014].

Для оценки влияния климатических факторов на сток рек рассмотрен временной ход и тренды средних температур приземного слоя воздуха и атмосферных осадков за зимний период за имеющиеся периоды наблюдений (рис. 5). Анализ линий трендов показывает, что на всех действующих в настоящее время метеостанциях бассейна наблюдается тенденция роста температуры воздуха и атмосферных осадков, что обусловливает преимущественно положительную динамику изменения зимних минимальных декадных расходов бассейна озера Севан. В большей степени выражено влияние увеличения осадков за холодный период года.

Для тех рек, где наблюдается тенденция уменьшения зимних минимальных декадных расходов, речные экосистемы становятся более уязвимыми. В настоящее время особенно неблагоприятное экологическое состояние наблюдается в тех речных бассейнах, где интенсивно развита гидроэнергетика (бассейны Дзорагюх, Масрик, Варденис, Мартуни, Аргичи, Карчахбюр и др.).

Используя результаты статистических расчетов, в работе построена карта распределения среднего многолетнего модуля минимального декадного зимнего стока (рис. 6).

В бассейне оз. Севан можно выделить три зоны, исходя из величины модуля стока: 1) средние и высокие части горных хребтов Гегама, Варденис и Восточно-Севанский с модулями стока 5–7 л/(с км^2) и привершинные части горных хребтов Варденис с модулями стока 7 л/(с км^2) и более; 2) обширные предгорные части всех горных хребтов, окаймляющих озеро, с модулями стока 3–5 л/(с км^2), за исключени-

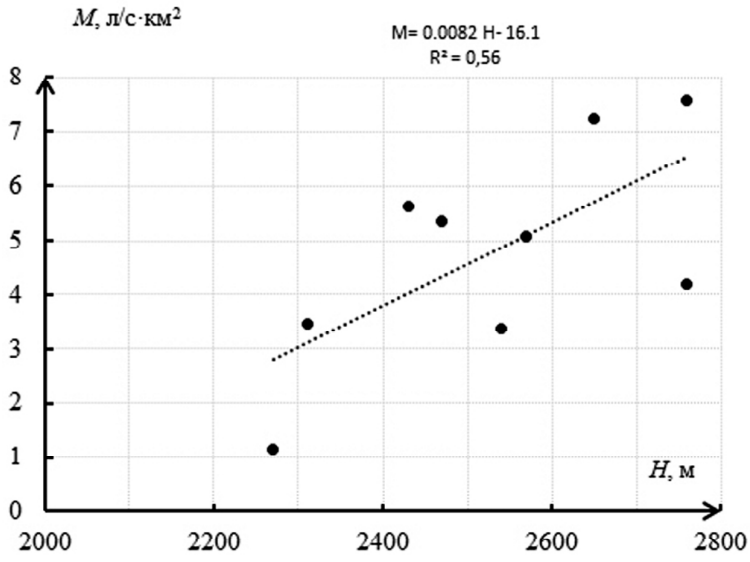

Рис. 2. Зависимость модуля зимнего декадного минимального стока M (л/(с км^2) от средневзвешенной высоты водосбора H (м) для рек бассейна озера Севан

Fig. 2. Dependence of the winter decadal minimum runoff rate M (l/sec km^2) on the weighted average catchment altitude H (m) for the rivers of the Sevan Lake basin

ем северо-западной части Гамского хребта; 3) предгорные части Севанской котловины, Масрикская равнина, северо-западная часть Гегамского хребта с модулями стока 0–3 л/(с км^2).

Таким образом, полученные результаты имеют очень важное прикладное значение для геоэкологических задач, в частности, для управления водными экосистемами, их эффективного использования и охраны, определения экологического стока, оценки рисков, прогнозирования водных катастроф, охраны речных экосистем от деградации и решения других задач.

Выводы. В результате выполненной работы получены следующие результаты:

– минимальные расходы воды рек изучаемой территории наблюдаются в период летне-осеннего и зимнего маловодных периодов. Зимняя межень длится с конца ноября – декабря до февраля – марта;

– зимние средние декадные минимальные расходы воды рек, впадающих в озеро Севан, изменяются в пределах 0,045–2,63 м^3/с. Сравнительно большие значения характерны для рек Масрик и Гаварагет, а малые – для рек Драхтик, Памбак и Бахтак;

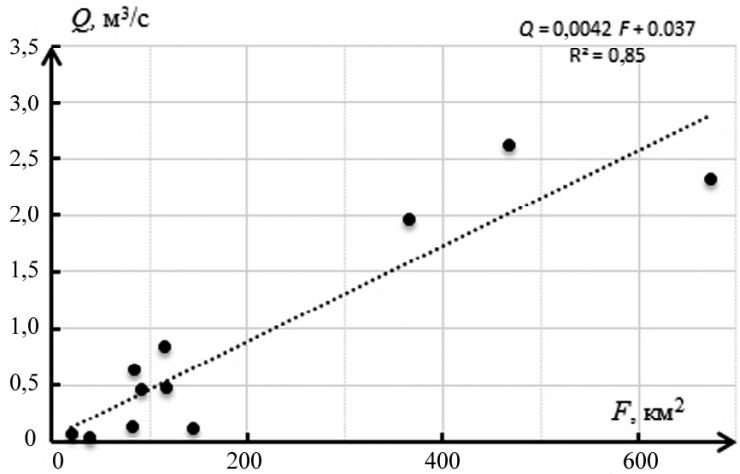

Рис. 3. Зависимость зимнего минимального декадного расхода воды Q (м^3/с) от площади водосбора F (км^2) для рек бассейна озера Севан

Fig. 3. Dependence of the winter minimum decadal water discharge Q (m^3/sec) on the catchment area F (km^2) for the rivers of the Sevan Lake basin

– коэффициент вариации зимнего минимального декадного стока находится в пределах 0,14–0,63. Его среднее значение для всего бассейна озера составляет 0,33. Малые значения коэффициента вари-

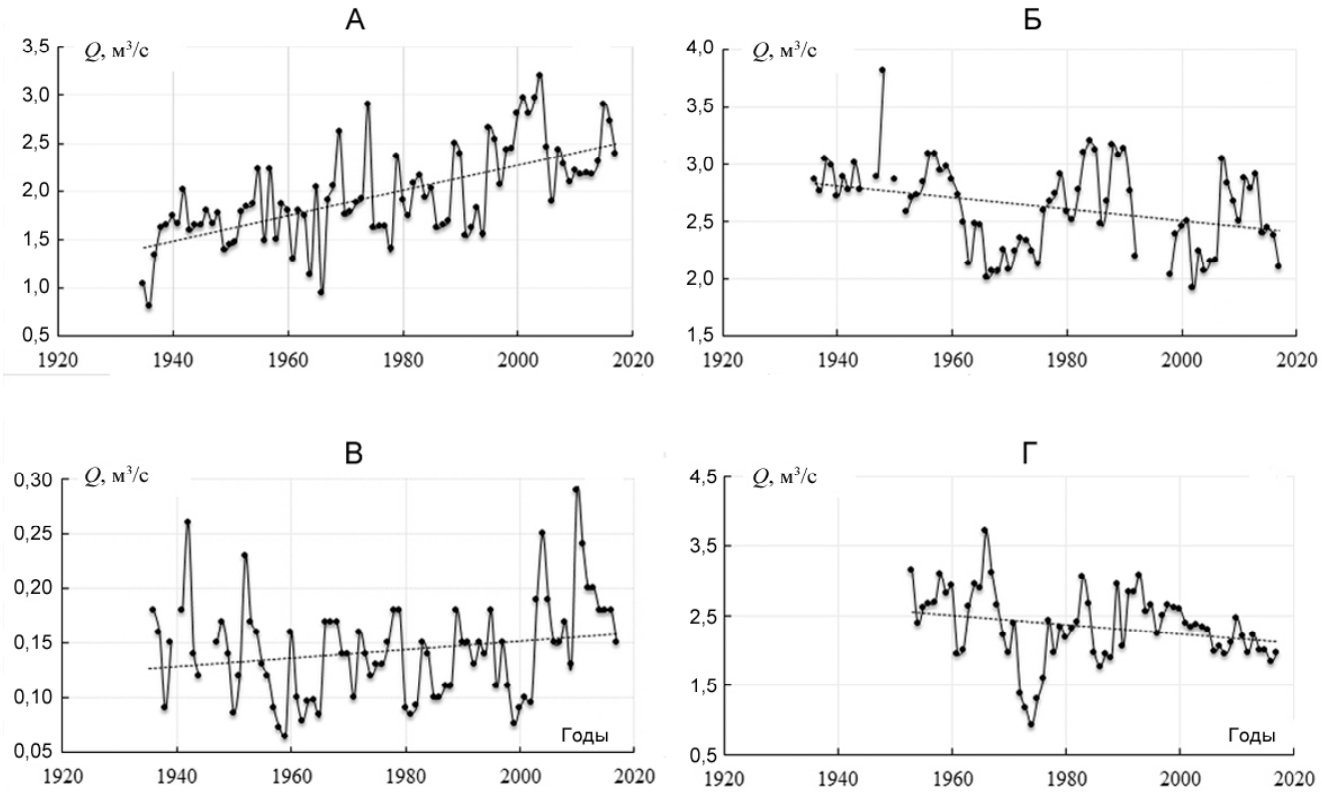

Рис. 4. Динамика изменения зимних минимальных декадных расходов на реках бассейна оз. Севан: А – Р. Аргичи – п. Геташен; Б – Р. Гаварагет – п. Норатус; В – Р. Дзыкнагет – п. Цовагюх; Г – Р. Масрик – п. Цовак

Fig. 4. Dynamics of changes in winter minimum decadal water discharge for the rivers of the Sevan Lake basin: A – Argidji River – g. Getashen; Б – Gavaraget River – g. Noratus; B – Dzknaget River – g. Tsovagyuh; Г – Masrik River – g. Tsovak

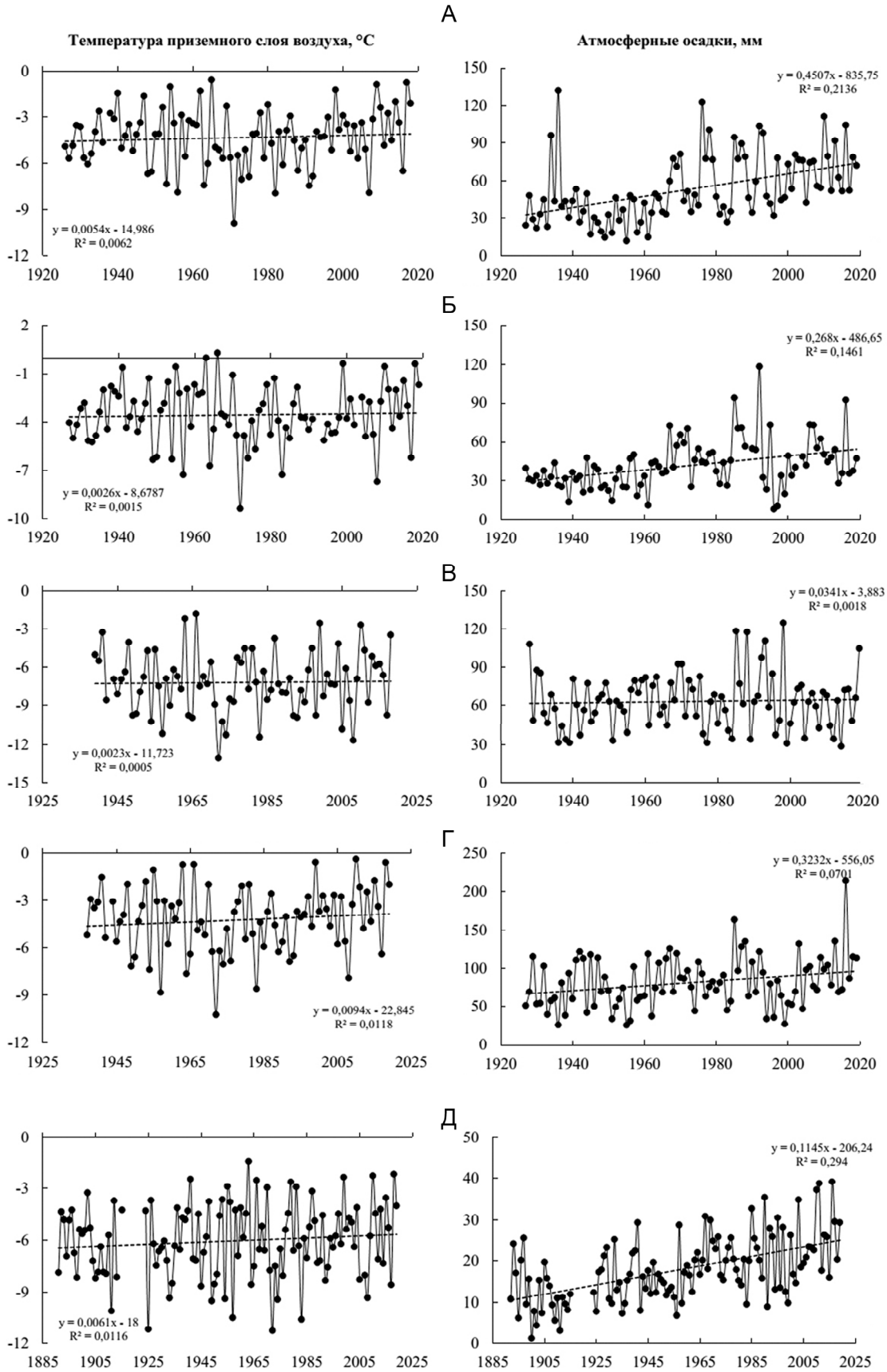

Рис. 5. Изменение температуры воздуха и осадков за холодный период года для метеостанций, расположенных в бассейне оз. Севан: А – Севан; Б – Шоржа; В – Масрик; Г – Мартуни; Д – Гавар

Fig. 5. Change in air temperature and precipitation during the cold season for weather stations located in the Sevan Lake basin: А – Sevan; Б – Shorzha; В – Masrik; Г – Martuni; Д – Gavar

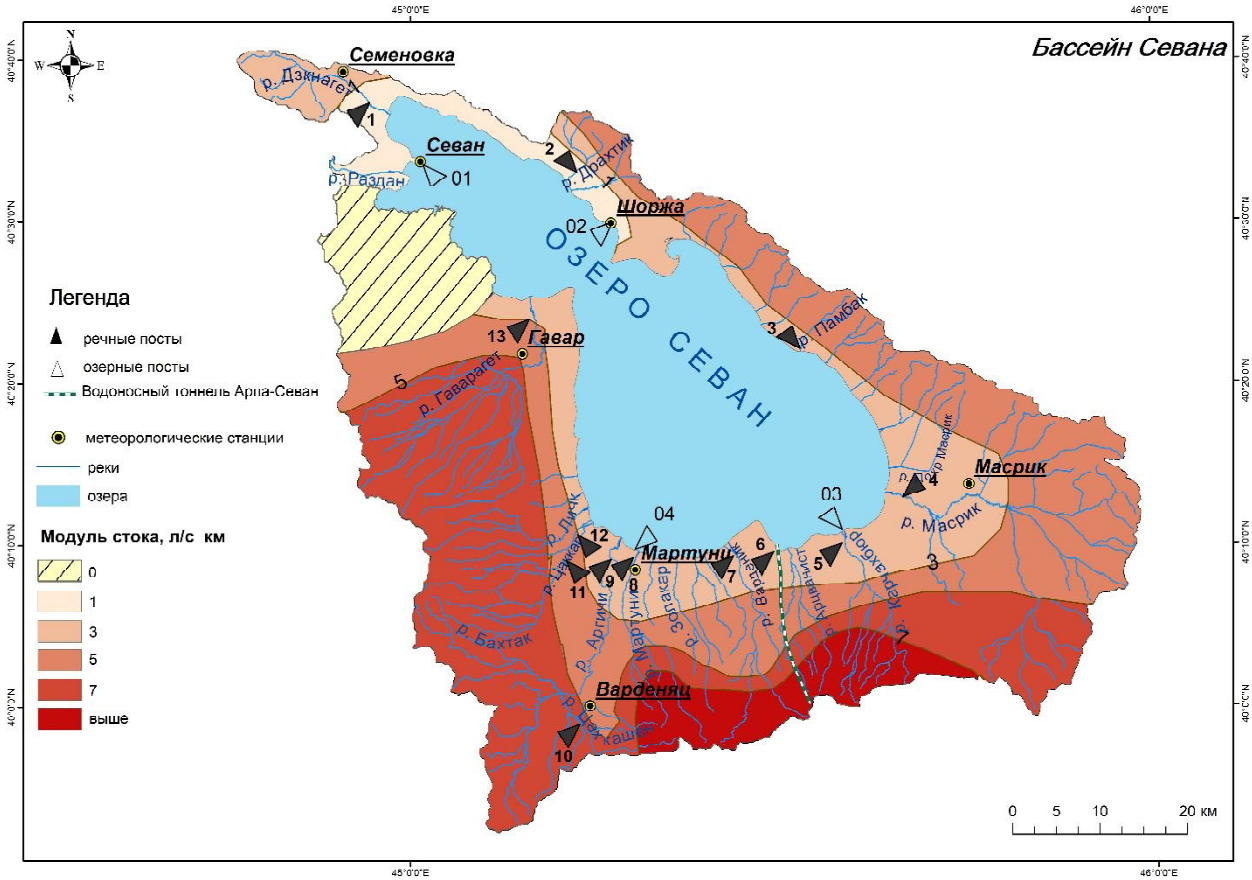

Рис. 6. Карта модуля среднего многолетнего минимального зимнего стока за декаду (номера постов см. в табл. 3)

Fig. 6. Average long-term minimum winter runoff rate per decade (gauge station numbers – according to table 3)

ации наблюдаются на тех реках, которые имеют устойчивое подземное питание;

– с высотой местности растет модуль минимального стока. Некоторые отклонения от этих закономерностей наблюдаются на посту Цаккар реки Бахтак и на посту Личк реки Личк, что обусловлено местными физико-географическими особенностями и питанием речных бассейнов;

– получена тесная корреляционная связь между зимними минимальными декадными расходами рек и площадями их бассейнов, которую можно использовать при предварительном расчете зимнего стока неизученных рек исследуемой территории;

– у большинства рек, впадающих в озеро Севан (из изученных 12 постов – 7, т. е. в 58% случаях), наблюдается тенденция роста зимних минимальных декадных расходов. Исключение составляют реки Масрик, Мартуни, Бахтак, Личк и Гаварагет;

– тенденция понижения зимних минимальных декадных расходов рек, впадающих в озеро Севан, обусловлена уменьшением запасов подземных вод. В этих речных экосистемах особое внимание стоит уделить сохранению экологического стока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л. Безопасность водопользования в условиях маловодий // Водное хозяйство России. 2011. Т. 6. С. 6–17.

Бейсембаева М.А., Дубровская Л.И., Земцов В.А. Минимальный сток Иртыша в равнинной части бассейна на территории Республики Казахстан в условиях антропогенной нагрузки // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 4. С. 35–43.

Болгов М.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д., Филимонова М.К., Филиппова И.А. Современные изменения минимального стока на реках бассейна р. Волга // Метеорология и гидрология. 2014. № 3. С. 75–84.

Варданян Л.Р., Азизян Л.В. Прогноз меженного стока по кривой истощения запасов подземных вод на примере рек Республики Армения // Вестник ГИУА. Серия «Гидрология и гидротехника». 2014. Вып. 17. № 1. С. 18–26.

Варданян Т.Г. Зимний минимальный сток р. Аргичи и его расчет // Ученные записки ЕГУ. 1991. № 2. С. 150–156. (На армянском яз.)

Волчек А.А., Грядунова О.И. Минимальный сток рек Беларуси (монография). Брест. гос. ун-т имени А.С. Пушкина. Брест: БрГУ, 2010. 169 с.

Гидрография Армянской ССР. Ереван: изд-во АН Арм. ССР, 1981. 177 с. (На армянском яз.)

Гуревич Е.В. Влияние температуры воздуха на зимний сток рек (на примере бассейна р. Алдан) // Метерология и гидрология. 2009. № 9. С. 92–99.

Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Косолапов А.Е. Водные ресурсы бассейна Дона и их экологическое состояние. М.: Издательство ГЕОС, 2017. 227 с.

Евстигнеев В.М., Зайцев А.А., Сваткова Т.Г. и др. Водный режим рек СССР (карта для высшей школы масштаба 1:8 000 000) // Вестн. Моск ун-та. Сер. 5. Геогр. 1990. № 1. С. 10–16.

Маргарян В.Г., Варданян Т.Г. Особенности формирования речного стока и внутригодового распределения бассейна озера Севан // Научно-практический потенциал географии и его практическое применение (материалы научной конференции посвященной 80-летию рождения и 55-летию научно-педагогической деятельности Лемвела Акоповича Валесяна). Ереван: Изд-во Ереванского университета, 2011. С. 211–223. (На армянском яз.)

Маргарян В.Г., Давтян Т.М., Амроян А.М., Хуршудян С.А., Саргсян К.Г., Матевосян В.А. Анализ и оценка изменения зимних наименьших среднедекадных расходов воды притоков озера Севан // Современные задачи географии и геологии. (Материалы международного симпозиума, посвященного 100-летию основания Ереванского государственного университета, Факультет географии и геологии, Ереван, 27–29 сентября, 2018). Ереван: Изд-во ЕГУ, 2018. С. 242–246. (На армянском яз.)

Матишов Г.Г., Селютин В.В., Месропян К.Э., Булышева Н.И., Шевердяев И.В., Арутюнян Р.М., Габриелян Б.К. Современное состояние и проблемы изучения озера Севан // Наука юга России (Вестник Южного научного центра РАН). 2016. Том 12. № 2. С. 43–52.

Мурадян З.З. Расчет и оценка риска экстремальных расходов рек бассейна Аракс РА: автореф. дис. … канд. геогр. наук. Ереван, 2014. 32 с. (На армянском яз.)

Ресурсы поверхностных вод СССР. М.: Гидрометеоиздат, 1973. Том 9. Бассейн р. Аракса. Вып. 2. 472 с.

Филиппова И.А. Минимальный сток рек Европейской части России и его оценка в условиях изменения климата: дис. … канд. геогр. наук. М.: ИВП РАН, 2014. 210 с.

Физическая география Армянской ССР. Ереван: Изд-во АН Арм. ССР, 1971. 470 с. (На армянском яз.)

Шагинян М.В., Мнацаканян Б.П. О возможности прогнозирования меженного стока по уровням грунтовых вод // Сборник работ Ереванского ГМО. 1982. Вып. 4. С. 36–39.

Экология озера Севан в период повышения его уровня. Результаты исследований Российско-Армянской биологической экспедиции по гидроэкологическому обследованию озера Севан (Армения) (2005–2009 гг.). Махачкала: Наука ДНЦ, 2010. 348 с.

Frolova N.L., Belyakova P.A., Grigor'ev V.Yu., Sazonov A.A., Zotov L.V. Many-year variations of river runoff in the Selenga basin. *Water Resources and the Regime of Water Bodies*, 2017, vol. 44, no. 3, p. 359–371. DOI: 10.1134/S0097807817030101.

Kireeva M.B., Frolova N.L., Winde F., Dzhamalov R.G., Rets E.P., Povalishnikova E.S., Pahomova O.M. Low flow on the rivers of the European part of Russia and its hazards. *Geography, Environment, Sustainbility*, 2016, vol. 9(4), p. 33–47. DOI: 10.24057/2071-9388-2016-9-4-9-16.

Rets E.P., Dzhamalov R.G., Kireeva M.B., Frolova N.L., Durmanov I.N., Telegina A.A., Telegina E.A., Grigoriev V.Y. Recent trends of river runoff in the North Caucasus. *Geography, Environment, Sustainability*, 2018, vol. 11(3), p. 61–70.

Telegina E.A. Spatial and temporal variations of winter discharge under climate change: Case study of rivers in European Russia. *Remote Sensing and GIS for Hydrology and Water Resources*, IAHS Publ., 2015, 368, Proceedings RSHS14 and ICGRHWE14, Guangzhou, China, August 2014, p. 245–250. DOI: 10.5194/piahs-368-245-2015.

Поступила в редакцию 07.02.2020
После доработки 16.06.2020
Принята к публикации 25.08.2020

V. G. Margaryan[1], N. L. Frolova[2]

ASSESSMENT OF THE SPATIO-TEMPORAL DISTRIBUTION OF WINTER TEN-DAY MINIMUM RUNOFF FOR THE RIVERS OF THE SEVAN LAKE BASIN UNDER THE MODERN CLIMATE CHANGE

The paper discusses the variability of winter minimum decadal water discharge for 12 gauge stations with the longest series of observations on the rivers flowing into the Sevan Lake.

Basing on the statistical analysis the norm of winter average decadal minimum discharge of the rivers was calculated, as well as the coefficients of variability (C_v) and irregularity (C_s). The probability curves of minimum water discharges of rivers were plotted, and the spatial and temporal variability of hydrological parameters under study was analyzed.

Correlations between water discharge values and the catchment areas were used to calculate the runoff parameters of the unexplored rivers. The map of the distribution of average winter decadal minimum runoff rate was compiled.

Studies show that the winter average decade minimum discharge of the rivers of the Lake Sevan basin has very uneven spatial distribution. The parameters under study vary on the average from 0,049 to 2,63 m^3/sec, i. e. from 1,15 to 5,63 l/(sec km^2) in the area. The highest minimum average decadal winter discharge of the rivers of the lake basin is 3,81 m^3/sec, and the smallest is 0,006 m^3/sec. Some rivers of the lake basin with relatively small catchment area and significant average balanced height have no runoff in winter because of through freezing resulting from the minor groundwater supply and low winter temperatures.

Temporal variability of water runoff is rather low for the rivers under study. The coefficient of variation (variability) of winter average decadal minimum discharges is 0,14–0,63. Most of the rivers in the lake basin have a tendency to increase winter average decadal minimum discharge due to the growing mean air temperature and increasing amount of precipitation during the winter period.

Key words: low-water runoff, runoff characteristics, warming, Armenia

REFERENCES

Alekseevsky N.I., Frolova N.L. Bezopasnost' vodopol'zovaniya v usloviyakh malovodiy [Water use safety in the conditions of water scarcity], *Water Sector of Russia*, 2011, no. 6, p. 6–17. (In Russian)

Beysembaeva M.A., Dubrovskaya L.I., Zemtsov V.A. Minimal'nyy stok Irtysha v ravninnoy chasti basseyna na territorii Respubliki Kazakhstan v usloviyakh antropogennoy nagruzki [Minimum runoff of the Irtysh River in the flat part of the basin within the Republic of Kazakhstan under the anthropogenic impact], *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 4, p. 35–43. (In Russian)

Bolgov M.V., Korobkina E.A., Trubeckova M.D., Filimonova M.K., Filippova I.A. Sovremennye izmeneniya minimal'nogo stoka na rekakh basseyna r. Volga [Modern changes in the minimum runoff of the rivers of the Volga River basin], *Meteorology and hydrology*, 2014, no. 3, p. 75–84. (In Russian)

Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireeva M.B., Kosolapov A.E. Vodnyye resursy basseyna Dona i ikh ekologicheskoye sostoyaniye [Water resources of the Don River basin and their ecological state], Moscow, GEOS Publ., 2017, 227 p. (In Russian)

Ekologiya ozera Sevan v period povysheniya ego urovnya [Ecology of Lake Sevan during the period of water level rise], The results of Russian-Armenian biological expedition for hydroecological survey of Lake Sevan (Armenia). 2005–2009. Makhachkala, Science DSC Publ., 2010, 348 p. (In Russian)

Filippova I.A. Minimal'nyy stok rek Evropeyskoy chasti Rossii i ego otsenka v usloviyakh izmeneniya klimata [The minimum runoff of rivers in the European part of Russia and its assessment under the climate change], PhD Thesis in Geography. Moscow, 2014, 210 p. (In Russian)

Frolova N.L., Belyakova P.A., Grigor'ev V.Yu., Sazonov A.A., Zotov L.V. Many-year variations of river runoff in the Selenga basin *Water Resources and the Regime of Water Bodies*, 2017, vol. 44, no. 3, p. 359–371. DOI: 10.1134/S0097807817030101.

Gidrografiya Armyanskoy SSR [Hydrography of the Armenian SSR]. Yerevan, AN 1 Publ., Arm. SSR, 1981, 177 p. (In Armenian)

*Gurevich E.*V. Vliyanie temperatury vozdukha na zimniy stok rek (na primere basseyna r. Aldan) [Air Temperature Influence on the Winter River Runoff (Case Study of the Aldan River Basin)], *Meteorology and hydrology*, 2009, no. 9, p. 92–99. (In Russian)

Kireeva M.B., Frolova N.L., Winde F., Dzhamalov R.G., Rets E.P., Povalishnikova E.S., Pahomova O.M. Low flow on the rivers of the European part of Russia and its hazards. *Geography, Environment, Sustainbility*, 2016, vol. 9(4), p. 33–47. DOI: 10.24057/2071-9388-2016-9-4-9-16.

Margaryan V.G., Davtyan T.M., Amroyan A.M., Churshudyan S.A., Sargsyan K.G., Matevosyan V.A. Analiz i otsenka izmeneniya zimnikh naimen'shikh srednedekadnykh raskhodov vody pritokov ozera Sevan [Analysis and assessment of changes in the winter minimum mean decadal water discharges for the tributaries of the Sevan Lake], *Contemporary issues of geography and geology*. Dedicated to the 100th Anniversary of the Yerevan State University, International Conference Proceedings September 27–29, 2018, Yerevan. Yerevan, YSU Publ., 2018, p. 242–246. (In Armenian)

[1] Yerevan State University. Faculty of Geography and Geology, Department of Physical Geography and Hydrometeorology, Associate Professor, PhD. in Geography; *e-mail*: vmargaryan@ysu.am

[2] Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Head of the Department, Professor, D.Sc. in Geography; *e-mail*: frolova_nl@mail.ru

Margaryan V.G., Vardanian T.G. Osobennosti formirovaniya rechnogo stoka i vnutrigodovogo raspredeleniya basseyna ozera Sevan [Specific features of river runoff formation and intra-annual distribution features of the Sevan Lake basin], *Scientific and practical potential of geography and its practical application*. Yerevan, YSU Publ., 2011, p. 211–223. (In Armenian)

Matishov G.G., Selyutin V.V., Mesropyan K.E., Bulysheva N.I., Sheverdyaev I.V., Aroutiounian R.M., Gabrielyan B.K. Sovremennoye sostoyaniye i problemy izucheniya ozera Sevan [Current state and problems of the study of Lake Sevan], *Science in the South of Russia*, 2016, vol. 12, no. 2, p. 43–52.

Muradyan Z.Z. Raschet i otsenka riska ekstremal'nykh raskhodov rek basseyna Araks RA [Calculation and risk assessment of the extreme water discharges for the rivers of the Araks River basin of the RA], Extended Abstract of PhD Thesis in Geography. Erevan, 2014, 32 p. (In Armenian)

Physical Geography of the Armenian SSR. Yerevan, Publishing House of the Academy of Sciences of Armenia, USSR, 1971, 470 p. (In Armenian)

Resursy poverkhnostnykh vod SSSR [Surface water resources of the USSR], vol. 9, the Araks River basin, iss. 2, Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 472 p. (In Russian)

Rets E.P., Dzhamalov R.G., Kireeva M.B., Frolova N.L., Durmanov I.N., Telegina A.A., Telegina E.A., Grigoriev V.Y. Recent trends of river runoff in the North Caucasus. *Geography, Environment, Sustainability*, 2018, vol. 11(3), p. 61–70.

Shaginyan M.V., Mnatsakanyan B.P. O vozmozhnosti prognozirovaniya mezhennogo stoka po urovnyam gruntovykh vod [About the possibility of forecasting low-flow runoff using the groundwater levels], *Collected Works of the Yerevan GMO*, 1982, vol. 4, p. 36–39. (In Russian)

Telegina E.A. Spatial and temporal variations of winter discharge under climate change: Case study of rivers in European. Russia *Remote Sensing and GIS for Hydrology and Water Resources* (IAHS Publ., 368, 2015) (Proceedings RSHS14 and ICGRHWE14, Guangzhou, China, August 2014), p. 245–250. DOI: 10.5194/piahs-368-245-2015.

Vardanian T.G. Zimniy minimal'nyy stok r. Argichi i ego raschet [The minimal winter runoff of the Argidji River and its calculation], *Uchenye zapiski EGU*, 1991, no. 2, p. 150–156. (In Armenian)

Vardanyan L.R., Azizyan L.V. Prognoz mezhennogo stoka po krivoy istoscheniya zapasov podzemnykh vod na primere rek Respubliki Armeniya [Forecast of low-water runoff based on the underground water depletion curve on the example of the RA rivers], *Vestnik GIUA. Seriya Gidrologiya i gidrotekhnika*, 2014, iss. 17, no. 1, p. 18–26. (In Russian)

Volchek A.A., Gryadinova O.I. Minimal'nyy stok rek Belarusi: monografiya [Minimum runoff of the rivers of Belarus: monograph], Brest. State University named after A.S. Pushkin. Brest, BrSU Publ., 2010, 169 p. (In Russian)

Yevstigneyev V.M., Zaytsev A.A., Svatkova T.G. et al. Vodnyy rezhim rek SSSR (karta dlya vysshey shkoly masshtaba 1:8 000 000) [Water regime of the USSR rivers (map for higher schools M 1:8 000 000)], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geog.*, 1990, no. 1, p. 10–16. (In Russian)

Received 07.02.2020
Revised 16.06.2020
Accepted 25.08.2020

УДК 314.724

Л.Р. Имангулов[1], М.Р. Максименко[2], М.С. Савоскул [3], С.Г. Сафронов[4]

ВЛИЯНИЕ ЭТНОКУЛЬТУРНОГО ФАКТОРА НА ЭВОЛЮЦИЮ СЕЛЬСКОГО РАССЕЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ПОЛИЭТНИЧНЫХ РАЙОНОВ БАШКИРИИ И МАРИЙ ЭЛ

В статье на примере нескольких административных районов республик Марий Эл (Параньгинский и Мари-Турекский районы) и Башкирии (Федоровский район) рассмотрены стадии трансформации сельского расселения за длительный период времени. В качестве регионов исследования выбраны полиэтничные регионы. В изученных сельских районах традиционно проживают: башкиры, марийцы, русские, татары, чуваши, удмурты, мордва. Акцент сделан на роли этнокультурного фактора в трансформации сельского расселения и картины сельских населенных пунктов (СНП). Рассмотрена трансформация сельского расселения с учетом специфики истории заселения региона, хозяйственного уклада разных этнических групп, их демографического и миграционного поведения, стадии демографического перехода и участия в процессах урбанизации. На локальном уровне раскрыты механизмы действия различных факторов, приводящих к изменению картины сети сельского расселения, таких как физико-географический фактор, действующий на ранних этапах освоения территории; позиционный фактор, особенно транспортно-географический, значимый на последующих стадиях развития системы расселения, демографический фактор, определяющий людность СНП, институциональный фактор, активно проявившийся в советский период. Все факторы рассмотрены через призму этнической структуры населения. В статье выделено три стадии развития сельского расселения с точки зрения взаимодействия этнокультурного фактора с другими: формирование сети сельских поселений; развитие системы сельского расселения в условиях положительной динамики численности; трансформация сельского расселения в условиях депопуляции, роста территориальной подвижности жителей и этнического самосознания. Элементы этнической культуры определяют особенности видения этнической группой территории, влияют на принятие коллективных или персональных решений, существенных для развития системы расселения.

Ключевые слова: сельские сообщества, факторы динамики расселения, этническая структура населения

Постановка исследовательской задачи и изученность темы. Динамике сельского расселения посвящено немало исследований как затрагивающих отдельные регионы [Алексеев и др., 2016; Вихрёв и др., 2016, Фомкина, 2017], так и обобщающих факторы трансформации сельского расселения в постсоветский период на общероссийском уровне [Нефедова, 2018; Алексеев, Сафронов, 2017; Зубаревич, 2013]. Среди ведущих факторов, влияющих на трансформацию сельского расселения – исчерпание демографического потенциала; утрата большей частью сельских поселений сельскохозяйственных функций, что приводит к росту миграционного оттока из села [Нефедова, 2018; Алексеев и др., 2019]. Итогом становится депопуляция и поляризация расселения. Эти процессы, уходящие корнями в дореволюционное отходничество, усилились в конце советского периода, а с начала 1990-х гг. приняли обвальный характер.

В период трансформации экономики процессы поляризации заслонили «работу» факторов «второго порядка», таких как позиционный фактор, связанный с транспортно-географическим положением поселения и его местом в иерархии центров обслуживания, а также этнокультурный фактор. Их влияние на развитие сельского расселения стало проявляться активнее в последние десятилетия, когда ситуация в сельской местности вошла в состояние эволюционного развития на новом количественном и качественном уровне.

В отечественных публикациях значительное внимание уделено позиционному фактору, действие которого, в частности, наглядно проявляется в исследованиях с применением ГИС-технологий [Чучкалов, Алексеев, 2020; Ткаченко и др., 2019; Шелудков, Орлов, 2019].

Актуальность проведенного исследования определяется недостаточной изученностью роли этнокультурного фактора в трансформации сельского расселения, особенно на локальном уровне. Влияние этнической структуры населения на сельское

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра экономической и социальной географии России, студент; *e-mail*: linar.imangulov.1999@mail.ru

[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра экономической и социальной географии России, выпускник бакалавриата; *e-mail*: mikemaksimenko@gmail.com

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

[4] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра экономической и социальной географии России, канд. геогр. н., доцент; *e-mail*: saffff@mail.ru

расселение в отечественной науке рассматривалось преимущественно в исторической ретроспективе [Алексеев и др., 2016].

В проведенных ранее исследованиях вопрос о непосредственном влиянии этнического фактора на локальные системы расселения не ставился. Его роль в дифференциации современной сельской местности затрагивалась в ограниченном числе работ [Нефедова, 2012а, б; Белозеров, 2005]. Например, Т.Г. Нефедова обращает внимание на замещающие этнические миграции в Ставропольском крае [Нефедова, 2015].

Среди работ, характеризующих сельское расселение в неоднородной этнической сельской местности, можно отметить исследования регионов Северного Кавказа [Ахмедова, 2013; Эльдаров, 2008] и Поволжья [Корнишина, 2015; Мустафин, Рубцов, 2012; Емельянов, 2012; Лекомцев, 2012]. Большая часть исследователей обращает внимание на связь хозяйственной деятельности этнических групп и расселения либо на связь ландшафта и хозяйственной деятельности. Т.И. Герасименко и И.Ю. Гладкий пишут о связи ландшафтного и этноэкологического подходов [Герасименко, Гладкий, 2005].

Более детально характеристика работ по сельскому расселению представлена в обзоре А.И. Алексеева, С.Г. Сафронова и М.С. Савоскул в сборнике, посвященном развитию социально-экономической географии России в постсоветский период [Алексеев и др., 2016].

В зарубежных публикациях, посвященных развивающимся странам, эта тема обычно не выступает в качестве основной, сельское расселение рассматривается в целом, поскольку между этносами, которые еще не завершили демографический переход, нет существенных различий в темпах естественного прироста. Например, в Индии сильнее проявляются межрегиональные различия, связанные с транспортно-географическим положением штатов и уровнем урбанизации. В Европе ситуация обратная – демографическая модернизация завершена, и поэтому нет существенных различий между этносами.

Анализ влияния этнокультурного фактора на динамику сельского расселения сложен по нескольким причинам. Во-первых, фазы его активного влияния на сельское расселения разорваны во времени. Этнокультурный фактор важен на этапе становления сельского расселения, когда ключевую роль играет традиционная аграрная культура этнических групп, по-разному использующих ландшафтные особенности территории и соответственно формирующих свою часть сети расселения. Этнокультурный фактор является значимым для сельского расселения и на современном этапе, когда на первый план выходит сохранность элементов традиционной культуры и степень внутригрупповой сплоченности, позволяющих сохранить или расширить свой ареал расселения.

Во-вторых, применение сравнительно-географического метода для разных территорий-ключей не всегда возможно, поскольку траектории демографического и миграционного поведения, особенности занятости и т. д. одних и тех же этнических групп в разных регионах существенно различаются.

Исследовательская *гипотеза состоит в следующем:* этнический фактор на локальном уровне имеет долгосрочное влияние на трансформацию сельского расселения, которое сложно формализовать, поскольку на разных стадиях существования полиэтничных систем расселения в сочетаниях с другими факторами он проявляется с разной степенью интенсивности. Авторы статьи ставили своей *целью* на основе собранных эмпирических данных предложить логическую схему взаимодействия этнокультурного и прочих факторов в полиэтничной сельской местности в ходе разных стадий эволюции сельского расселения.

Регионы исследования. Для анализа влияния этнокультурного фактора на сельское расселение на локальном уровне за продолжительный период в качестве территорий исследования выбраны три административных района двух регионов с контрастной и разнообразной этнической структурой населения и неидентичными, но близкими ландшафтными особенностями сельского расселения и освоения (табл. 1).

Федоровский район Башкирии один из самых мозаичных с точки зрения этнической структуры жителей. В Параньгинском районе Марий Эл преобладают татары и марийцы, в Мари-Турекском районе – марийцы, существенна доля русских, татар и удмуртов.

Материалы и методы исследований. Статья основана на двух группах материалов. Первая – результаты полевых исследований, проведенных в июле–августе 2019 г. в Федоровском районе Республики Башкортостан, Мари-Турекском и Параньгинском районах Республики Марий Эл. Задачей экспедиций было изучение трансформации хозяйственной жизни и систем расселения в постсоветский период на локальном уровне. Во время полевых исследований проведены интервью с административными работниками районов, главами сельских поселений, руководителями и работниками сельскохозяйственных предприятий, старожилами.

Вторая группа – материалы Росстата и муниципальной статистики, включая итоги переписей населения и текущий учет населения, данные похозяйственных книг, а также характеристики сельских населенных пунктов за разные годы, взятые из дореволюционных и советских публикаций [Население …, 2013, с. 209; Список …, 1902, с. 143]. В Федоровском ЗАГСе получены данные статистики браков на начало 2000-х гг.

Обсуждение результатов исследования. Для анализа и понимания механизмов трансформации сельского расселения на локальном уровне одним из важнейших факторов является историко-географический, в частности, история хозяйственного освоения данной территории. На начальных стадиях становления системы расселения не менее важную роль играет физико-географический фактор. Внимание обращено и на трансформацию роли позицион-

Таблица 1

Характеристика сельского расселения районов исследования

Характеристики	Год	Республика Башкирия	Республика Марий Эл	
		Федоровский район	Мари-Турекский район	Параньгинский район
Плотность сельского населения, чел/км^2	2019	10,1 (*Справочно:* в целом по региону – 10,6)	10,3 (*Справочно:* в целом по региону – 9,71)	
Зональные черты сельского расселения		Сплошное освоение, средне- и крупноселенное	Сплошное освоение, мелко-среднеселенное	
Численность населения, тыс. человек	2019	16,4	8,9	14,9
Падение численности сельского населения, в %	1989–2019	–16,2	–27,2	–28,9
Время возникновения устойчивой сети сельского расселения		1850–1890 гг.	XVIII–XIX вв.	
Средняя людность СНП по району, человек	2010	274	151 (168)	193 (205)
Средняя людность СНП района по этносам, человек	2010	Башкиры – 468 Татары – 312 Чуваши – 196 Мордва – 120 Русские – 89	Русские – 171 (212) Удмурты – 153 (172) Марийцы – 150 (153) Татары – 98 (114)*	Татары – 323 (324) Марийцы – 194 (202) Русские – 104 (112)
Этническая структура населения районов, %	2010	Татары – 31,9 Русские – 23,1 Башкиры – 20,0 Чуваши – 12,2 Мордва – 10,4	Марийцы – 50,0 Русские – 24,8 Татары – 18,5 Удмурты – 5,9	Татары – 47,8 Марийцы – 43,5 Русские – 8,1

Примечание. * В скобках представлена средняя людность сельских населенных пунктов (СНП) без учета населенных пунктов без населения. Составлено по полевым материалам и данным переписей населения 1989 и 2010 гг., данные на 2019 г. приведены по сведениям Росстата [Численность …, 2020].

ного фактора, в частности, транспортно-географического положения.

В ходе рассмотрения трансформации сельского расселения помимо этнокультурного фактора немаловажная роль уделяется демографическим характеристикам, миграционному поведению, скорости прохождения демографического перехода у разных этнических групп. Влияние этнокультурных особенностей населения на сельское расселение опосредовано другими факторами.

По итогам исследования выделено *три обобщенные стадии развития сельского расселения* в изучаемых регионах с точки зрения взаимодействия этнокультурного фактора с другими:

– формирование сети сельских поселений;

– развитие и структурирование системы сельского расселения в условиях положительной динамики численности жителей;

– трансформация сельского расселения в условиях суженного воспроизводства населения, роста территориальной подвижности жителей, усиления и мобилизации этнического самосознания.

На *первой стадии, в процессе формирования сети* сельского расселения большое значение имеют традиционные хозяйственные навыки этнической группы, определяющие ее ландшафтные предпочтения, которые в каждой конкретной ситуации корректируются с учетом наличия других претендентов на данную территорию, обстоятельств и времени проникновения этнической группы в регион.

Башкирия. В пределах современных границ Фёдоровского района отмечается сочетание территорий с различными физико-географическими условиями – от Бугульмино-Белебеевской возвышенности на севере и западе района до Предуральской лесостепной зоны на юге и востоке.

Формирование устойчивой сети сельских населенных пунктов в пределах современных границ республики Башкортостан приходится на конец XVII – начало XVIII вв. Заселение малолюдных земель осуществлялось выходцами из Центральной России и пестрого в этническом отношении Поволжья.

Изначально были освоены более благоприятные для ведения хозяйства равнинные пространства: первые деревни с преимущественно *башкирским* населением появились вдоль среднего течения реки Ашкадар. Пришлое население, разнородное по этническому составу, осваивало земли с менее благоприятными природными условиями на севере и западе района по границам башкирского ареала, в первую очередь используя угодья вдоль рек, где и возникло большинство населенных пунктов (рис. 1).

На первой стадии эволюции системы расселения возникали изолированные друг от друга, «опор-

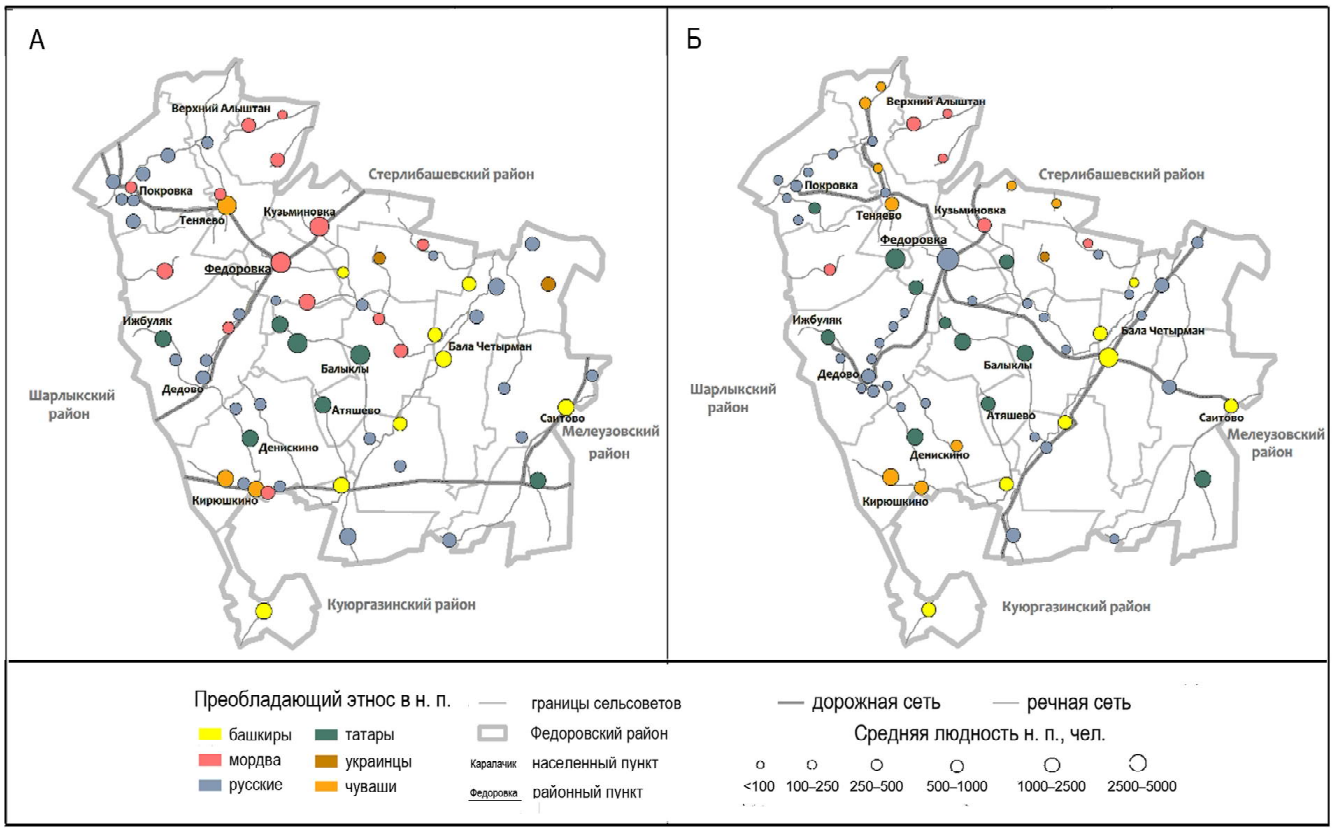

Рис. 1. Сеть населенных пунктов Федоровского района Башкирии в 1902 и 2010 гг. *Источник*: составлено авторами по данным [Список населенных …, 1902; Население …, 2013]

Fig. 1. Rural settlements network of Fyodorovsky district, Bashkortostan, in 1902 (left) and 2010 (right). Compiled by the authors after [Spisok naselennyh ..., 1902; Naselenie ..., 2013]

ные» для будущего освоения территории, населенные пункты. «Оседанию» *мордвы* в пределах лесистого севера и запада района (д. Алёшкино, Федоровка, Кузьминовка), кроме имевшегося у этой этнической группы опыта ведения хозяйства в аналогичных условиях, способствовало и сочетание ряда других факторов как этнопсихологических (склонность к скрытному образу жизни), так и условно объективных обстоятельств (наступление осени во время поиска нового местожительства).

Татары заселили центральную и западную часть района в связи с быстро нараставшим дефицитом свободных земель на востоке. Татарские деревни были малолюдными и тяготели к водным источникам – многочисленным родникам и рекам района (д. Акбулат, Балыклыбашево, Денискино). Часть татар по причине религиозной и культурной близости селилась в башкирских деревнях, в результате чего образовалось две достаточно крупные этнически смешанные деревни – Балыклы и Атяшево (см. рис. 1).

В начале XVIII в. отмечается появление первых *чувашских* деревень (Кирюшкино).

Русские поселения основаны в 1720–1740 гг., выходцами из поволжских и черноземных губерний (Пензенской, Самарской, Тамбовской). Сеть поселений русских, имевших более широкий спектр занятий, покрывает район наиболее равномерно.

Марий Эл. Территория современных Параньгинского и Мари-Турекского районов исторически находилась на юго-восточной границе ареала расселения луговых марийцев, на южных отрогах Вятских увалов. Значительная часть *марийских* деревень возникла еще в XVII–XIX вв.

Русские крестьяне переселялись сюда из более северных уездов Вятской губернии, с юга на эту территорию пришли *татары* (рис. 2). В русских СНП, возникших на периферии лесной зоны, были развиты лесные промыслы [Эколого-географический атлас …, 2020]. Татары концентрировались вдоль торговых трактов.

В 1891 г. в пределах двух современных районов в марийских населенных пунктах проживало 15,5 тыс., в русских – 17,7 тыс., в татарских – 10,4 тыс., в удмуртских – 1,2 тыс. человек [Старостин, 2020].

Средняя людность СНП также имеет этническую специфику, связанную с особенностями хозяйства: в среднем татарском населенном пункте проживало 305 человек, марийском – 171, русском – 158.

Примерно в трети русских деревень в 1917 г. располагались небольшие промышленные предприятия:

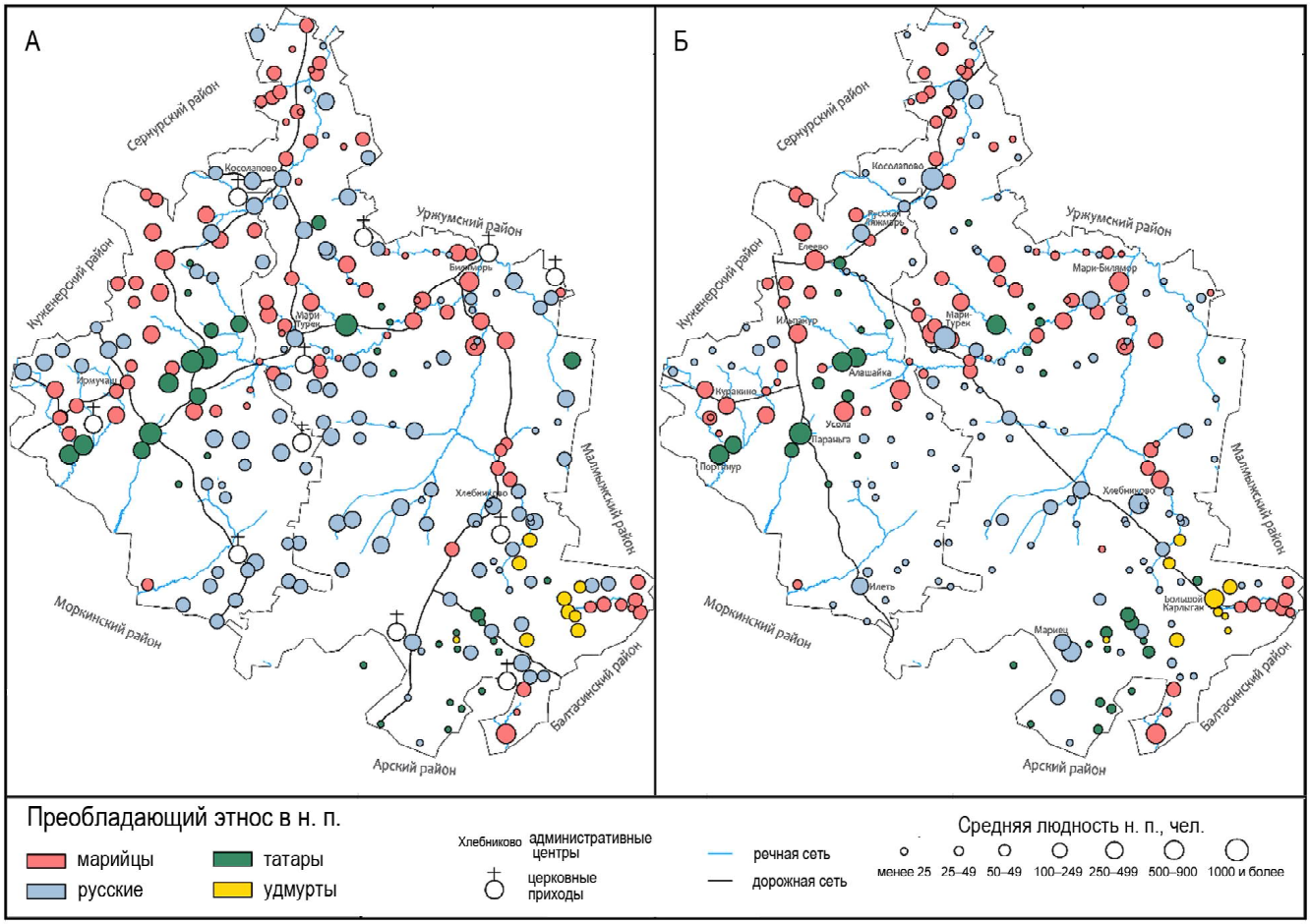

Рис. 2. Сеть населенных пунктов Мари-Турекского и Параньгинского районов Марий Эл в 1891 и 2010 гг. *Источник*: составлено авторами по данным [Родная Вятка, 2020]

Fig. 2. Rural settlements network of Mari-Tureksky and Paranginsky districts, Mari El, in 1891 and 2010. Compiled by the authors after [Rodnay Vyatka, 2020]

смолокурни, кирпичные заводы, маслобойни, чего практически не было в марийских населенных пунктах.

В татарских селах распространенность промыслов была чуть выше, чем в марийских. Только в одной татарской деревне была смолокурня, в остальных занимались преимущественно переработкой сельскохозяйственной продукции [Информационный ресурс, 2020].

На *второй стадии* в процессе *развития и структурирования системы сельского расселения* ощутимо взаимодействие этнокультурного фактора с транспортным, позиционным и институциональным. Первые два дают этнической группе дополнительные преимущества в случае формирования в пределах ареала ее расселения устойчивой сети крупных поселений, как правило, хозяйственных или межхозяйственных центров обслуживания.

Башкирия. Пика развития сеть сельского расселения Федоровского района достигла в предвоенный период. Позднее, проводившаяся в 1960–1970 гг. кампания ликвидации неперспективных СНП привела к исчезновению почти 50 деревень. Это малочисленные русские, мордовские и чувашские деревни (62%, 15% и 15%, соответственно), в меньшей степени татарские и башкирские. Данный процесс привел к усилению миграции русского населения в близлежащие города (Мелеуз, Салават, Стерлитамак) и снижению их доли в сельском населении района.

Устойчивое к внешним факторам расселение характерно для татар, башкир и чувашей. Если к середине XVIII в. татарское население было меньшинством и концентрировалось в основном на северо-западе района, на современном этапе оно представлено практически везде. Татарские села характеризуются большей людностью и имеют смещенную в сторону пожилых возрастов возрастно-половую структуру жителей в связи с оттоком населения в ближайшие экономические центры.

Расселение башкир осталось неизменным из-за многолюдности сел и особенностей хозяйствования (разведение скота не требовало создания хуторской сети). В настоящее время система расселения района преимущественно представлена крупными и средними по людности населенными пунктами, основанными во второй половине XIX вв. (рис. 3).

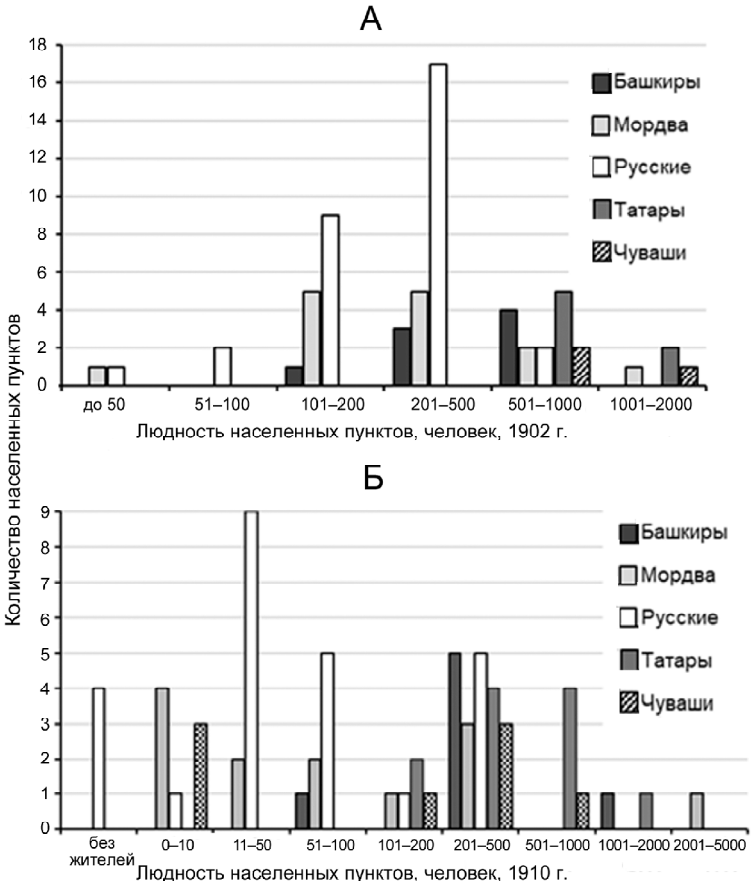

Рис. 3. Распределение СНП разной людности в Федоровском районе Башкирии в зависимости от преобладающего этноса в 1902 (А) и 2010 (Б) гг., составлено авторами по данным [Список населенных …, 1902; Население …, 2013]

Fig. 3. The size distribution of rural settlements in Fyodorovsky district by dominant ethnicity in 1902 (A) and 2010 (Б). Compiled by the authors after [Spisok naselennih ... 1902; Naselenie ..., 2013]

Сочетание многолюдности, административного статуса, транзитного положения, концентрации социальной инфраструктуры и экономической жизни определило сохранение опорной сети населенных пунктов в советский и современный периоды.

Марий Эл. В процессе развития системы сельского расселения в республике наличие местной промышленности, обусловленное этнической спецификой, стало фактором «выживаемости» сельских населенных пунктов. При равномерном распределении людности СНП и прочих равных условиях в тех селах, где имелись предприятия, темпы депопуляции в XX в. были ниже (20% против 70% в русских населенных пунктах за 1891–2010 гг.).

Наличие промышленной переработки способствовало повышению роли в иерархии населенных пунктов, что обусловливало размещение в них центральных усадеб колхозов. Тем не менее, судьба всей местной промышленности была печальной. Многих крестьян с собственными промыслами раскулачили, производства в колхозах были закрыты в советское время, последний стекольный завод в поселке Мариец прекратил работу в 2010 г.

В советское время построена железная дорога, соединившая Зеленодольск и Яранск и проходившая через Йошкар-Олу. Дорога стала важным элементом системы расселения поскольку вдоль нее возникли лесозаготовительные и обслуживающие дорогу поселки.

В результате коллективизации на территории региона образовалась сеть колхозов, постепенное сокращение которой началось в 1950-е гг. Количество колхозов и совхозов сократилось с 614 в 1952 г. до 177 и 170 в 1974 и 1986 гг., соответственно [Родная Вятка, 2020]. Этот процесс сопровождался деградацией сферы услуг и депопуляцией сельской местности, однако, в Марийской АССР отток населения в город происходил медленнее, чем, например, в соседней Кировской области.

Административная иерархия на территории Параньгинского и Мари-Турекского районов среди прочего обусловлена и этнической спецификой. В связи с переселением русских в середине XIX в. началось строительство церквей и открытие приходов, которые, как правило, располагались в русских населенных пунктах. В дальнейшем центры приходов стали центрами сельсоветов. «Унаследованность» административной иерархии прослеживается до сих пор: в пяти из шести современных центров муниципальных образований в Мари-Турекском районе и в двух из девяти в Параньгинском находились приходы. В татарских населенных пунктах имелась аналогичная иерархия, связанная с расположением мечетей. Однако, за счет достаточно компактного расселения и «неподкрепленности» религиозных функций административными многие исторические мусульманские центры с мечетями и образовательными учреждениями к настоящему времени либо исчезли, либо уменьшились в размерах.

В среднем за период 1891–1980 гг. средняя людность населенных пунктов, лишившихся центральной усадьбы, сократилась на 35%, средняя людность центральных усадеб, которые не подверглись укрупнению, выросла за тот же период на 118%, а людность СНП, которые не были центрами колхозов, не изменилась за сто лет.

Утрата административной функции обусловила сжатие сферы обслуживания и стимулировала отток населения. За 1980–2010 гг. численность населения в «разжалованных» усадьбах сократилась на 83%, 28% и 72% в русских, марийских и татарских населенных пунктах, соответственно [Чучкалов, Алексеев, 2020]. Укрупнение сельскохозяйственных организаций сильнее «ударило» именно по русским и татарским деревням. А марийцы как коренное население оказались менее подвижны и более устойчивы к трансформации сети услуг, происходившей в шестидесятые годы (рис. 4).

Третья стадия – более сложная по характеру процессов, это – трансформация сельского расселе-

ния в условиях роста депопуляции и миграционного оттока из сельской местности. Значимым становится взаимодействие этнокультурного и геодемографического факторов. Третья стадия может быть разделена на два этапа.

Первый – стартовал в начале 1960-х гг., когда стала сильнее проявляться и нарастать дифференциация этносов по скорости и результатам прохождения демографического перехода, а также уровню их территориальной мобильности.

Второй – начался после 1991 г. Он охватывает постсоветский период, когда после прекращения государственной поддержки коллективного сельского хозяйства и сельской социальной сферы различия базовых элементов этнической культуры и степени сплоченности этнических групп стали оказывать ключевое влияние на динамику сельского расселения в полиэтничных регионах.

Башкирия. К настоящему времени население Федоровского района по сравнению с началом XX в. сократилось практически в два раза. Уменьшение численности и количества СНП наряду с русскими коснулось, прежде всего, *мордвы* (см. рис. 1, 3). Положение мордовских деревень дополнительно ухудшилось в связи с усилением ассимиляционных процессов, что привело к трансформации этнической структуры части деревень, ранее населяемых этим народом. Например, «мордовская» Федоровка стала селом с преобладанием русского и татарского населения.

Система расселения чувашских деревень претерпела укрупнение сел на юго-западе района и ликвидацию малолюдных деревень на границе с Стерлибашевским районом, но, в отличие от мордвы, сохранила людность СНП, благодаря более высокому коэффициенту рождаемости и «привязанности к земле» местных жителей (Кирюшкино, Веселовка, Теняево). Высокая роль этнодемографического фактора прослеживается в сохранении людности отдельных СНП у башкир из-за высоких показателей естественного прироста, а таже таких психологических универсалий, как консервативность, традиционализм, «связь с родной землей».

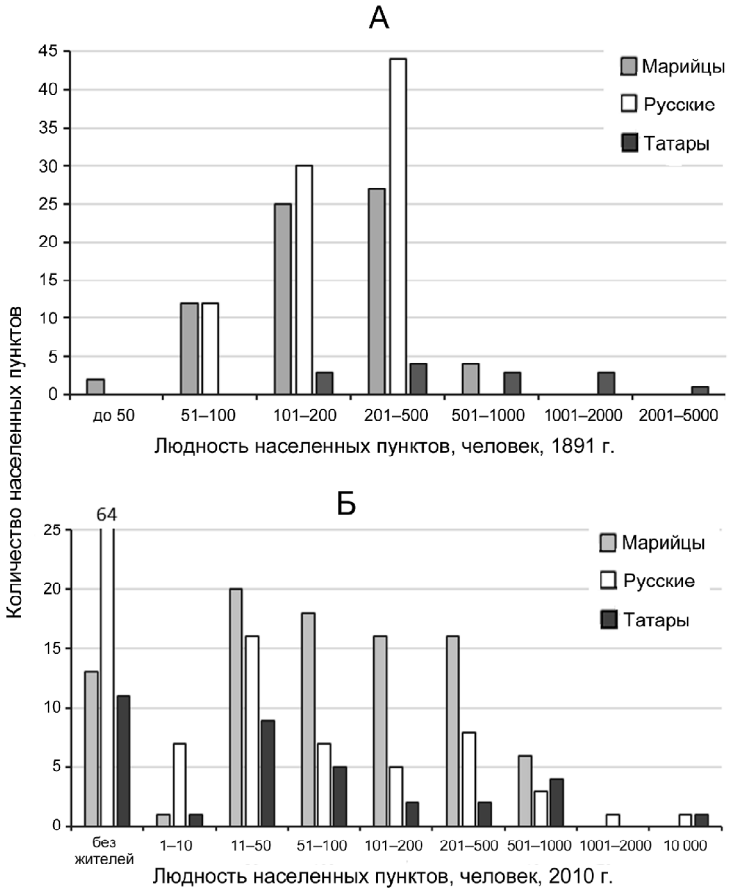

Рис. 4. Распределение СНП разной людности в Мари-Турекском и Параньгинском районах Марий Эл в зависимости от преобладающего этноса в 1891 (А) и 2010 (Б) гг. Составлено авторами по данным [Родная Вятка, 2020]

Fig. 4. The size distribution of rural settlements in Mari-Turekskу and Paranginsky districts by dominant ethnicity in 1901 (A) and 2010 (Б). Compiled by the authors after [Rodnay Vyatka, 2020]

Одним из индикаторов, используемых для оценки *сплоченности этнических групп*, является *доля межэтнических браков* [Сусоколов, 1987; Лурье, 2018]. Для изучения взаимодействия населения в брачном отношении использована статистика районного отделения ЗАГСа за 2003 г., объясняющая динамику численности населения СНП с преобладанием среди жителей представителей разных этносов[5] (табл. 2).

Максимальное взаимодействие с представителями других этносов характерно для *мордвы*, имеющей самую высокую долю национально-смешанных браков. Внутри этнической группы существует территориальная дифференциация. Мордовское население, родившиеся в райцентре, в большей степени подвержено ассимиляции, нежели население окрестных деревень (Алешкино и Верхний Алыштан), жители которых заключают моноэтничные браки. В заключении браков между мордвой и местными татарами/чувашами важную роль играет соседское положение населенных пунктов относительно друг друга (например, д. Татарский Сухой Изяк и Теняво/Верхний Алыштан, Алешкино/Гончаровка).

Минимальные значения смешанных браков характерны для *чувашского* населения. По частоте взаимодействия представителей чувашских населенных пунктов между собой можно условно выделить три совокупности деревень – на юге, севере и

[5] Более свежий материал не представляет интереса в исследовании в связи с достаточно низкой долей браков с указанием этнической идентичности супругов, что могло бы исказить конечные результаты.

Таблица 2

Структура межэтнических браков в Федоровском районе Республики Башкирия в 2003 г., %

Этносы	Чуваши	Татары	Русские	Башкиры	Мордва
Чуваши	**62,5**	6,1	4,4	5,4	10,0
Татары	15,6	**43,9**	20	64,9	23,3
Русские	6,3	11,0	**33,3**	5,4	50,0
Башкиры	6,3	29,3	4,4	**18,9**	3,3
Мордва	9,4	8,5	33,3	2,7	**13,3**
Другие	0,0	1,2	4,4	2,7	0,0
Всего	100	100	100	100	100

Источник: данные отдела ЗАГС Федоровского района, 2003 г. Материалы полевых исследований.

северо-западе района (Веселовка, Новоселка, Кирюшкино/Маганевка, Улядаровка, Орловка/Теняево). Формирование групп обусловлено их удаленностью относительно друг от друга и субэтническими различиями между верховыми чувашами на севере и низовыми – на юге. Географический фактор в данном случае сыграл значительную роль – он предотвратил возможную консолидацию чувашского населения.

Башкирское население активно взаимодействует с прочими этносами (более 80% смешанных браков), в первую очередь с представителями неместного татарского населения. Большая часть подобных семей в будущем проживает в крупных городах, что приводит к увеличению влияния города: возрастает роль городского образа жизни, утрачивается часть черт этнической идентичности.

Высокий уровень смешанных браков характерен для *русского* населения (более 2/3 всех браков), которые вступают в брак с мордвой и татарами. В территориальном разрезе в браках, где оба супруга родились в пределах района, активнее взаимодействует между собой население близлежащих деревень, райцентра и прочих деревень района. Райцентр – место контактов жителей различных деревень, в результате чего происходит постепенное уменьшение влияния традиций, ведущее к стиранию этнических границ.

Исключение составляет *татарское население*, устойчивое к внешним факторам в силу своей многочисленности и большим возможностям выбора брачного партнера из числа представителей своего этноса. У татар максимальное взаимодействие наблюдается с башкирами (почти треть браков). Реальная доля татарско-башкирских браков, заключенных уроженцами Фёдоровского района, ниже, около 20%: часть смешанных браков заключается в крупных полиэтничных СНП и городах.

Марий Эл. Высокая мобильность русского населения, подчеркнутая и в глубинных интервью, обусловлена слабой укорененностью русского населения на территории Мари-Турекского и Параньгинского районов. Значительная часть русских деревень основана переселенцами в середине XIX в. Поэтому отток русских из сельской местности происходил быстрее и легче, чем у марийцев, коренного населения. Русские оказались сильнее вовлечены в отходничество и промыслы, что способствовало урбанизации.

Вот как об этом сказано в беседе во время полевых исследований:

«*Русские – они легко встают и уходят. Это марийца с корнями выдирать надо из деревни. Их тяжело вытаскивать, и марийские деревни еще живут. А русские – бросили, встали, ушли*». (Женщина, пенсионерка, бывший сотрудник краеведческого музея. Июнь, 2019 г., Мари-Турек).

Среди татар отходничество тоже было распространено, однако, за счет большей людности татарских населенных пунктов «вымывание» населения происходило меньшими темпами. Всего за период с 1891–2010 гг. доля русских сельских населенных пунктов (без райцентров: татарской Параньги и Мари-Турека, обладающего смешанным русско-марийским населением) в населении сократилась с 43,6 до 30,6%, причем основное сокращение пришлось на советский период и было связано с более быстрой и ранней урбанизацией у русских (см. рис. 2, 4).

Выводы:

– этническая структура населения относится к числу значимых, но не стандартных факторов трансформации сельского расселения: она проявляется с разной интенсивностью во взаимодействии с другими факторами – естественно- и историко-географическим, позиционным, геодемографическим. Ее роль связана с адаптацией традиционного хозяйства этнических групп к ландшафтным особенностям территории, местом, которое сумели занять СНП с доминированием разных этносов в иерархии центров обслуживания, степенью вовлеченности представителей этнических групп в миграции и характером прохождения демографического перехода;

– влияние этнокультурного фактора сильнее проявляется на начальной и на более зрелой стадиях развития сельского расселения – в процессе формирования сети поселений и после прохождения большинством этнических групп демографического перехода;

– взаимосвязь этнокультурного и позиционного факторов избирательна. На юго-востоке Марий Эл он «работает» у русских и татар, для которых потеря их СНП статуса центра колхоза и сопутствующего набора услуг стала причиной оттока населения;

– миграционный фактор в полиэтничных регионах также имеет этническую проекцию. На юго-западе Башкирии миграции в наибольшей степени повлияли на сжатие системы расселения русских. В Марий Эл сокращение их доли в населении сочеталось с замещением марийцами в рамках иерархических миграций из менее крупных деревень в центры сельских поселений;

– в последние десятилетия актуализация и усиление этнической идентичности вывели этнокультур-

ный фактор на первый план. Условием сохранения жизнеспособности очагов сельского расселения на низовом уровне становится степень сохранности элементов традиционной культуры, индикаторами которой выступают национально-смешанные браки и связи в рамках сельско-городских сообществ.

Благодарности. Исследование проведено при финансовой поддержке проектов РФФИ (проект № 18-05-00394, проект № 18-011-00725).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев А.И., Сафронов С.Г. Типология сельских населенных пунктов Европейской части России в современной демографической и социально-экономической ситуации // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2017. № 6. С. 55–61.

Алексеев А.И., Сафронов С.Г., Савоскул М.С. Отечественная география населения в постсоветский период: основные направления и тренды их развития // Региональные исследования. 2016. № 2(52). С. 55–65.

Алексеев А.И., Сафронов С.Г., Савоскул М.С., Кузнецова Г.Ю. Основные тенденции эволюции сельского расселения России в XX – начале XXI вв. // ЭКО. 2019. № 4(538). С. 26–49.

Ахмедова Ж.А. Особенности сельского расселения в горно-предгорном Дагестане // Региональные проблемы преобразования экономики. 2013. № 4. С. 310–314.

Белозеров В.С. Этническая карта Северного Кавказа. М.: ОГИ, 2005. 298 с.

Вихрёв О.В., Ткаченко А.А., Фомкина А.А. Системы сельского расселения и их центры (на примере Тверской области) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2016. № 2. С. 30–37.

Герасименко Т.И., Гладкий И.Ю. Быть ли этноландшафтной экологии? // Изв. РГО. 2005. Т. 137. № 1. С. 62–67.

Емельянов Д.А. Тенденции трансформации сельского расселения в Ярославском Верхневолжье: этнодемографический аспект // Ярославский педагогический вестник. 2012. Т. 3. № 4. С. 251–257.

Зубаревич Н.В. Трансформация сельского расселения и сети услуг в сельской местности // Известия РАН. Серия географическая. 2013. № 3. С. 26–38.

Корнишина Г.А. Этнические процессы в среде современного мордовского населения Заволжья // ГУМАНИТАРИЙ: актуальные проблемы гуманитарной науки и образования. 2015. № 4(32). С 17–25.

Лекомцев А.Л. Географические факторы расселения народов Удмуртии // Ежегодник финно-угорских исследований. 2012. № 3. С. 112–116.

Лурье С.В. Межэтнические браки в современном российском национальном сценарии // Петербургская социология сегодня. 2018. № 10. С. 122–148.

Мустафин М.Р., Рубцов В.А. Этнические аспекты расселения в Поволжском регионе // Вестник Чувашского университета. 2012. № 3. С. 76–81.

Нефедова Т.Г. Факторы и тенденции изменения сельского расселения в России // Вестник Ассоциации российских географов-обществоведов. 2018. № 7. С. 4–20.

Нефедова Т.Г. Занятость и отходничество населения в Ставропольском крае // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2015. № 2. С. 93–100.

Нефедова Т.Г. Десять актуальных вопросов о сельской России: ответы географа. М.: УРСС, 2012а. С. 180–187.

Нефедова Т.Г. Основные тенденции изменения социально-экономического пространства сельской России // Известия РАН. Серия географическая. 2012б. № 3. С. 5–21.

Население Республики Башкортостан по данным Всероссийской переписи населения 2010 г.: статистический сборник // Уфа: Башкортостанстат, 2013. 222 с.

Список населенных пунктов Стерлитамакского уезда // Стерлитамак: Типография А.В. Кузнецовой, 1902. 143 с.

Сусоколов А.А. Межнациональные браки в СССР. М.: Мысль, 1987. 142 с.

Ткаченко А.А., Смирнов И.П., Смирнова А.А. Трансформация сети центров сельского расселения в низовом районе Центральной России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2019. № 2. С. 78–85.

Фомкина А.А. Трансформация сельских систем расселения в староосвоенном Нечерноземье с конца XIX до начала XXI в. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2017. № 5. С. 68–75.

Чучкалов А.С., Алексеев А.И. Эффект колеи в эволюции сельских населенных пунктов Республики Марий Эл // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2020. № 2. С. 53–65.

Шелудков А.В., Орлов М.А. Топология сети населенных пунктов как фактор динамики сельского расселения (на примере Тюменской области) // Известия РАН. Серия географическая. 2019. № 4. С. 46–62.

Эльдаров Э.М. Дагестан: факторы развития сельской системы расселения в постсоветский период // Кавказ & Глобализация. 2008. Том 2. № 1. С. 105–115.

Электронные ресурсы

Информационный ресурс республики Марий Эл «12rus.ru». URL: http://www.12rus.ru (дата обращения 22.07.2020).

Родная Вятка: краеведческий портал. URL: https://rodnaya-vyatka.ru/ (дата обращения 22.07.2020).

Старостин А.В. Книга вятских родов. URL: https://rodnaya-vyatka.ru/ (дата обращения 22.07.2020).

Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям: статистический бюллетень. М.: Росстат, 2020. URL: http://www.gks.ru/free_doc/doc_2019/bul_dr/mun_obr2019.rar (дата обращения 10.07.2020).

Эколого-географический атлас республики Марий Эл. URL: http://reo12.рф/atlas/ (дата обращения 22.07.2020).

Поступила в редакцию 19.08.2020
После доработки 23.08.2020
Принята к публикации 25.08.2020

L.R. Imangulov[1], M.R. Maximenko[2],
M.S. Savoskul[3], S.S. Safronov[4]

THE INFLUENCE OF ETHNOCULTURAL FACTOR ON THE EVOLUTION OF RURAL SETTLEMENT PATTERNS (CASE STUDY OF THE POLYETHNIC REGIONS OF BASHKIRIA AND MARI EL)

The article reviews the stages of rural settlement patterns transformation for a long period by the cases of several municipalities of Mari El (Paranginsky and Mari-Tureksky) and Bashkortostan (Fyodorosky). The objects of the study are polyethnic regions. The rural districts under study are traditionally inhabited by Bashkir, Mari, Russian, Tatar, Chuvash, Udmurt and Mordva peoples. The emphasis of the study was on the ethnic and cultural impacts on rural settlement patterns transformation. It was analyzed with due consideration of specific features of the history of settlement, economic practices of different ethnic groups, demographic and migration behavior, stages of demographic transition and participation in urbanization. Mechanisms of the effect of different factors causing the transformation of the rural settlement network patterns were revealed at the local level, namely physical-geographical factor (at the early stages of settlement), positional (especially transport-geographical which was important during the next periods), demographic (defining the population numbers in rural settlements), institutional (more pronounced during the Soviet period). All factors were analyzed in terms of the ethnic composition of the population. Three stages of rural settlement evolution under ethnic and cultural factors interactions with other ones were identified, i. e. formation of rural settlement network; development of the rural settlement system under positive dynamics of population; transformation of rural settlement network under depopulation, growing territorial mobility of people and the ethnic identity raising. Cultural elements define the vision of the territory by ethnic groups and influence both personal and collective decisions principal for the rural settlement pattern development.

Key words: rural communities, factors of settlement dynamics, ethnic composition of population

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-05-00394, project no. 18-011-00725).

REFERENCES

Ahmedova Zh.A. Osobennosti sel'skogo rasseleniya v gorno-predgornom Dagestane [Features of rural settlement in the mountain foothills of Dagestan] *Regional'nye problemy preobrazovaniya ekonomiki*, 2013, no. 4, p. 310–314. (In Russian)

Alekseev A.I., Safronov S.G. Tipologiya sel'skih naselennyh punktov Evropejskoj chasti Rossii v sovremennoj demograficheskoj i social'no-ekonomicheskoj situacii [Typology of rural settlements in the European part of Russia under recent demographic and socio-economic situation]. *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2017, no. 6, p. 55–61. (In Russian)

Alekseev A.I., Safronov S.G., Savoskul M.S. Otechestvennaya geografiya naseleniya v postsovetskij period: osnovnye napravleniya i trendy ih razvitiya [Geography of population in Russia during the post-Soviet period: the main directions and trends of their development]. *Regional'nye issledovaniya*, 2016, no. 2(52), p. 55–65. (In Russian)

Alekseev A.I., Safronov S.G., Savoskul M.S., Kuznecova G.YU. Osnovnye tendencii evolyucii sel'skogo rasseleniya Rossii v XX – nachale XXI vv. [The main trends in the evolution of rural settlement in Russia in the 20th-early 21st centuries]. *EKO*, 2019, no. 4(538), p. 26–49. (In Russian)

Belozerov V.S. Etnicheskaya karta Severnogo Kavkaza [Ethnic map of the North Caucasus]. Moscow, OGI Publ., 2005, 298 p. (In Russian)

Chuchkalov A.S., Alekseev A.I. Effekt kolei v evolyucii sel'skih naselennyh punktov Respubliki Marij El [The gauge effect in the evolution of rural settlements in the Republic of Mari El]. *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.,* 2020, no. 2, p. 53–65. (In Russian)

El'darov E.M. Dagestan: faktory razvitiya sel'skoj sistemy rasseleniya v postsovetskij period [Dagestan: factors of development of the rural settlement system in the post-Soviet period]. *Kavkaz&Globalizaciya*, 2008, vol. 2, no. 1, p. 105–115. (In Russian)

Emel'yanov D.A. Tendencii transformacii sel'skogo rasseleniya v Yaroslavskom Verhnevolzh'e: etnodemograficheskij aspect [Trends of transformation of rural settlement in the Yaroslavl part of the Upper Volga River region: ethnodemographic aspect]. *Yaroslavskij pedagogicheskij vestnik*, 2012, vol. 3, no. 4, p. 251–257. (In Russian)

Fomkina A.A. Transformaciya sel'skih sistem rasseleniya v staroosvoennom Nechernozem'e s konca XIX do nachala XXI v. [Transformation of rural settlement systems in the old-developed Non-Chernozem area (from the end of the 19th to the beginning of the 21st century]. *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2017, no. 5, p. 68–75. (In Russian)

Gerasimenko T.I., Gladky I.Yu. Byt' li etno-landshaftnoj ekologii? [To be or not for ethno-landscape ecology]. *Izvestia RGO*, 2005, vol. 137, no. 1, p. 62–67 (In Russian)

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Economic and Social Geography of Russia, student; *e-mail*: linar.imangulov.1999@mail.ru

[2] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Economic and Social Geography of Russia, bachelor; *e-mail*: mikemaksimenko@gmail.com

[3] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Economic and Social Geography of Russia, Head of the Department, Associate Professor, D.Sc. in Geography; *e-mail*: savoskul@yandex.ru

[4] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Economic and Social Geography of Russia, Associate Professor, PhD in Geography; *e-mail*: saffff@mail.ru

Kornishina G.A. Etnicheskie processy v srede sovremennogo mordovskogo naseleniya Zavolzh'ya [Ethnic processes within the present-day Mordovian population of the TransVolga region]. *GUMANITARIJ: aktual'nye problemy gumanitarnoj nauki i obrazovaniya*, 2015, no. 4(32), p. 17–25. (In Russian)

Lekomcev A.L. Geograficheskie faktory rasselenija narodov Udmurtii [Geographical factors of the settlement of peoples in Udmurtia]. *Ezhegodnik finno-ugorskih issledovanij*, 2012, no. 3, p. 112–116. (In Russian)

Lur'e S.V. Mezhetnicheskie braki v sovremennom rossijskom nacional'nom scenarii [Interethnic marriages in the modern Russian national scenario]. *Peterburgskaja sociologija segodnja*, 2018, no. 10, p. 122–148. (In Russian)

Mustafin M.R., Rubcov V.A. Etnicheskie aspekty rasseleniya v Povolzhskom regione [Ethnic aspects of settlement in the Volga River region]. *Vestn. Chuvashskogo un-ta,* 2012, no. 3, 76–81. (In Russian)

Naselenie Respubliki Bashkortostan po dannym Vserossiiskoi perepisi naseleniya 2010 g.: statisticheskii sbornik [Population of the Republic of Bashkortostan according to 2010 All-Russian Population Census: statistical collection]. Ufa, Bashkortostanstat Publ., 2013, 222 p. (In Russian)

Nefedova T.G. Desyat' aktual'nyh voprosov o sel'skoj Rossii: otvety geografa [Ten topical questions about rural Russia: geographer's answers]. Moscow, URSS Publ., 2012, p. 180–187. (In Russian)

Nefedova T.G. Faktory i tendencii izmeneniya sel'skogo rasseleniya v Rossii [Factors and trends in rural settlement in Russia]. *Vestnik Associacii rossijskih geografov-obshchestvovedov*, 2018, no. 7, p. 4–20. (In Russian)

Nefedova T.G. Osnovnye tendencii izmeneniya social'no-ekonomicheskogo prostranstva sel'skoj Rossii [Main trends for changes in the socioeconomic space of rural Russia]. *Izvestiya RAN, ser. geogr.,* 2012, no. 3, p. 5–21. (In Russian)

Nefedova T.G. Zanyatost' i othodnichestvo naseleniya v Stavropol'skom krae [Employment of population and a phenomenon of seasonal work in the Stavropol Krai]. *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr*., 2015, no. 2, p. 93–100. (In Russian)

Sheludkov A.V., Orlov M.A. Topologiya seti naselennyh punktov kak faktor dinamiki sel'skogo rasseleniya (na primere Tyumenskoj oblasti) [Settlement network topology as a factor of rural population dynamics (a case study of Tyumen Oblast)] *Izvestiya RAN. Ser. geogr.*, 2019, no. 4, p. 46–62. (In Russian)

Spisok naselennyh punktov Sterlitamakskogo uezda [List of localities of the Sterlitamak County]. Sterlitamak: Tipografiya A.V. Kuznecovoj Publ., 1902, 143 p. (In Russian)

Susokolov A.A. Mezhnacional'nye braki v SSSR [Intermarriages in the USSR]. Moscow, Mysl' Publ., 1987, 142 p. (In Russian)

Tkachenko A.A., Smirnov I.P., Smirnova A.A. Transformaciya seti centrov sel'skogo rasseleniya v nizovom rajone Central'noj Rossii [Transformation of the rural settlement centers network in a municipal district of Central Russia]. *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr*., 2019, no. 2, p. 78–85. (In Russian)

Vihryov O.V., Tkachenko A.A., Fomkina A.A. Sistemy sel'skogo rasseleniya i ih centry (na primere Tverskoj oblasti) [Rural settlement systems and their centers (case study of the Tver region)] *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr*., 2016, no. 2, p. 30–37. (In Russian)

Zubarevich N.V. Transformaciya sel'skogo rasseleniya i seti uslug v sel'skoj mestnosti [Transformation of rural settlement pattern and service networks in rural areas]. *Izvestiya RAN, Ser. Geogr*., 2013, no. 3, p. 26–38. (In Russian)

Web sources

Chislennost' naselenija Rossijskoj Federacii po municipal'nym obrazovanijam: statisticheskij bjulleten'. M.: Rosstat, 2020. [Population of the Russian Federation by municipalities: statistical bulletin], URL: http://www.gks.ru/free_doc/doc_2019/bul_dr/mun_obr2019.ra (access date 10.07.2020). (In Russian)

Ekologo-geograficheskij atlas respubliki Marij El [Ecological and geographical Atlas of the Republic of Mari El], URL: https://geo12.rf (access date 22.07.2020). (In Russian)

Informacionnyj resurs respubliki Marij El «12rus.ru» [Information resource of the Republic of Mari El «12rus, ru»], URL: http://www.12rus.ru/ (access date 22.07.2020). (In Russian)

Rodnaya Vyatka [A Native of Vyatka], URL: https://rodnaya-vyatka.ru/ (access date 22.07.2020). (In Russian)

Starostin A.V. Kniga vyatskih rodov [Book of Vyatka families], URL: https://rodnaya-vyatka.ru/ (access date 22.07.2020). (In Russian)

Received 19.08.2020
Revised 23.08.2020
Accepted 25.08.2020

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 502.057; 504.05

М.М. Иванов[1], О.Л. Комиссарова[2], Т.С. Кошовский[3], А.С. Цыпленков[4]

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛЕВОЙ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИИ И ДОЗИМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ НА ПОЙМЕ МАЛОЙ РАВНИННОЙ РЕКИ В ЗОНЕ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

В работе описан опыт применения портативного гамма-спектрометрического и дозиметрического оборудования при проведении крупномасштабного геоморфологического исследования участка поймы р. Локны, подвергшегося интенсивному радиоактивному загрязнению после аварии на ЧАЭС в 1986 г. Полученные результаты позволили в короткие сроки при низких трудозатратах выстроить подробную картину процесса пойменной аккумуляции на исследованном участке за пост-Чернобыльский период. Результаты измерений были проверены путем послойного отбора проб пойменных отложений и определения в них содержания радионуклидов в лабораторных условиях. Наиболее высокие темпы осадконакопления были зафиксированы на низкой пойме. Снижение концентрации радионуклидов в стоке наносов приводит к тому, что наиболее загрязненные слои оказываются захороненными под более чистыми слоями. Таким образом, проявляется процесс естественного самоочищения, который приводит к систематическому снижению мощности дозы гамма-излучения и как важный позитивный с радиоэкологической точки зрения эффект должен быть учтен при прогнозировании ситуации.

Ключевые слова: Cs-137, радиоцезиевый метод, флювиальная геоморфология, Чернобыльское загрязнение

Введение. Реки представляют собой основной путь латеральной миграции радионуклидов на загрязненных территориях и за их пределами. В условиях интенсивной антропогенной нагрузки развитие флювиального рельефа оказывает серьезное воздействие на экологическую ситуацию [Дедков, Мозжерин, 1984]. Одной из наиболее актуальных проблем является ухудшение качества водных и земельных ресурсов, связанное с миграцией загрязнителей, попадающих в природную среду в результате хозяйственной деятельности или техногенных аварий [Ажигиров и др., 1988; Пацукевич и др., 1992; Golosov et al., 2000; Walling et al., 2003; Walling, Collins, 2008; Bird, 2011]. Закономерности формирования и перераспределения речного стока и стока наносов в частности являются определяющими факторами в пространственной трансформации радиоактивного загрязнения и возникновения новых радиоэкологических угроз. Изучение отложений, образующихся в зоне интенсивного радиоактивного загрязнения после момента аварии, является важным источником информации о перемещении радионуклидов в природной среде. Вместе с тем, ^{137}Cs выступает в качестве одного из основных маркеров [Handbook …, 2002], используемых для исследования процессов миграции вещества. Такой подход может быть применен к поймам рек как сложным полигенетическим формированиям, фиксирующим сведения о вариациях содержания радионуклидов в стоке рек с загрязненными водосборами [Иванова и др., 2014; Мамихин и др., 2016].

Появление сравнительно компактных гамма-спектрометров позволило проводить измерение радиоактивности непосредственно в полевых условиях [Beck et al., 1972]. На современном этапе совокупность доступного аналитического оборудования позволяет получать как точные значения содержания радионуклидов в отбираемых образцах грунта в рамках лабораторных анализов, так и показатели формируемой ими мощности дозы гамма-излучения [Chesnokov et al., 1997; Potapov et al., 2001; Linnik et al., 2006]. Комбинация этих данных дает возможность выстроить расширенную картину процесса формирования поймы как геологического тела и накопителя радиоактивных загрязнителей.

Целью представленной работы являлась апробация методики применения полевой гамма-спектрометрии для получения сведений об аккумуляции

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, канд. геогр. н., мл. науч. с.; *e-mail*: ivanovm@bk.ru

[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Почвенный факультет, Кафедра радиоэкологии и экотоксикологии, аспирант, *e-mail*: komissarova-olga93@yandex.ru

[3] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, канд. геогр. н., мл. науч. с.; *e-mail*: tkzv@ya.ru

[4] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, канд. геогр. н., мл. науч. с.; *e-mail*: atsyplenkov@gmail.com

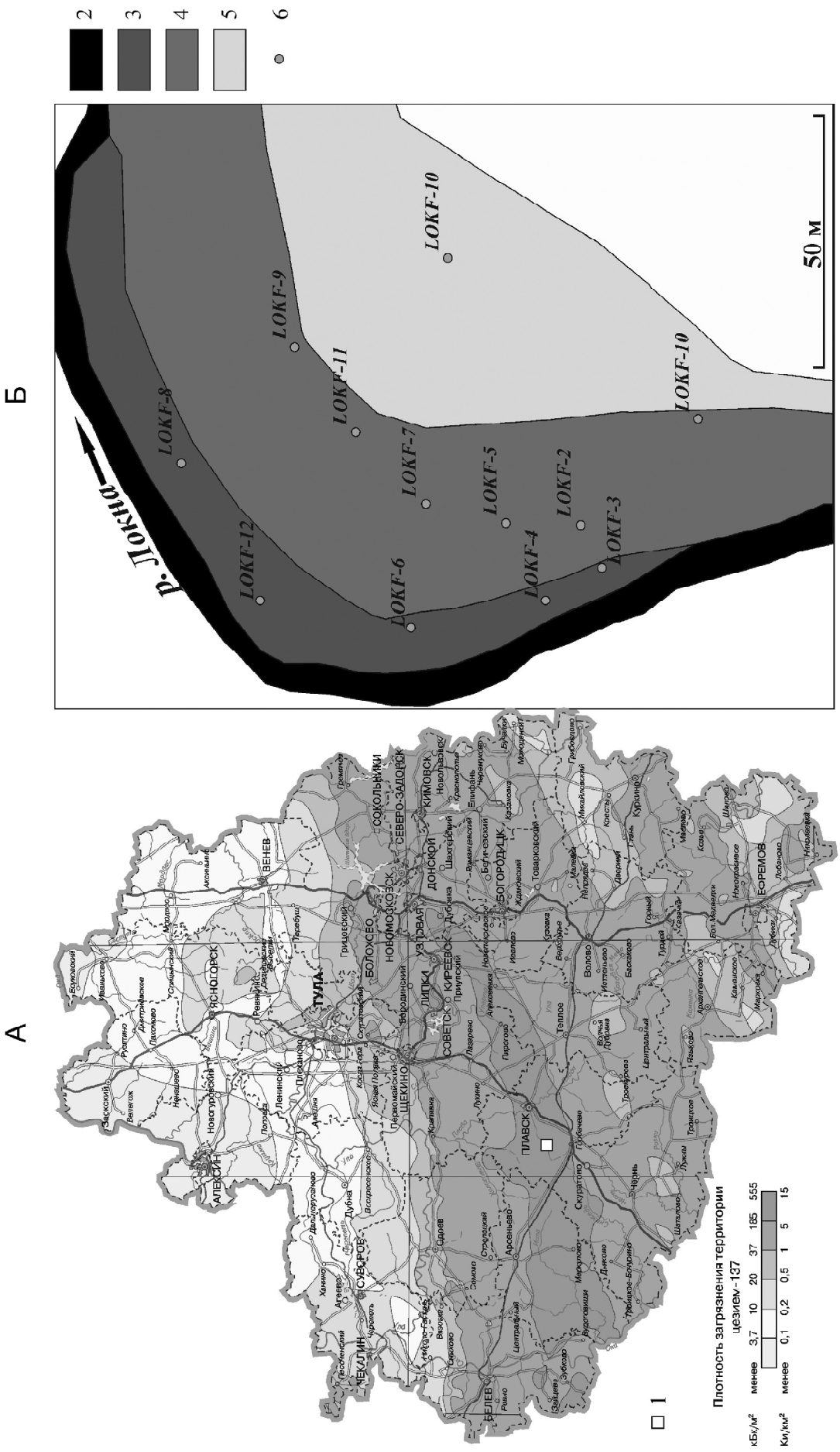

Рис. 1. Карта радиоактивного загрязнения Тульской области [Атлас ..., 2009] (А): 1 – расположение исследованного участка поймы р. Локны; схема исследованного участка (Б): 2 – русло реки, 3 – низкая пойма, 4 – средняя пойма, 5 – высокая пойма, 6 – расположение разрезов

Fig. 1 Map of radioactive contamination of the Tula Oblast [Atlas ..., 2009] (A): 1 – location of the studied section of the Lokna River floodplain; scheme of the studied section (Б): 2 – river channel, 3 – low floodplain, 4 – middle floodplain, 5 – high floodplain, 6 – location of cross-sections

наносов за пост-Чернобыльский период и систематических изменениях мощности дозы гамма-излучения. Для достижения поставленной цели были произведены полевые измерения интенсивности гамма-излучения и мощности дозы на участке поймы малой равнинной реки с радиоактивно загрязненным бассейном. Также был проведен отбор проб грунта для лабораторной обработки и проверки полевых измерений.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования послужил участок поймы р. Локны, бассейн которой расположен в южной части Тульской области на севере Среднерусской возвышенности, подвергшейся интенсивному радиоактивному загрязнению после аварии на ЧАЭС в 1986 г. (рис. 1А). Река Локна является левобережным притоком р. Плавы, впадая в нее в среднем течении в районе г. Плавска. Площадь бассейна р. Локны составляет 177 км^2. В строении поймы р. Локны выделяется три уровня: низкий, непосредственно примыкающий к руслу, высотой до 1 м над урезом воды, средний – высотой до 1,5 м, занимающий центральную часть поймы, и высокий – высотой более 1,7 м. Поверхность высокой поймы, примыкающая непосредственно к бортам долины, часто осложнена шлейфами и конусами выноса, сформировавшимися за счет поступления наносов непосредственно со склонов. Суммарная ширина низкой и средней пойм по всему течению Локны колеблется в диапазоне от 40 до 120 м. При этом низкая пойма на основном протяжении реки представлена достаточно узкой (максимум до 5–7 м) полосой вдоль русла, чаще всего фрагментарно по одному из берегов (см. рис. 1Б). Выбранный участок уже изучался в 2014 г. на предмет вертикального распределения ^{137}Cs в пойменных отложениях [Мамихин и др., 2016]. Характерной особенностью вертикального распределения ^{137}Cs на пойме р. Локны является наличие максимума содержания радионуклида, который может быть отнесен к моменту аварии – «Чернобыльский пик». Данный пик выступает в качестве надежного хронологического маркера, позволяющего оценить темпы осадконакопления за пост-Чернобыльский период.

На изучаемом участке поймы в 2019 г. проводился послойный отбор проб (в точках 10, 11, 12) (см. рис. 1Б) для последующих лабораторных анализов. В лабораторных условиях образцы высушивались при температуре 105°С, затем перетирались и просеивались через сито с диаметром отверстий 2 мм. В подготовленных образцах содержание ^{137}Cs анализировалось с использованием гамма-спектрометрического комплекса СКС-07П(09П)_Г_Р производства компании ООО «ГринСтар» с относительной погрешностью определения удельной активности 5–10%.

Кроме этого, в стенках отдельных разрезов пойменных отложений были выполнены замеры активности ^{137}Cs *in situ* с помощью портативных спектрометров производства КБ «Радар» с детектором CsI(Tl) размером 13×1347 мм (8 см^3) с кремниевым фотоумножителем. Разрешение по линии 662 кэВ ^{137}Cs – не хуже 7%, типовое значение 6–6,5% Atom Nano. На заданной глубине производилась выемка грунта для создания ниши, куда помещался спектрометр. Малый размер прибора (60×35×20 мм) позволял избегать сильных нарушений в стенке разреза. Измерения велись в течение 10 минут, что при имеющихся запасах ^{137}Cs оказывалось достаточным для регистрации статистически надежного количества импульсов.

Также на нескольких участках с морфологически выраженными уровнями проводились множественные замеры мощности дозы гамма-излучения с помощью портативных дозиметров Atom Fast (КБ «Радар»). Энергетический диапазон регистрируемого гамма- и рентгеновского излучения – от 50 до 3000 кэВ. На точках отбора проб отложений и проведения полевой спектрометрии выполнялись замеры мощности дозы продолжительностью не менее 20 мин. Все измерения проходили на высоте 1 м над поверхностью поймы.

Для создания крупномасштабной схемы изучаемого участка (см. рис. 1Б) была проведена аэрофотосъемка при использовании БПЛА производства компании DJI, модель Mavic Pro.

Результаты и их обсуждение. Сопоставление результатов лабораторных исследований отобранных образцов пойменных отложений и полевых замеров интенсивности излучения ^{137}Cs в стенке обнажения, откуда был взят материал, показало, что в заданных условиях полевая спектрометрия дает вполне надежные данные для оценки относительного распределения запасов радионуклидов (рис. 2). Наиболее интенсивная аккумуляция и рост запасов ^{137}Cs наблюдаются на низкой пойме – 323 кБк/м^2 (см. рис. 2А), что было также описано в рамках работы, проводимой ранее на данном участке [Мамихин и др., 2016]. С ростом уровня поймы запасы ^{137}Cs уменьшаются: 252 кБк/м^2 на среднем уровне (см. рис. 2Б) и 186 кБк/м^2 на высокой пойме (см. рис. 2В).

Темпы пойменного осадконакопления и, соответственно, роста запасов радионуклидов на реках с таким режимом определяются, главным образом, продолжительностью затопления поверхности поймы в периоды высокой воды во время интенсивного весеннего снеготаяния. Продолжительность затопления во многом зависит от высоты уровня поймы. Таким образом, средние темпы осадконакопления должны находиться в обратной связи с гипсометрическим уровнем (рис. 3).

Интенсивность накопления наносов на низкой пойме закономерно возрастает по мере приближения к вершине излучины и падает на ее крыльях, вплоть до размыва (см. рис. 3: 2,3). При этом интенсивность аккумуляции на средней пойме остается практически одинаковой на всем протяжении изученного участка.

Закономерным результатом неоднородности накопления материала является неравномерность роста запасов ^{137}Cs, которые оказываются также выше на более низких гипсометрических уровнях. Вместе с этим наблюдается четкая обратная зави-

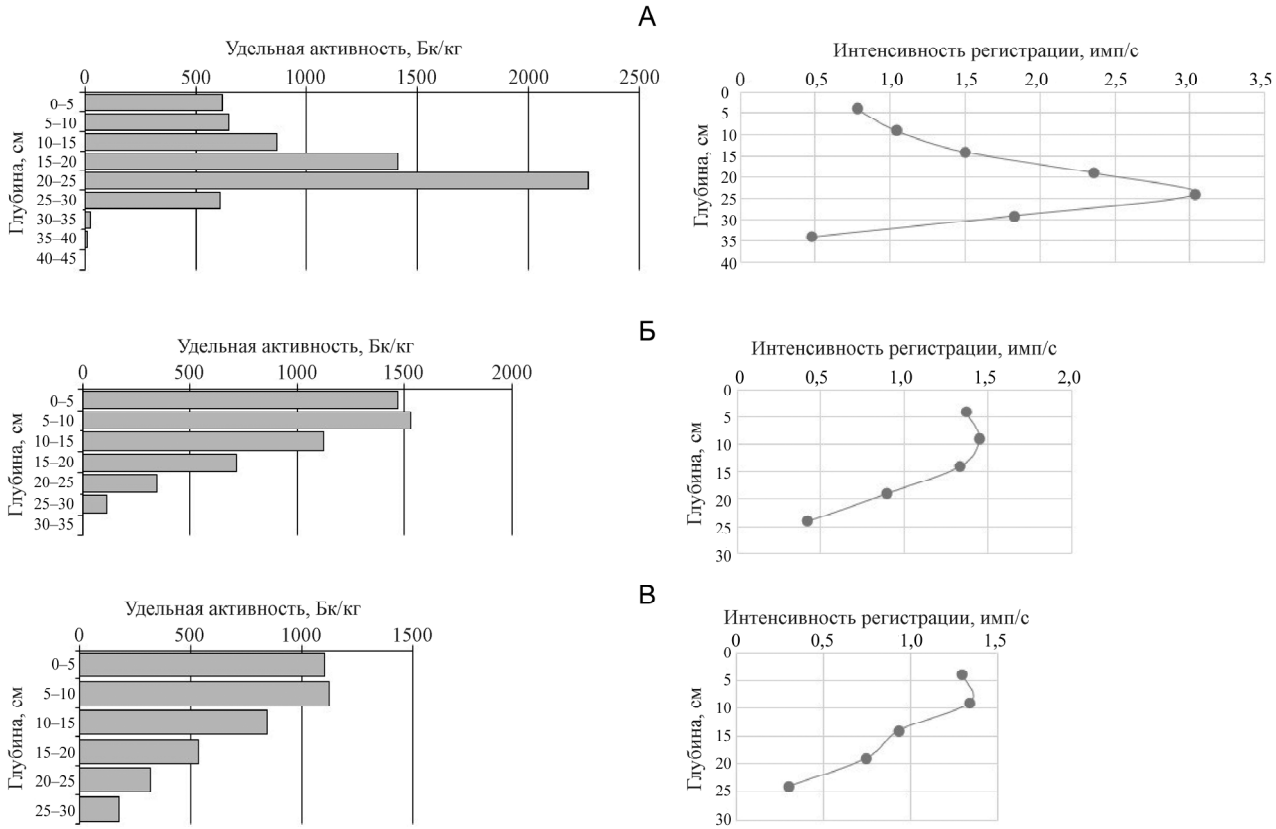

Рис. 2. Распределение ^{137}Cs в пойменных отложениях р. Локны: сопоставление графиков удельной активности ^{137}Cs (слева) и интенсивности полевой регистрации гамма-квантов ^{137}Cs (справа). Пойма: А – низкая (разрез 12), Б – средняя (разрез 11), В – высокая (разрез 10)

Fig. 2. Distribution of ^{137}Cs in floodplain sediments of the Lokna River: correlation of graphs of ^{137}Cs specific activity (left) and the intensity of field registration of ^{137}Cs gamma-quanta (right). Floodplain: А – low (cross-section 12), Б – middle (cross-section 11), В – high (cross-section 10)

симость между темпами осадконакопления и регистрируемой мощностью дозы (рис. 4А). Площадная дозиметрическая съемка показала, что на низкой пойме, где происходит более интенсивная аккумуляция наносов, мощность дозы радиоактивного излучения в среднем ниже (см. рис. 4Б).

Наблюдаемая ситуация коренным образом отличается от результатов исследований, проведенных на пойме р. Течи, где основным механизмом поступления радионуклидов в окружающую среду были не атмосферные выпадения, а их сброс в реку [Chesnokov et al., 2000]. При этом в обоих случаях рост запасов радионуклидов отмечается главным образом на низкой пойме. Проведенная ранее оценка показала, что, учитывая площади, занимаемые низким и средним уровнями поймы р. Локны, суммарный рост запасов ^{137}Cs составил 215×10^9 Бк (в расчете на 2012 г.) [Иванов, 2017]. Снижение концентрации радионуклидов в стоке наносов приводит к тому, что наиболее загрязненные слои оказываются захороненными под более чистыми слоями [Vetrov et al., 1990; Fridman et al., 1997; He, Walling, 1997; Golosov, Ivanova, 2002]. Таким образом, проявляется процесс естественного самоочищения (natural attenuation) [Konoplev et al., 2018], который должен быть учтен при прогнозировании радиоэкологической ситуации.

Выводы:

– опыт применения доступных в свободной продаже приборов для измерения содержания гамма-активных радионуклидов и формируемой ими мощности дозы излучения при проведении крупномасштабных геоморфологических исследований является крайне удачным. При сравнительно низких материальных и временных затратах в зоне интенсивного радиоактивного загрязнения могут быть получены высокоинформативные данные о пространственной неоднородности развития процесса седиментации за пост-Чернобыльский период;

– в условиях сокращающегося числа высоких половодий наиболее интенсивная аккумуляция ожидаемо наблюдается на низком уровне поймы р. Локны, что приводит к снижению мощности формируемой дозы и позитивным радиоэкологическим эффектам.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ – проект мол_а 18-35-00654.

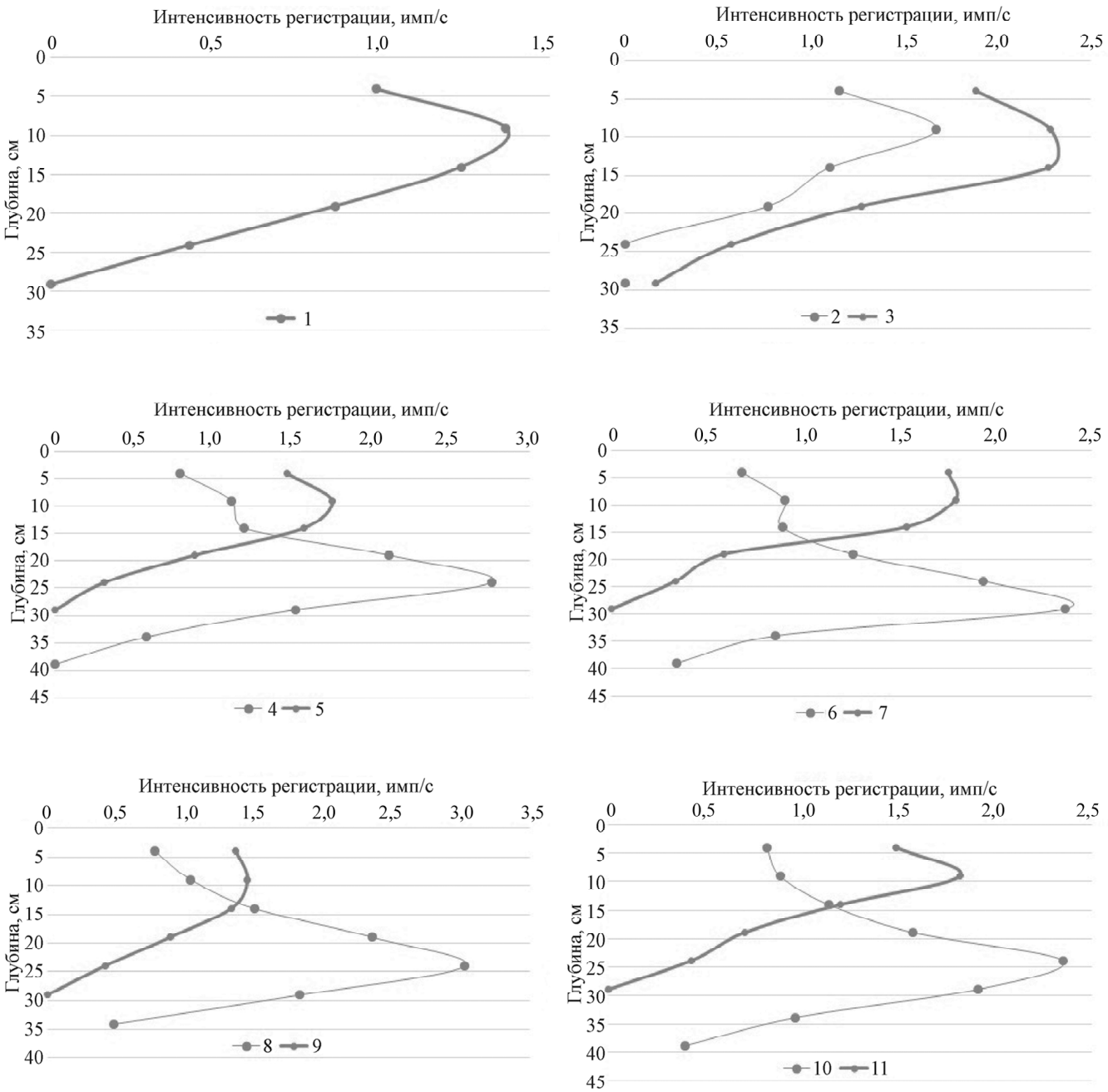

Рис. 3. Распределение интенсивности регистрации гамма-квантов энергии 661 КэВ ^{137}Cs по глубине на низком и среднем уровнях поймы р. Локны: 1 – разрез 1 (средняя); 2 – разрез 2 (низкая); 3 – разрез 3 (средняя); 4 – разрез 4 (низкая); 5 – разрез 5 (средняя); 6 – разрез 6 (низкая); 7 – разрез 7 (средняя); 8 – разрез 8 (низкая); 9 – разрез 11 (средняя); 10 – разрез 8 (низкая); 11 – разрез 9 (средняя)

Fig. 3. In-depth distribution of the intensity of registration of gamma-quanta energy 661 keV ^{137}Cs at low and middle floodplain levels of the Lokna River: 1 – cross-section 1 (middle); 2 – cross-section 2 (low); 3 – cross-section 3 (middle); 4 – cross-section 4 (low); 5 – cross-section 5 (middle); 6 – cross-section 6 (low); 7 – cross-section 7 (middle); 8 – cross-section 8 (low); 9 – cross-section 11 (middle); 10 – cross-section 8 (low); 11 – cross-section 9 (middle)

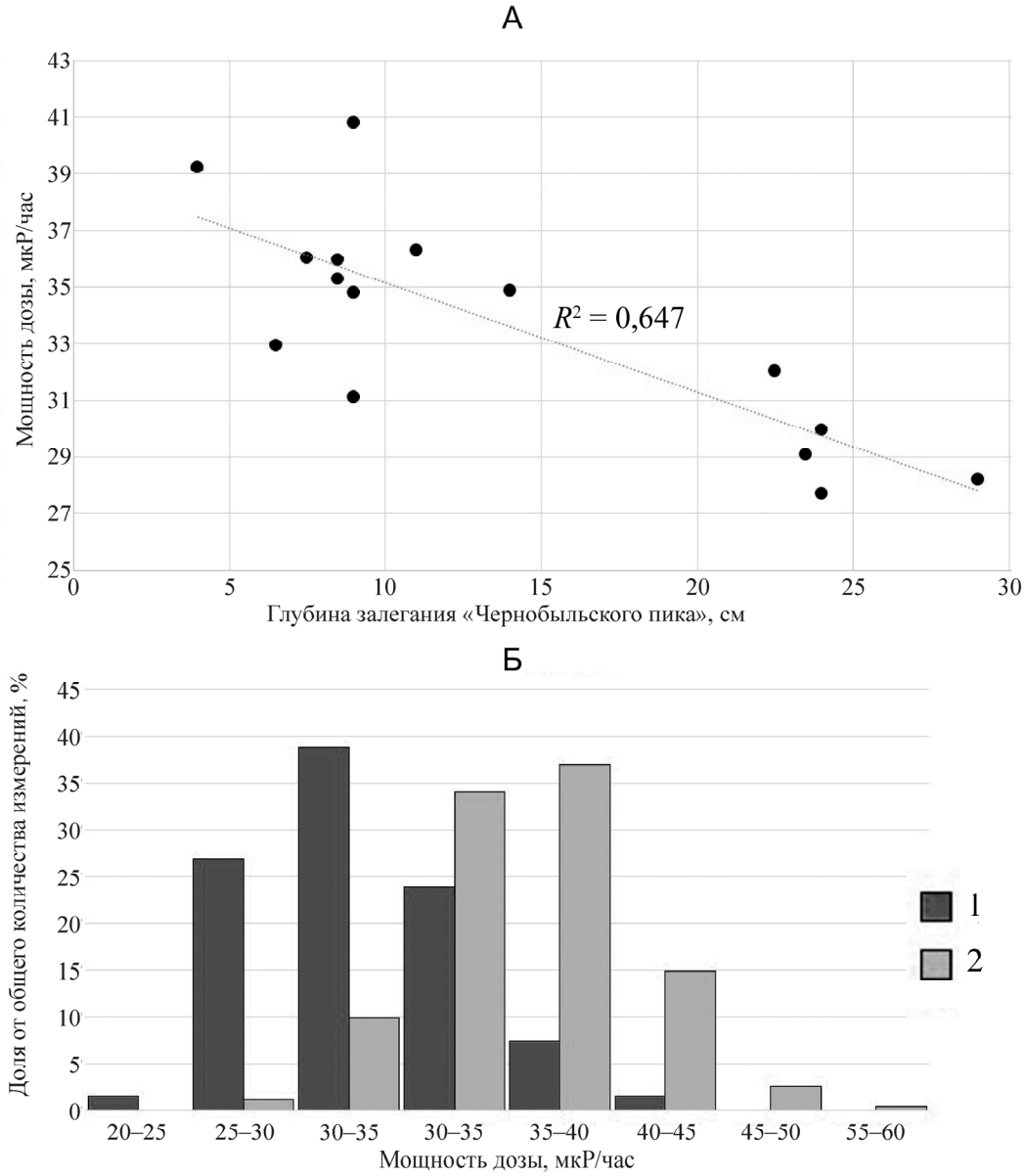

Рис. 4. Зависимость между интенсивностью пойменной аккумуляции и мощностью дозы в точках проведения полевой гамма-спектрометрии (А) и результаты площадной дозиметрической съемки (Б): 1 – низкая пойма, 2 – средняя пойма

Fig. 4. Correlation between the intensity of floodplain accumulation and the dose rate in the sites of field gamma-spectrometry (A) and the results of the terrain dosimetric survey (Б): 1 – low floodplain, 2 – middle floodplain

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ажигиров А.А., Голосов В.Н., Литвин Л.Ф. Эрозия на сельскохозяйственных землях и проблема защиты малых рек от заиления // Малые реки центра Русской равнины. М: МФГО, 1988. С. 51–61.

Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия–Беларусь) / Под ред. Израэля Ю.А., Богдевича И.М. Москва–Минск: фонд «Инфосфера» – НИА Природа, 2009.

Дедков А.П., Мозжерин В.И. Эрозия и сток наносов на Земле. Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1984. 264 с.

Иванов М.М. Эрозионно-аккумулятивные процессы как фактор трансформации поля радиоактивного загрязнения бассейна р. Плавы: дис. … канд. геогр. наук, М.: МГУ, 2017. С. 118–121.

Иванова Н.Н., Шамшурина Е.Н., Голосов В.Н., Беляев В.Р., Маркелов М.В., Парамонова Т.А., Эвар О. Оценка перераспределения ^{137}Cs экзогенными процессами в днище долины р. Плава (Тульская область) после аварии на Чернобыльской АЭС // Вестн. Моск. ун-та, Сер. 5. Геогр. 2014. № 1. С. 24–34.

Мамихин С.В., Голосов В.Н., Парамонова Т.А., Шамшурина Е.Н., Иванов М.М. Вертикальное распределение ^{137}Cs в аллювиальных почвах поймы р. Локна в отдаленный период после аварии на ЧАЭС и его моделирование // Почвоведение. 2016. № 12. С. 1521–1533.

Пацукевич З.В., Кирюхина З.П., Козловская М.Э. Эрозия на пашне как источник загрязнения водоемов (количественные оценки) // Экологические проблемы эрозии почв и русловых процессов. М.: Изд-во МГУ, 1992. С. 16–28.

Beck H.J., DeCampo J.A., Gogolak C.V. In situ Ge(Li) and NaI(T1) y-ray spectrometry. HASL Report No. HASL-258, 1972.

Bird G. Provenancing anthropogenic Pb within the fluvial environment: Developments and challenges in the use of Pb isotopes. *Environment International*, 2011, vol. 37, p. 802–819.

Chesnokov A.V., Govorun A.P., Ivanov O.P., Liksonov V.I., Smirnov S.V., Potapov V.N., Fedin V.I., Shcherbak S.B., Urutskoev L.I. Technique for in situ measurement of Cs-137 deposit in soil under clean protected layer. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1997, vol. 44, no. 3, p. 769–773.

Chesnokov A.V., Govorun A.P., Linnik V.G., Shcherbak S.B. ^{137}Cs contamination of the Techa river foodplain near the village of Muslumovo. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2000, vol. 50, p. 179–191.

Fridman S.D., Kvasnikova E.N., Glushko O.V., Golosov V.N., Ivanova N.N. Cesium-137 migration in conjugate geocomplexes of the Central Russian upland. *Russian Meteorology and Hydrology*, 1997, vol. 5, p. 26–34.

Golosov V.N., Ivanova N.N. Sediment associated Chernobyl ^{137}Cs redistribution in the small basins of Central Russia. *Applied Geomorphology: Theory and Practice* Allison R.J. (Ed.) Wiley & Sons, 2002, p. 165–181.

Golosov V.N., Walling D.E., Panin A.V. Post-fallout redistribution of Chernobyl-derived Cs-137 in small catchments within the Lokna river basin. *The role of erosion and sediment transport in nutrient and contaminant transfer*, IAHS Publ., 2000, vol. 263, p. 49–58.

Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides, Zapata F. (Ed.). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002, vol. 219, p. 9348054-9.

He Q., Walling D.E. The distribution of fallout ^{137}Cs and ^{210}Pb in undisturbed and cultivated soils. *Applied Radiation and Isotopes*, 1997, vol. 48, p. 677–690.

Konoplev A., Golosov V., Wakiyama Y., Takase T., Yoschenko V., Yoshihara T., Parenyuk O., Cresswell A., Ivanov M., Carradine M., Nanba K., Onda Y. Natural attenuation of Fukushima-derived radiocesium in soils due to its vertical and lateral migration. *Journal of environmental radioactivity*, 2018, vol. 186, p. 23–33.

Linnik V.G., Brown J.E., Dowdall M., Potapov V.N., Nosov A.V., Surkov V.V., Sokolov A.V., Wright S.M., Borghuis S. Patterns and inventories of radioactive contamination of island sites of the Yenisey River, Russia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2006, vol. 87(2), p. 188–208.

Potapov V.N., Ivanov O.P., Chirkin V.M., Ignatov S.M. A dip detector for in situ measuring of Cs-137 specific soil activity profiles. *IEEE Transactions on nuclear science*, 2001, vol. 48(4), p. 1194–1197.

Vetrov V.A., Alexeenko V.A., Poslovin A.L., Chereminisov A.A., Nikitin A.A., Bovkun L.A. Radionuclide washout from natural catchments in the Dnieper river basin. *J. Hydrol. & Meteorol*, 1990, vol. 2, p. 120–123.

Walling D.E., Collins A.L. The catchment sediment budget as a management tool. *Environmental science & police*, 2008, vol. 11, iss. 2, p. 136–143. DOI: 10.1016/j.envsci.2007.10.004.

Walling D.E., Owens P.N., Carter J., Leeks G.J.L., Lewis S., Meharg A.A., Wright J. Storage of sediment-associated nutrients and contaminants in river channel and floodplain systems. *Applied Geochemistry*, 2003, vol. 18, p. 195–220.

Поступила в редакцию 22.03.2020
После доработки 16.05.2020
Принята к публикации 25.08.2020

M.M. Ivanov[1], O.L. Komissarova[2], T.S. Koshovskyi[3], A.S. Tsyplenkov[4]

APPLICATION OF FIELD GAMMA-RAY SPECTROMETRY AND DOSIMETRY TO STUDY SEDIMENTATION ON THE FLOODPLAIN OF A SMALL PLAIN RIVER IN THE ZONE OF RADIOACTIVE CONTAMINATION

The paper describes the experience of using portable gamma-ray spectrometric and dosimetric equipment for a large-scale geomorphological study of the Lokna river floodplain section subjected to intense radioactive contamination after the 1986 Chernobyl accident. The obtained results made it possible to produce in a short time and with low labor efforts a detailed picture of floodplain accumulation process in the studied area during the post-Chernobyl period. The measurement results were verified by layer-by-layer sampling of floodplain sediments and determining their radionuclide content under laboratory conditions. The highest rates of sedimentation were recorded in the low floodplain. Reduction of radionuclide concentrations in sediment runoff results in the burial of the most polluted layers under cleaner ones. Thus, the natural self-purification occurs, which leads to a systematic decrease in the dose rate of gamma radiation. This important from the radioecological point of view positive effect should be taken into account while forecasting the future situation.

Key words: Cs-137, radiocesium method, fluvial geomorphology, Chernobyl contamination

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. мол_а 18-35-00654).

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, the Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Junior Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail*: ivanovm@bk.ru

[2] Lomonosov Moscow State University, Soil Science Faculty, Department of Radioecology and Ecotoxicology, post-graduate student; *e-mail*: komissarova-olga93@yandex.ru

[3] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, the Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Junior Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail*: tkzv@ya.ru

[4] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, the Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Junior Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail*: atsyplenkov@gmail.com

REFERENCES

Atlas sovremennyh i prognoznyh aspektov posledstvij avarii na Chernobyl'skoj AES na postradavshih territoriyah Rossii i Belarusi (*ASPA Rossiya-Belarus'*) [Atlas of current and forecast aspects of the consequences of the Chernobyl accident within the affected territories of Russia and Belarus], Izrael'. Yu. A., Bogdevich I.M. (Eds.) Moscow–Minsk, Fond «Infosfera»–NIA Priroda Publ., 2009. (In Russian)

Azhigirov A.A., Golosov V.N., Litvin L.F. [Erosion on agricultural lands and the problem of small river protection from aggradation]. *Malye reki centra Russkoj ravniny* [Small rivers of the central Russian Plain]. Moscow, MFGO Publ., 1988, p. 51–61. (In Russian)

Beck H.J., DeCampo J.A., Gogolak C.V. In situ Ge(*Li*) *and NaI*(*Tl*) *y-ray spectrometry*. HASL Report no. HASL, 258, 1972.

Bird G. Provenancing anthropogenic Pb within the fluvial environment: Developments and challenges in the use of Pb isotopes. *Environment International*, 2011, vol. 37, p. 802–819.

Chesnokov A.V., Govorun A.P., Ivanov O.P., Liksonov V.I., Smirnov S.V., Potapov V.N., Fedin V.I., Shcherbak S.B., Urutskoev L.I. Technique for in situ measurement of ^{137}Cs deposit in soil under clean protected layer. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1997, vol. 44, no. 3, p. 769–773.

Chesnokov A.V., Govorun A.P., Linnik V.G., Shcherbak S.B. ^{137}Cs contamination of the Techa river foodplain near the village of Muslumovo. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2000, vol. 50, p. 179–191.

Dedkov A.P., Mozzherin V.I. Eroziya i stok nanosov na Zemle [Erosion and sediment runoff on the Earth], Kazan, Kazan Univ. Publ., 1984. 264 p. (In Russian)

Fridman S.D., Kvasnikova E.N., Glushko O.V., Golosov V.N., Ivanova N.N. Cesium-137 migration in conjugate geocomplexes of the Central Russian upland. *Russian Meteorology and Hydrology*, 1997, vol. 5, p. 26–34.

Golosov V.N., Ivanova N.N. Sediment associated Chernobyl ^{137}Cs redistribution in the small basins of Central Russia. *Applied Geomorphology: Theory and Practice*, Allison R. J. (Ed.), Wiley & Sons, 2002. p. 165–181.

Golosov V.N., Walling D.E., Panin A.V. Post-fallout redistribution of Chernobyl-derived Cs-137 in small catchments within the Lokna river basin. *The role of erosion and sediment transport in nutrient and contaiminant transfer*, IAHS Publ., 2000, vol. 263, p. 49–58.

Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides, Zapata F. (Ed.), Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2002, vol. 219, p. 9348054-9.

He Q., Walling D.E. The distribution of fallout ^{137}Cs and ^{210}Pb in undisturbed and cultivated soils. *Applied Radiation and Isotopes*, 1997, vol. 48, p. 677–690.

Ivanov M.M. Erozionno-akkumulyativnye processy kak faktor transformacii polya radioaktivnogo zagryazneniya bassejna r. Plavy. [Erosion and accumulation processes as a factor of transformation of radioactive contamination in the Plava River basin] Moscow, PhD Thesis in Geography, 2017, p. 118–121. (In Russian)

Ivanova N.N., Shamshurina E.N., Golosov V.N., Belyaev V.R., Markelov M.V., Paramonova T.A., Evar O. Ocenka pereraspredeleniya ^{137}Cs ekzogennymi processami v dnische doliny r. Plava (Tul'skaya oblast') posle avarii na Chernobyl'skoj AES [Assessment of ^{137}Cs redistribution by exogenic processes in the Plava River valley bottom (Tula oblast) after the Chernobyl accident], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2014, 1, p. 24–34. (In Russian)

Konoplev A., Golosov V., Wakiyama Y., Takase T., Yoschenko V., Yoshihara T., Parenyuk O., Cresswell A., Ivanov M., Carradine M., Nanba K., Onda Y. Natural attenuation of Fukushima-derived radiocesium in soils due to its vertical and lateral migration. *Journal of environmental radioactivity*, 2018, vol. 186, p. 23–33.

Linnik V.G., Brown J.E., Dowdall M., Potapov V.N., Nosov A.V., Surkov V.V., Sokolov A.V., Wright S.M., Borghuis S. Patterns and inventories of radioactive contamination of island sites of the Yenisey River, Russia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2006, vol. 87(2), p. 188–208.

Mamihin S.V., Golosov V.N., Paramonova T.A., Shamshurina E.N., Ivanov M.M. Vertical distribution of ^{137}Cs in alluvial soils of the Lokna River floodplain (Tula oblast) long after the Chernobyl accident and its simulation. *Eurasian Soil Sc.*, 2016, vol. 12, p. 1432–1442.

Pacukevich Z.V., Kiryuhina Z.P., Kozlovskaya M.E. [Erosion on arable lands as a source of water bodies contamination (quantitative assessments)], *Ekologicheskie problemy erozii pochv i ruslovyh processov* [Environmental issues of soil erosion and channel processes], Moscow, MSU Publ., 1992, p. 16–28. (In Russian)

Potapov V.N., Ivanov O.P., Chirkin V.M., Ignatov S.M. A dip detector for in situ measuring of ^{137}Cs specific soil activity profiles. *IEEE Transactions on nuclear science*, 2001, vol. 48(4), p. 1194–1197.

Vetrov V.A., Alexeenko V.A., Poslovin A.L., Chereminisov A.A., Nikitin A.A., Bovkun L.A. Radionuclide washout from natural catchments in the Dnieper river basin. *Journal of Hydrology & Meteorology*, 1990, vol. 2, p. 120–123.

Walling D.E., Collins A.L. The catchment sediment budget as a management tool. *Environmental science & police*, 2008, vol. 11, iss. 2, p. 136–143. DOI: 10.1016/j.envsci.2007.10.004.

Walling D.E., Owens P.N., Carter J., Leeks G.J.L., Lewis S., Meharg A.A. J. Wright Storage of sediment-associated nutrients and contaminants in river channel and floodplain systems. *Applied Geochemistry*, 2003, vol. 18, p. 195–220.

Received 22.03.2020
Revised 16.05.2020
Accepted 25.08.2020

УДК 551.50

А.М. Осипов[1], Д.Ю. Гущина[2]

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ДВУХ ТИПОВ ЭЛЬ-НИНЬО В СОВРЕМЕННОМ КЛИМАТЕ

По данным реанализа GLORYS2v4 на основании расчета бюджета тепла верхнего перемешанного слоя океана проведена оценка вклада горизонтальной и вертикальной адвекций и нелинейного динамического нагрева в формирование положительной аномалии температуры поверхности океана при двух типах Эль-Ниньо. Выделены процессы в океане, способствующие росту аномалии температуры воды при умеренных (Модоки) и сильных (канонические) Эль-Ниньо в современных климатических условиях (1992–2015 гг.). Установлено, что вне зависимости от типа Эль-Ниньо горизонтальная и вертикальная адвекции приводят к росту теплосодержания верхнего перемешанного слоя тропического Тихого океана в фазу развития Эль-Ниньо. На востоке Тихого океана основной вклад в формирование аномалий теплосодержания при обоих типах Эль-Ниньо вносит вертикальная адвекция, а в центральной части – горизонтальная. Показано, что основное различие механизма формирования аномалий теплосодержания верхнего перемешанного слоя океана между типами Эль-Ниньо заключается в интенсивности роста аномалии температуры. При умеренных Эль-Ниньо более интенсивный нагрев происходит в центре Тихого океана вследствие действия процессов, связанных как с зональной, так и с меридиональной адвекцией; при сильных Эль-Ниньо значительно повышается вклад процессов, связанных с вертикальной адвекцией, особенно на востоке Тихого океана. Нелинейный динамический нагрев не способствует росту положительной аномалии температуры или вовсе приводит к ее уменьшению.

Ключевые слова: каноническое и Модоки Эль-Ниньо, механизм генерации Эль-Ниньо, бюджет тепла перемешанного слоя океана

Введение. Одной из ключевых проблем, возникающих при изучении и прогнозировании явлений Эль-Ниньо, является их непохожесть друг на друга. Долгое время считалось, что при Эль-Ниньо аномалии температуры поверхности океана (АТПО) сосредоточены на востоке тропического Тихого океана у побережья Южной Америки [Rasmusson, Carpenter, 1982]. Однако позднее было показано, что в ряде случаев максимум положительной АТПО отмечается в центральной части Тихого океана [Ashok et al., 2007; Kao, Yu, 2009; Kug et al., 2009]. Для событий такого типа было предложено название «Эль-Ниньо Модоки», тогда как первый тип Эль-Ниньо получил название «канонического».

Важность изучения двух типов Эль-Ниньо заключается в том, что для каждого из них характерна своя схема удаленного отклика, возникающих как следствие Эль-Ниньо аномалий режима погоды, в первую очередь приземной температуры воздуха и атмосферных осадков, в различных районах земного шара [Железнова, 2015].

Таким образом, на настоящий момент актуальной является проблема не просто прогнозирования Эль-Ниньо, а определения типа развивающегося явления. Для решения этой задачи необходимо понимание особенностей механизма формирования каждого из типов Эль-Ниньо.

Изменение температуры верхнего слоя океана может быть описано с помощью бюджета тепла перемешанного слоя, включающего в себя процессы адвекции, потоки тепла и процессы перемешивания и вовлечения на нижней границе перемешанного слоя [Jin et al., 2003]. Интенсивность и локализация АТПО (по сути, тип Эль-Ниньо) определяются соотношением интенсивности этих процессов в верхнем перемешанном слое океана в период формирования и развития Эль-Ниньо. При этом основными процессами, приводящими к возникновению положительной АТПО, т. е. к формированию условий Эль-Ниньо, являются горизонтальная и вертикальная адвекции аномалий температуры [Jin et al., 2003; An, Jin, 2004; Takahashi, Dewitte, 2015; Santoso et al., 2017]. Рост АТПО обеспечивается тремя типами положительных обратных связей [Jin et al., 2006]. Первая из них – зональная адвективная обратная связь – проявляется в возникновении аномальных западных ветров и направленных на восток аномальных течений в океане в ответ на формирование изначальной положительной АТПО на востоке Тихого океана, что приводит к распространению теплых вод на восток и дальнейшему повышению температуры. Экмановская обратная связь проявляется в так называемой Экмановской накачке в океане: начальная положительная аномалия ТПО вызывает ослабление пассатов, то есть западную аномалию ветра,

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, аспирант; *e-mail*: sashaosipov@list.ru

[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, профессор, докт. геогр. н.; *e-mail*: dasha155@mail.ru

которая способствует сходимости океанических потоков к экватору и накоплению водных масс в приэкваториальной зоне, что, в свою очередь, вызывает аномальные нисходящие движения, подавляющие апвеллинг. В результате в зоне экватора холодные глубинные воды поднимаются менее интенсивно, и отмечается дальнейший рост АТПО. Бьеркнесова обратная связь [Bjerknes, 1969] проявляется в возникновении западной аномалии ветра в приэкваториальной зоне Тихого океана в ответ на положительную АТПО на востоке Тихого океана и уменьшение западно-восточного градиента температуры и давления. Западная аномалия ветра создает условия для заглубления термоклина на востоке Тихого океана и в результате апвеллинга приводит к подъему у побережья Южной Америки более теплых вод перемешанного слоя. Вследствие этого отмечается дальнейший рост АТПО.

Бюджет тепла перемешанного слоя рассматривался ранее для анализа формирования АТПО в условиях Эль-Ниньо, однако в большинстве исследований не учитывалась дифференциация типов данного явления [Kim et al., 2015; Santoso et al., 2017]. В [Takahashi, Dewitte, 2016] анализировался вклад составляющих бюджета тепла в формирование двух типов Эль-Ниньо по данным реанализа Drakkar, имеющего меньшую точность и худшие схемы усвоения данных наблюдений, чем реанализ, используемый в данной работе.

Текущее исследование служит основой для дальнейшей оценки бюджета тепла перемешанного слоя океана в современном и будущем климате по данным ансамбля климатических моделей проекта CMIP5 для двух типов Эль-Ниньо. В некоторых предшествующих работах [Santoso et al., 2017] анализ бюджета тепла перемешанного слоя океана по модельным данным проводился для фиксированных районов Niño3 и Niño4. Однако климатические модели воспроизводят пространственную структуру поля ТПО, существенно отличающуюся по локализации аномалий от реально наблюдаемой, особенно в будущем климате [Cai et al., 2018]. При использовании фиксированных в пространстве областей Niño3 и Niño4 велика вероятность того, что районы максимальной изменчивости АТПО в модели окажутся за пределами Niño3 и Niño4. Поэтому в настоящем исследовании для разделения Эль-Ниньо на два типа используется не традиционная методика, основанная на анализе АТПО в фиксированных районах, а новый метод, базирующийся на пространственной структуре АТПО [Takahashi et al., 2011], что позволяет осуществлять сравнение результатов по данным наблюдений и моделирования с учетом сдвига максимума аномалий в моделях.

Таким образом, целью данного исследования является оценка вклада составляющих бюджета тепла в формирование двух типов Эль-Ниньо в условиях современного климата по данным более точного реанализа GLORYS2v4.

Материал и методы исследований. Для анализа вклада горизонтальной и вертикальной адвекций, а также нелинейного динамического нагрева в формирование связанных с циклом ЭНЮК аномалий ТПО использовались данные реанализа GLORYS2V4 (Global Ocean Reanalysis and Simulation) прогностического центра MERCATOR-Ocean о зональной и меридиональной компонентах скорости, а также о температуре воды в пределах верхнего 50-метрового слоя океана. Вертикальная компонента скорости была рассчитана на основе зональной и меридиональной компонент через дивергенцию (на основе уравнения сохранения массы). Горизонтальный шаг сетки координат составляет 0,25×0,25°, по вертикали 75 уровней, из которых 18 приходятся на верхний 50-метровый слой.

Выбор реанализа GLORYS2V4 помимо высокого пространственного разрешения обусловлен достаточно высокой степенью согласованности с данными наблюдений, что достигается системой ассимиляции и коррекции данных при наличии достаточного количества данных наблюдений [Quality information …, 2019].

Для выявления океанических процессов, способствующих формированию связанных с Эль-Ниньо аномалий ТПО, был рассмотрен бюджет тепла верхнего 50-метрового слоя океана. Выбор слоя обусловлен тем, что в данном регионе уровенная поверхность 50 м достаточно хорошо совпадает с нижней границей перемешанного слоя океана [An, Jin, 2004]. Глубина нижней границы перемешанного слоя принималась постоянной во времени и в пространстве. Аналогичный подход применялся в [Jin et al., 2003; Takahashi, Dewitte, 2016; Santoso et al., 2017; Wang et al., 2019]. Использование фиксированной глубины термоклина позволяет значительно упростить расчеты, т.к. пропадает необходимость учета изменения количества воды в пределах перемешанного слоя; при этом соотношение составляющих бюджета тепла в зависимости от мощности выбранного слоя значительно не меняется [Wang et al., 2019]. Более того, климатические модели имеют вертикальный шаг 10 м, и значения океанологических характеристик относятся ко всему 10-метровому слою в целом, следовательно, точно определить положение термоклина не представляется возможным.

Бюджет тепла верхнего перемешанного слоя океана может быть выражен следующим образом [Jin et al., 2003; Takahashi, Dewitte, 2016]:

$$\frac{\partial[T']}{\partial t} = ADV_{XY} + ADV_Z + NDH + Q_{net} + R, \quad (1)$$

где T' – аномалия температуры. Квадратные скобки соответствуют осреднению по верхнему перемешанному слою океана. В формирование аномалий теплосодержания основной вклад вносят адвекция тепла и нелинейный динамический нагрев (*NDH*). Член Q_{net} описывает потоки тепла на поверхности океана, R представляет собой величину, складывающуюся из процессов перемешивания, не описанных явно в рассматриваемом уравнении, и ошибок расчетов и аппроксимаций, представляющих собой невязку замыкания баланса.

Адвекция разделена на горизонтальную $(ADV)_{XY}$ и вертикальную $(ADV)_Z$ составляющие:

$$ADV_{XY} = \left[-u'\frac{\partial \overline{T}}{\partial x} - v'\frac{\partial \overline{T}}{\partial y} - \frac{\overline{u}(\partial T')}{\partial x} - \frac{\overline{v}(\partial T')}{\partial y} \right], \quad (2)$$

$$ADV_Z = \left[-w'\frac{\partial \overline{T}}{\partial z} - \frac{\overline{w}(\partial T')}{\partial z} \right]. \quad (3)$$

T, u, v и w представляют собой температуру воды, зональную, меридиональную и вертикальную составляющие скорости движения, соответственно. Черты над членами уравнения означают средние климатические значения, штрихи – аномалии относительно них. Аномалии рассчитывались путем вычитания из значения параметра для конкретного месяца среднего за период 1992–2015 гг. значения для данного месяца. Нелинейный динамический нагрев согласно [Takahashi, Dewitte, 2016] представлен в виде:

$$NDH = \left[-u'\frac{\partial T}{\partial x} - v'\frac{\partial T}{\partial y} - w'\frac{\partial T}{\partial z} + \overline{u'\frac{\partial T}{\partial x}} + \overline{v'\frac{\partial T}{\partial y}} + \overline{w'\frac{\partial T}{\partial z}} \right]. \quad (4)$$

Традиционно разделение Эль-Ниньо на два типа (канонический и Модоки) осуществляется на основе пространственного анализа аномалий ТПО. Эль-Ниньо выделяется, когда средние значения АТПО в регионах Niño3 (5° ю. ш. – 5° с. ш., 90° з. д. – 150° з. д.) и Niño4 (5° ю. ш. – 5° с. ш., 160° в. д. – 150° з. д.) превышают 0,5°C [Yeh et al., 2009]. Если при этом АТПО в течение декабря–февраля превышает 0,5°C и при этом в Niño3 больше, чем в Niño4, то событие относится к каноническому типу, если АТПО выше в Niño4, то к Эль-Ниньо Модоки. Однако описанная выше методика разделения Эль-Ниньо на два типа имеет четкую привязку к регионам, в которых аномалии ТПО определяются по данным наблюдений. В моделях пространственная структура АТПО может воспроизводиться с некоторым пространственным сдвигом, при этом значительная доля изменчивости может проявляться за пределами регионов Niño3 и Niño4.

В данном исследовании использовалась иная методика разделения Эль-Ниньо на типы, предложенная в [Takahashi, Dewitte, 2011; Takahashi and Dewitte, 2016; Takahashi et al., 2019]. Разделение Эль-Ниньо на две моды, как и в описанном выше случае, базируется на локализации максимума аномалии ТПО. Первая мода включает в себя явления Ла-Нинья и умеренные Эль-Ниньо, при которых максимум аномалии расположен в центре Тихого океана. Второй моде соответствуют сильные канонические Эль-Ниньо с максимумом аномалий на востоке Тихого океана. Разделение Эль-Ниньо на две моды осуществляется на основе пространственно-временного анализа АТПО. Поле АТПО раскладывается по эмпирическим ортогональным функциям (ЭОФ). На основе главных компонент ЭОФ-разложения (*PC1* и *PC2*) рассчитываются временные ряды индексов для двух типов Эль-Ниньо. Однако в работе [Takahashi et al., 2011] показано, что сами по себе ряды *PC1* и *PC2* не являются репрезентативными с точки зрения разделения Эль-Ниньо на два типа. На основании анализа гистограммы рассеяния в координатах *PC1/PC2* было предложено выражать индексы Эль-Ниньо через линейную комбинацию временных рядов основных компонент первых двух мод ЭОФ разложения:

$$C = \frac{PC_1 + PC_2}{\sqrt{2}}, \quad (5)$$

$$E = \frac{PC_1 - PC_2}{\sqrt{2}}, \quad (6)$$

где *E*-индекс соответствует каноническому Эль-Ниньо, а *C*-индекс – Эль-Ниньо Модоки. Однако в последующих работах [Takahashi, Dewitte, 2016] было продемонстрировано, что разделение на *C*- и *E*-моды позволяет дифференцировать Эль-Ниньо не только по локализации максимумов АТПО, но и по интенсивности аномалий. А именно, *C*-мода описывает умеренные явления, а *E*-мода соответствует экстремальным явлениям канонического типа.

Таким образом, Эль-Ниньо можно подразделить также на два режима – сильный и умеренный, в высокой степени совпадающие с каноническим и Модоки типами явления, соответственно. В качестве дополнительного критерия для выделения сильных Эль-Ниньо было выбрано значение индекса *E*, равное 1,5–1,8°C [Takahashi, Dewitte, 2016], так как кластерный анализ показывает наличие двух кластеров Эль-Ниньо в фазовом пространстве значений индексов *E* и *C* по данным наблюдений и моделирования климата, границей между которыми выступают указанные значения индекса *E*.

На следующем этапе была рассчитана билинейная регрессия пространственного поля АТПО с месячным шагом на временные ряды индексов *E* и *C*. Данная процедура позволяет получить пространственные структуры изменчивости АТПО для каждого из двух типов Эль-Ниньо (пространственные моды *E* и *C*), то есть выделить районы, в которых возникают наиболее интенсивные АТПО. *E*-мода описывает значительную долю изменчивости на востоке Тихого океана и связана с сильными Эль-Ниньо. *C*-мода описывает изменчивость в центре Тихого океана и связана с Ла-Нинья и умеренными Эль-Ниньо. Полученные пространственные моды представлены на рис. 1.

Далее рассчитываются проекции составляющих бюджета тепла, оказывающих максимальное влияние на формирование АТПО (горизонтальной и вертикальной адвекций и нелинейного динамического нагрева), на пространственные моды *E* и *C*, что позволяет оценить вклад данных компонент бюджета в формирование положительных аномалий ТПО при определенном типе Эль-Ниньо. Расчет проекций производился по следующей формуле (на примере *E*-моды):

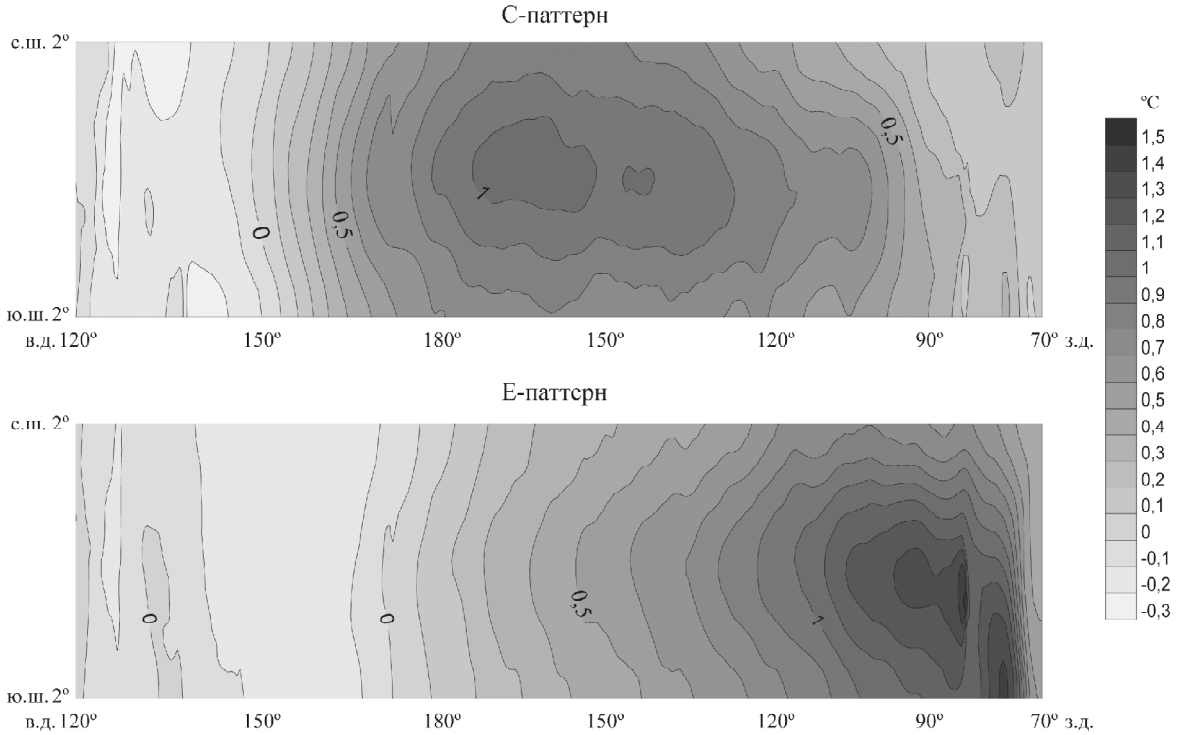

Рис. 1. Пространственные структуры (моды), соответствующие изменчивости АТПО при умеренном (*С*-мода) и сильном (*Е*-мода) режимах Эль-Ниньо по данным реанализа GLORYS2v4

Fig.1. Spatial structures (patterns) of sea surface temperature anomalies associated with the moderate (*C*-pattern) and strong (*E*-pattern) El Niño regimes based on the GLORYS2v4 reanalysis data

$$\left(\frac{\partial T'}{\partial t}\bigg|E\right)=\frac{1}{N_x N_y}\int_{120^\circ E}^{290^\circ E}\int_{2^\circ S}^{2^\circ N}\left(\frac{\partial T'}{\partial t(x,y,t)}\cdot E(x,y)\right)dxdy, \quad (7)$$

где $\left(\frac{\partial T'}{\partial t}\bigg|E\right)$ – это проекция каждой из составляющих бюджета тепла перемешанного слоя океана ($\partial T'/\partial t$), на пространственную моду E ($E(x,y)$); N_x и N_y – число шагов сетки в зональном и меридиональном направлениях, соответственно. Значения проекций затем были осреднены для всего экваториального Тихого океана (2° с. ш. – 2° ю. ш., 120° в. д. – 70° з. д.).

Результаты исследований и их обсуждение. На первом этапе по данным реанализа CLORYS2v4 были рассчитаны месячные величины составляющих бюджета тепла перемешанного слоя океана – горизонтальной (ADV_{XY}) и вертикальной (ADV_Z) составляющих адвекции, а также нелинейного динамического нагрева (NDH) для всего доступного периода реанализа (1992–2015 гг.). Прочие процессы, связанные с перемешиванием и не описываемые явно, малы по сравнению с остальными составляющими бюджета тепла в период развития Эль-Ниньо [Takahashi, Dewitte, 2016].

В пределах рассматриваемого периода для всех случаев Эль-Ниньо в предыдущих исследованиях были определены тип (канонический или Модоки) и режим (сильный или умеренный), к которым каждое из явлений относится. Так, каноническое Эль-Ниньо 1997–1998 гг. определено как сильное [Takahashi et al., 2011]; явление 2015–2016 гг. ближе к каноническому типу [Осипов, Гущина, 2018] и также относится к режиму сильных явлений [Wang et al., 2019]. Остальные шесть Эль-Ниньо в пределах рассматриваемого периода (1994–1995, 2002–2003, 2004–2005, 2006–2007, 2009–2010, 2014–2015) относятся к типу Модоки и к умеренному режиму [Wang et al., 2019]. Таким образом, для всех рассматриваемых случаев Эль-Ниньо отмечается совпадение канонического типа с сильным режимом и типа Модоки с умеренным режимом.

Заметим, что и при сильных, и при умеренных Эль-Ниньо АТПО проявляются и в центре, и на востоке Тихого океана. При этом росту температуры вне зависимости от типа Эль-Ниньо способствуют и горизонтальная, и вертикальная адвекции (рис. 2). Следует отметить, что роль вертикальных движений значительна на востоке тропического Тихого океана и уменьшается в его центральной части. Таким образом, вклад ADV_Z в формирование аномалии температуры в регионе, соответствующем Е-моды, т. е. на востоке Тихого океана, где отмечается интенсивный апвеллинг, превышает вклад ADV_{XY}. Рост АТПО здесь определяется как уменьшением интенсивности апвеллинга, так и более вы-

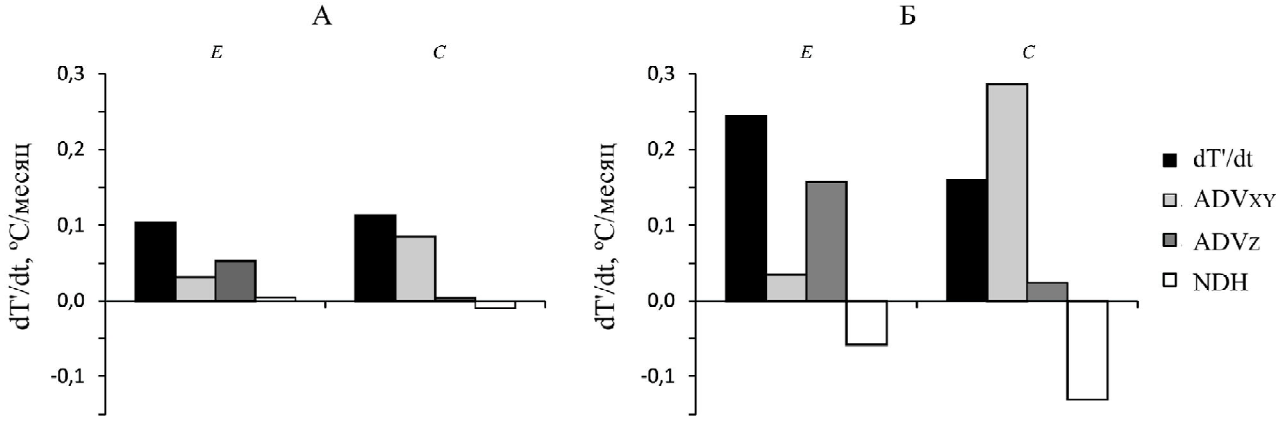

Рис. 2. Проекции изменений теплосодержания и составляющих бюджета тепла перемешанного слоя океана на пространственные моды *E* и *C* в периоды зарождения и развития Эль-Ниньо (март–ноябрь); композиционная схема для А – умеренных , Б – сильных Эль-Ниньо

Fig. 2. Projections of temperature tendency and components of the ocean mixed layer heat budget onto *E* and *C* patterns during El Niño generation and development phases (March to November); the composite scheme for А – moderate, Б – strong El Niños

сокой температурой поднимающейся при апвеллинге воды. В регионе, соответствующем *C*-моде, значительную роль играет ADV_{XY}, что связано с невысокой интенсивностью апвеллинга в центральной части тихоокеанского бассейна. В соответствии с теорией загрузки-разгрузки [Jin, 1997] в центральной части тихоокеанского бассейна велика роль межширотного обмена теплом, который, в частности, способствует росту АТПО в период развития Эль-Ниньо. NDH не вносит значительного вклада в рост теплосодержания перемешанного слоя океана или вовсе приводит к уменьшению положительной аномалии температуры.

Основное различие между сильными и умеренными Эль-Ниньо отмечается, прежде всего, в интенсивности роста аномалии температуры. В целом, при сильных Эль-Ниньо отмечаются большие по своей величине изменения аномалий, что и обеспечивает бо́льшую интенсивность самого явления по сравнению с умеренными. Таким образом, режим Эль-Ниньо определяется, в первую очередь, не соотношением горизонтальной и вертикальной адвекций, а скоростью роста аномалии теплосодержания перемешанного слоя океана, которую эти процессы формируют.

Для адвективных членов был проведен более подробный анализ компонент бюджета тепла. Рассмотрена адвекция аномалий температуры средними климатическими течениями, а также адвекция средней климатической температуры и аномалий температуры аномальными течениями. Проекции адвективных членов на пространственные моды *E* и *C* при сильных и умеренных Эль-Ниньо представлены на рис. 3.

При умеренных Эль-Ниньо основной вклад в формирование аномалии теплосодержания перемешанного слоя океана на востоке тропического тихоокеанского бассейна (*E*-мода) вносят адвекция аномалий температуры аномальными горизонтальны-

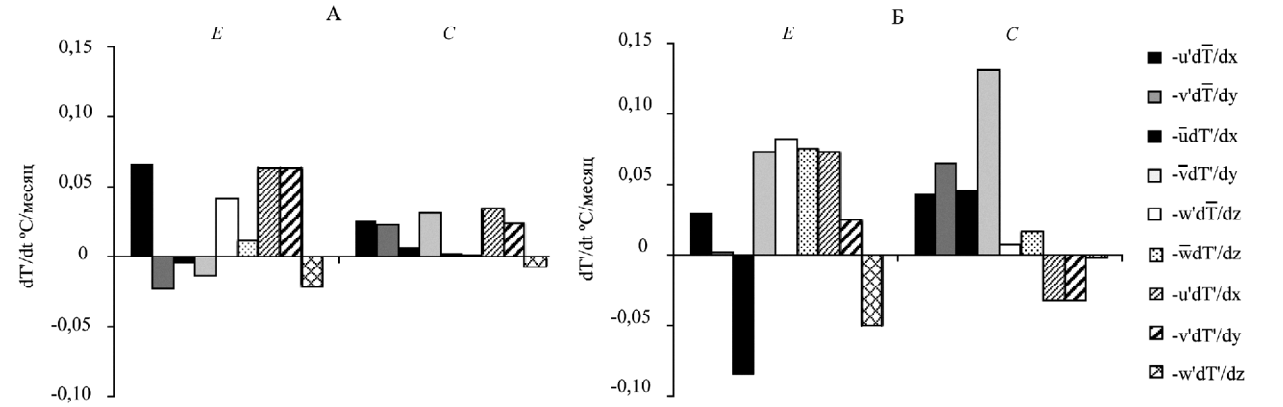

Рис. 3. Проекции адвективных членов на пространственные моды *E* и *C* в периоды зарождения и развития Эль-Ниньо (март–ноябрь); композиционная схема для А – умеренных, Б – сильных Эль-Ниньо

Fig. 3. Projection of advective terms onto *E* and *C* patterns during El Niño co generation and development phases (March to November); the composite scheme for А – moderate, Б – strong El Niños

ми течениями $\left(-u'\frac{\partial\overline{T}}{\partial x} \text{ и } -v'\frac{\partial\overline{T}}{\partial y}\right)$, а также зональная адвекция среднеклиматической температуры аномальными течениями $\left(-u'\frac{\partial\overline{T}}{\partial x}\right)$. Значительный вклад также вносит адвекция средней температуры аномалиями вертикальных движений $\left(-w'\frac{\partial\overline{T}}{\partial z}\right)$, что соответствует ослаблению интенсивности апвеллинга. В центре Тихого океана адвективные члены вызывают меньшие по своей амплитуде изменения АТПО, однако здесь практически все члены приводят к росту положительной аномалии температуры, в то время как на востоке ряд адвективных членов способствует ее уменьшению.

В период формирования сильных Эль-Ниньо резко повышается роль меридиональной адвекции аномалий температуры $-\frac{\overline{v}(\partial T')}{\partial y}$, что свидетельствует об усилении межширотного обмена теплом. На востоке Тихого океана росту теплосодержания способствует вертикальная адвекция $-w'\frac{\partial\overline{T}}{\partial z}$ и $\frac{\overline{w}(\partial T')}{\partial z}$, т. е. отмечается синхронное действие ослабления апвеллинга и подъема при апвеллинге более теплых вод. Члены $-w'\frac{\partial\overline{T}}{\partial z}$ и $-\frac{\overline{u}(\partial T')}{\partial x}$, напротив, способствуют уменьшению аномалии температуры. В центре Тихого океана все члены, кроме представляющих собой адвекцию аномальной температуры аномалиями течений, способствуют росту температуры.

Таким образом, при умеренных Эль-Ниньо отмечается более интенсивный, чем при сильных, нагрев в центре Тихого океана вследствие действия членов, связанных с зональной и меридиональной адвекцией. При сильных Эль-Ниньо на востоке тихоокеанского бассейна значительно возрастает роль членов, связанных с вертикальной адвекцией; роль горизонтальной адвекции температуры, напротив, снижается. Отметим, что при сильных Эль-Ниньо адвекция аномалий температуры аномальными зональными, меридиональными и вертикальными движениями препятствует росту положительной АТПО.

Выводы:

– в современных климатических условиях вне зависимости от типа Эль-Ниньо горизонтальная и вертикальная адвекции приводят к росту теплосодержания верхнего перемешанного слоя тропического Тихого океана в период развития Эль-Ниньо, причем на востоке Тихого океана основной вклад в формирование аномалий теплосодержания вносит вертикальная адвекция, а в его центральной части – горизонтальная;

– основные различия механизма формирования аномалий температуры верхнего перемешанного слоя при двух типах Эль-Ниньо заключаются в соотношении интенсивности роста аномалии температуры за счет горизонтальной и вертикальной адвекций;

– при анализе адвективных членов было выявлено, что при умеренных Эль-Ниньо отмечается более интенсивный нагрев вследствие действия процессов, связанных с зональной и меридиональной адвекциями в центре Тихого океана; при сильных Эль-Ниньо значительно повышается вклад процессов, связанных с вертикальной адвекцией, особенно на востоке Тихого океана, в то время как адвекция аномалий температуры аномальными движениями препятствует росту положительной АТПО в центральной части Тихого океана.

Благодарности. Исследование было выполнено в рамках госбюджетной темы НИР АААА-А16-116032810086-4 и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-00767).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Железнова И.В. Отклик в системе океан–атмосфера на каноническое Эль-Ниньо и Эль-Ниньо Модоки : дис. … кан. геогр. наук. М., 2015. 264 с.

Осипов А.М., Гущина Д.Ю. Эль-Ниньо 2015–2016 гг.: эволюция, механизмы, сопутствующие удаленные аномалии // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. № 3. С. 54–81.

Ashok K., Behera S.K., Rao S.A., Weng H., Yamagata T. El Niño Modoki and its possible teleconnection. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, vol. 112, iss. C11, C11007.

An S.-I., Jin F.-F. Nonlinearity and asymmetry of ENSO. *Journal of Climate*, 2004, vol. 17, p. 2399–2412.

Bjerknes J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Monthly Weather Review*, 1969, vol. 97, p. 163–172.

Cai W., Borlace S., Lengaigne M., van Rensch P., Collins M., Vecchi G., Timmermann A., Santoso A., McPhaden M.J., Wu L., England M.H., Wang G., Guilyardi E., Jin F.F. Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 2014, vol. 4, p. 111–116.

Cai W., Wang G., Dewitte B., Wu L., Santoso A., Takahashi K., Yang Y., Carreric A., McPhaden M.J. Increased variability of eastern Pacific El Niño under greenhouse warming. *Nature*, 2018, vol. 564, p. 201–206.

Jin F.F. An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part I: Conceptual model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1997, vol. 54, no. 7, p. 811–829.

Jin F.-F., An S.-I., Timmermann A., Zhao J. Strong El Niño events and nonlinear dynamical heating. *Geophysical Research Letters*, 2003, vol. 30, 1120.

Jin, F.-F., Kim, S.T., Bejarano L. A coupled-stability index for ENSO. *Geophysical Research Letters*, 2006, vol. 33, L23708.

Kao H.Y., Yu J.Y. Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of ENSO. *Journal of Climate*, 2009, vol. 22, no. 3, p. 615–632.

Kim W., Cai W, Kug J.-S. Migration of atmospheric convection coupled with ocean currents pushes El Niño to extremes. *Geophysical Research Letters*, 2015, vol. 42, p. 3583–3590.

Kug J.S., Jin F.F., An S.I. Two types of El Niño events: cold tongue El Niño and warm pool El Niño. *Journal of Climate*, 2009, vol. 22, no. 6, p. 1499–1515.

Rasmusson E.M., Carpenter T.H. Variations in Tropical Sea Surface Temperature and Surface Wind Fields Associated with the Southern Oscillation /El Niño. *Monthly Weather Review*, 1982, vol. 110, p. 354–384.

Santoso A., McPhaden M.J., Cai W. The defining characteristics of ENSO extremes and the strong 2015/2016 El Niño. *Reviews of Geophysics*, 2017, vol. 55, p. 1079–1129.

Takahashi K., Montecinos A., Goubanova K., Dewitte B. ENSO regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño. *Geophysical Research Letters*, 2011, vol. 38, no. 10, L10704.

Takahashi K., Dewitte B. Strong and moderate nonlinear El Niño regimes. *Climate Dynamics*, 2016, vol. 46, p. 1627–1645.

Takahashi K., Karamperidou C., Dewitte B. A theoretical model of strong and moderate El Niño regimes. *Climate Dynamics*, 2019, vol. 52, p. 7477–7493.

Wang B., Luo X., Yang Y.-M., Sun W., Cane M.A., Cai W., Yeh S.-W., Liu J. Historical change of El Niño properties sheds light on future changes of extreme El Niño. *PNAS*, 2019, vol. 116(45), p. 22512–22517.

Yeh S.-W., Kug J.-S., Dewitte B., Kwon M.-H., Kirtman B.P., Jin F.F. El Niño in a changing climate. *Nature*, 2009, vol. 461, p. 511–514.

Электронные ресурсы

Quality information document for global ocean reanalysis products global-reanalysis-PHY-001-025. Copernicus Marine Environment Monitoring Service. URL: https://resources.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-GLO-QUID-001-025.pdf (дата обращения 04.10.2019).

Поступила в редакцию 13.01.2020
После доработки 16.07.2020
Принята к публикации 25.08.2020

A.M. Osipov[1], D.Yu. Gushchina[2]

MECHANISM OF GENERATING TWO TYPES OF EL NIÑO UNDER MODERN CLIMATIC CONDITIONS

The contribution of horizontal and vertical advection and nonlinear dynamic heating to the formation of positive sea surface temperature anomaly during two types of El Niño is evaluated from the analysis of the ocean upper mixed layer heat budget using the GLORYS2v4 reanalysis data. The oceanic processes responsible for the increasing temperature anomaly during canonical and Modoki El Niños were identified for the modern climatic conditions (1992–2015). It is demonstrated that during the development phase of both types of El Niño the vertical and horizontal advection results in the growth of the upper mixed layer heat budjet in the tropical parts of the Pacific. The vertical advection plays the key role in the formation of heat anomaly in the eastern tropical Pacific for both El Niños while the horizontal advection prevails in the central tropical Pacific. The difference between the mechanism of heat content anomaly formation for canonical and Modoki El Niño is due to the different intensity of temperature growth. Moderate El Niños are characterized by intensive heating in the central tropical Pacific caused by zonal and meridional advection. During strong El Niños the contribution of vertical advection increases, especially in the eastern Pacific. Nonlinear dynamic heating is not supportive of the positive temperature anomaly growth, even causing the anomaly decrease in some cases.

Key words: canonical and Modoki El Niño, El Niño generat ion mechanism, heat budget of the upper mixed layer of ocean

Acknowledgements. The study was undertaken within the scientific research topic AAAA-A16-116032810086-4 and finantially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-05-00767).

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, post-graduate student; *e-mail*: sashaosipov@list.ru

[2] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Professor, D.Sc. in Geography; *e-mail*: dasha155@mail.ru

REFERENCES

Ashok K., Behera S.K., Rao S.A., Weng H., Yamagata T. El Nińo Modoki and its possible teleconnection. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, vol. 112, iss. C11, C11007.

An S.-I, Jin F.-F. Nonlinearity and asymmetry of ENSO. *Journal of Climate*, 2004, vol. 17, p. 2399–2412.

Bjerknes J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Monthly Weather Review*, 1969, vol. 97, p. 163–172.

Cai W., Borlace S., Lengaigne M., van Rensch P., Collins M., Vecchi G., Timmermann A., Santoso A., McPhaden M.J., Wu L., England M.H., Wang G., Guilyardi E., Jin F.F. Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 2014, vol. 4, p. 111–116.

Cai W., Wang G., Dewitte B., Wu L., Santoso A., Takahashi K., Yang Y., Carreric A., McPhaden M.J. Increased variability of eastern Pacific El Niño under greenhouse warming. *Nature*, 2018, vol. 564. p. 201–206.

Jin F.F. An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part I: Conceptual model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1997, vol. 54, no. 7, p. 811–829.

Jin F.-F., An S.-I., Timmermann A., Zhao J. Strong El Niño events and nonlinear dynamical heating. *Geophysical Research Letters*, 2003, vol. 30, 1120.

Jin F.-F., Kim S.T., Bejarano L. A coupled-stability index for ENSO. *Geophysical Research Letters*, 2006, vol. 33, L23708.

Kao H.Y., Yu J.Y. Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of ENSO. *Journal of Climate*, 2009, vol. 22, no. 3, p. 615–632.

Kim W., Cai W, Kug J.-S. Migration of atmospheric convection coupled with ocean currents pushes El Niño to extremes. *Geophysical Research Letters*, 2015, vol. 42, p. 3583–3590.

Kug J.S., Jin F.F., An S.I. Two types of El Nico events: cold tongue El Niño and warm pool El Niño. *Journal of Climate*, 2009, vol. 22, no. 6, p. 1499–1515.

Osipov A.M., Gushchina D.Yu. El Niño 2015–2016 gg.: evoljucija, mehanizmy, soputstvujushhie udalennye anomalii [El Niño 2015–2016: evolution, mechanisms and related anomalies]. *Fundamental'naja i prikladnaja klimatologija*, 2018, vol. 3, p. 54–81. (In Russian)

Rasmusson E.M., Carpenter T.H. Variations in Tropical Sea Surface Temperature and Surface Wind Fields Associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Monthly Weather Review*, 1982, vol. 110, p. 354–384.

Santoso A., McPhaden M.J., Cai W. The defining characteristics of ENSO extremes and the strong 2015/2016 El Niño. *Reviews of Geophysics*, 2017, vol. 55, p. 1079–1129.

Takahashi K., Montecinos A., Goubanova K., Dewitte B. ENSO regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño. *Geophysical Research Letters*, 2011, vol. 38, no. 10, L10704.

Takahashi K., Dewitte B. Strong and moderate nonlinear El Niño regimes. *Climate Dynamics*, 2016, vol. 46, p. 1627–1645.

Takahashi K., Karamperidou C., Dewitte B. A theoretical model of strong and moderate El Niño regimes. *Climate Dynamics*, 2018, vol. 52, p. 7477–7493.

Wang B., Luo X., Yang Y.-M., Sun W., Cane M.A., Cai W., Yeh S.-W., Liu J. Historical change of El Niño properties sheds light on future changes of extreme El Niño. *PNAS*, 2019, vol. 116, p. 22 512–22 517.

Yeh S.-W., Kug J.-S., Dewitte B., Kwon M.-H., Kirtman B.P., Jin F.F. El Niño in a changing climate. *Nature*, 2009, vol. 461, p. 511–514.

Zheleznova I.V. Otklik v sisteme okean-atmosfera na canonicheskoe El Niño i El Niño Modoki [The response of the ocean-atmosphere system to canonical and Modoki El Niño]. PhD Thesis in Geography, Moscow, 2015, 264 p. (In Russian)

Web resource

Quality information document for global ocean reanalysis products global-reanalysis-PHY-001-025. Copernicus Marine Environment Monitoring Service, URL: https://resources.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-GLO-QUID-001-025.pdf (access date 04.10.2019).

Received 13.01.2020
Revised 16.07.2020
Accepted 25.08.2020

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ СТАТЕЙ К ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. СЕРИЯ 5. ГЕОГРАФИЯ»

Общие требования к статье

Журнал «Вестник Московского университета. Серия 5. География» публикует результаты оригинальных исследований в различных областях географической науки, теоретические, методические и обзорные статьи, представляющие интерес для мирового научного сообщества. Представленные к опубликованию материалы должны соответствовать формальным требованиям журнала, пройти процедуру слепого рецензирования и получить рекомендацию к публикации на заседании редколлегии журнала. Решение о публикации принимается на основе научной значимости и актуальности представленных материалов. Статьи, отклоненные редакционной коллегией, повторно не принимаются и не рассматриваются.

Объем статьи (текст, таблицы, список литературы, рисунки, пер евод на английский) не должен превышать 1 а. л. (40 тыс. печатных знаков, включая пробелы), не более 50 тыс. знаков для обзорных статей. Объем кратких сообщений составляет 0,25 а. л. Рекомендуемый список литературы – до 30 наиболее актуальных работ по рассматриваемому вопросу. В обзорных статьях список литературы не должен превышать 60 источников. Для кратких сообщений список литературы может быть до 10 источников. Самоцитирований в списке литературы не должно быть более 10% от общего числа использованных источников.

Статья должна быть четко структурирована и включать рубрики: введение; материалы и методы исследований; результаты исследований и их обсуждение; выводы; список литературы.

Все материалы статьи компонуются в ***единый сводный файл в формате Word*** и размещаются в нем в следующей последовательности:

1. УДК;
2. Название статьи;
3. Инициалы и фамилия автора(ов);
4. Для каждого автора приводится полное название учреждения, в котором выполнялось исследование, подразделение (кафедра, лаборатория и т. п.), уч. степень, должность, *e-mail*;
5. Аннотация статьи;
6. Ключевые слова;
7. Текст статьи;
8. Благодарности, в том числе – финансирование;
9. Список литературы;
10. Таблицы;
11. Подрисуночные подписи;
12. Рисунки;
13. Перевод на английский язык пунктов 2–6, 8–9, 11. В пункте 4 просьба использовать в переводе официальное наименование организации на английском языке (а не собственный вариант перевода).

Подготовка текста

Текст набирается 12 кеглем через один интервал, поля слева, сверху и снизу – 2 см, справа – 1,5 см. Не допускается использование табулятора или пробелов для обозначения абзаца, ручных переносов в словах, переносов строк клавишей Enter в рамках одного предложения, разрывов страниц и разделов. В тексте статьи возможно использование полужирного шрифта и курсива для смысловых выделений, однако не должно использоваться подчеркивание. Десятичная часть чисел отделяется запятой.

Формулы набираются в редакторе формул в отдельную строку и имеют сквозную нумерацию по всей статье, выровненную по правому краю строки.

Таблицы набираются в Word, не допускается разделение ячеек косой линией. Ручные переносы не допускаются.

Рисунки представляются отдельными файлами, названными по номерам рисунков (например: рис.1.tiff, рис.2.jpg), в графическом формате (eps, tif, jpg) разрешением не менее 300 dpi для полутоновых и 600 dpi для черно-белых изображений. Для графиков, выполненных в Excel, дополнительно прикладываются соответствующие файлы Excel. Картинки должны быть полностью готовы к изданию. Представление рисунков в виде схем Word или набранного текста с добавлением графических элементов, наложенных сверху, **не допускается**.

Ссылка на источник в тексте документа указывается в квадратных скобках. В тексте ссылки через запятую указывается фамилия автора и год издания. Если ссылок несколько – они отделяются друг от друга точкой с запятой. Ссылка на источник на иностранном языке указывается на языке оригинала. Список русскоязычной литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1–2003, 7.82–2001 и 7.0.5–2008. DOI (при наличии) указывается в конце ссылки. Ссылка на источник на английском языке оформляется единообразно и в русскоязычном, и в переведенном на английский язык списке литературы. **При наличии у русскоязычного издания, которое фигурирует в списке литературы, оригинальной или переводной англоязычной версии в ссылке должна быть указана именно она, а не русскоязычный вариант.**

Более подробные инструкции по подготовке статей для авторов можно найти на сайте журнала https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/index.

Статьи, оформленные не по правилам, будут возвращаться автору на переработку.

Статьи принимаются на географическом факультете в редакции, через сайт журнала и по электронной почте.

Редакция: комната 2108а, тел. +7(495)-939-29-23. Сайт журнала https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/index. Электронная почта: vestnik_geography@mail.ru

Плата за публикацию не взимается.