

Вестник Московского университета

Серия 5 ГЕОГРАФИЯ

Издательство Московского университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в ноябре 1946 г.

2024 • Т. 79 • № 6

НОЯБРЬ–ДЕКАБРЬ

Выходит один раз в два месяца

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

СОДЕРЖАНИЕ

География и экология

- Коноплев А.В., Иванов М.М., Комиссаров М.А., Голосов В.Н., Кузьменкова Н.В.
Реконструкция долговременной динамики радиоцезия в водных объектах,
загрязненных в результате ядерных аварий (Чернобыль и Фукусима)..... 3
- Петров Н.А., Чубарова Н.Е. Оценка влияния парниковых газов и атмосферного
аэрозоля на коротковолновую и длинноволновую радиацию для условий
безоблачного неба..... 15

Методы географических исследований

- Хасая Н.М., Гречко Е.А. Географические различия глубины интеграции общих рынков..... 30
- Ткач А.А., Ткач Н.Т., Зенина М.А., Янина Т.А. Витальные изотопные смещения
кислорода остракод Каспийского региона..... 41

Динамика природных процессов

- Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Сазонов А.А., Пахомова О.М., Поздняков С.П., Ван Пин.
Связь между осадками, речным стоком и испаряемостью на европейской
части России и ее изменчивость..... 55
- Ильинова Н.В., Хорошев А.В. Ландшафтные факторы варьирования фитомассы
сельскохозяйственных угодий Оренбургского Предуралья..... 67
- Жуков И.А., Айбулатов Д.Н. Тенденции изменений водного режима малых рек
бассейна Волги за период инструментальных наблюдений..... 81

Региональные исследования

- Сумачев А.Э., Пряхина Г.В., Сыромятина М.В., Кузнецова М.Р., Павловский А.А.,
Осипова Т.Н., Матвеева И.Г., Лемешко Н.А. Гидрологический режим рек
Ростовской области в условиях изменения климата..... 91
- Балабейкина О.А., Коробущенко В.Ю. Сокращение числа сельских населенных
пунктов в Республике Удмуртия с 1920-х до 2000-х гг. 106
- Шайфуллин М.Р., Гордиенко О.А., Кулик А.В. Особенности пространственного
распределения мощностей органогенных и гумусовых горизонтов почв
в лесомелиорированных ландшафтах сухостепной зоны..... 116
- Иванов В.А., Голосов В.Н., Цыпленков А.С., Коноплев А.В. Влияние суммарного
стока наносов на эрозионно-аккумулятивные процессы в долине ручья
Джанкуат, Большой Кавказ..... 129

- Указатель статей и материалов, опубликованных в журнале в 2024 г. 146

CONTENTS

Geography and ecology

- Konoplev A.V., Ivanov M.M., Komissarov M.A., Golosov V.N., Kuzmenkova N.V.*
Reconstruction of the long-term dynamics of radioactive cesium in water bodies
contaminated as a result of nuclear accidents (case studies of Chernobyl
and Fukushima)..... 3
- Petrov N.A., Chubarova N.E.* The assessment of shortwave and longwave radiative
forcing of greenhouse gases and atmospheric aerosol for the cloudless sky conditions..... 15

Methods of geographical studies

- Khasaya N.M., Grechko E.A.* Geographical differences in the depth of integration
of the world's common markets 30
- Tkach A.A., Tkach N.T., Zenina M.A., Yanina T.A.* Vital isotopic $\delta^{18}\text{O}$ offset in Ostracods
of the Caspian Sea region 41

Dynamics of natural processes

- Grigoriev V.Yu., Frolova N.L., Sazonov A.A., Pakhomova O.M., Pozdnyakov S.P., Wang Ping.*
Relationship between precipitation, river runoff and evaporation
over the European Russia and its variability 55
- Ilinova N.V., Khoroshev A.V.* Landscape drivers of phytomass variation on agricultural
lands in the Orenburg Cis-Urals 67
- Zhukov I.A., Aibulatov D.N.* Trends of changes in water regime of small rivers
in the Volga river basin during the period of instrumental observations..... 81

Regional studies

- Sumachev A.E., Pryakhina G.V., Syromyatina M.V., Kuznetsova M.R., Pavlovsky A.A.,
Osipova T.N., Matveeva I.G., Lemesko N.A.* Hydrological regime of rivers
in the Rostov region under the climate change..... 91
- Balabeikina O.A., Korobuschenko V.Yu.* Reduction in the number of rural settlements
in the Republic of Udmurtia during 1920s–2000s..... 106
- Shayfullin M.R., Gordienko O.A., Kulik A.V.* Spatial distribution patterns of the depth
of soil organogenic and humus horizons in forested landscapes of the dry-steppe zone... 116
- Ivanov V.A., Golosov V.N., Tsyplenkov A.S., Konoplev A.V.* The effect of total sediment
runoff on erosion and accumulation processes in the valley of the Djankuat stream,
Greater Caucasus..... 129

ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 631.43.539.16

РЕКОНСТРУКЦИЯ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ РАДИОЦЕЗИЯ В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ ЯДЕРНЫХ АВАРИЙ (ЧЕРНОБЫЛЬ И ФУКУСИМА)

А.В. Коноплев¹, М.М. Иванов², М.А. Комиссаров³, В.Н. Голосов⁴, Н.В. Кузьменкова⁵

¹ Институт радиоактивности окружающей среды Фукусимского университета, Япония
^{1, 2, 4, 5} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
лаборатория геохимии природных вод

^{2, 4, 5} Институт географии РАН, лаборатория геоморфологии

³ Уфимский институт биологии УФИЦ РАН, лаборатория почвоведения

⁴ Казанский (Приволжский) федеральный университет

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет, кафедра радиохимии

¹ Заместитель директора, д-р биол. наук; e-mail: alexeikonoplev@gmail.com

² Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: ivanovm@bk.ru

³ Ст. науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: mkomissarov@list.ru

⁴ Гл. науч. сотр., д-р геогр. наук; e-mail: gollossov@gmail.com

⁵ Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: kuzmenkovanv@my.msu.ru

Исследование посвящено реконструкции долговременной динамики концентрации ^{137}Cs в водных объектах, загрязненных в результате аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1». Установлено, что вертикальное распределение ^{137}Cs в донных отложениях глубоководных участков может служить основой для восстановления динамики концентрации радионуклида на взвеси и в растворе. Для реконструкции используются колонки донных отложений водоохранилищ и экспериментальные значения коэффициента распределения K_d . Метод применим при отсутствии перемешивания осаждаемой взвеси с нижележащими слоями и при значении K_d существенно выше 10^4 л/кг. Исследования в зонах загрязнения Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1» показали возможность успешной реконструкции долговременных изменений концентрации ^{137}Cs для рек, озер и прудов. Полученные данные представляют первую оценку временного хода удельной активности ^{137}Cs на взвеси в водных объектах зоны Чернобыльской АЭС, что важно для понимания его поведения в системе «почва–вода» и миграции по пищевым цепям. Зависимости концентраций ^{137}Cs от времени описываются эмпирической двухэкспоненциальной и/или полуэмпирической диффузионной моделью, применимой для прогнозных оценок долговременной динамики радиоактивного загрязнения водных объектов после ядерных аварий. Результаты исследования подтверждаются данными мониторинга для тестовых водных объектов и удовлетворительным согласованием с восстановленными значениями концентраций ^{137}Cs . Полученная информация имеет большое значение для оценки экологических последствий ядерных аварий и разработки стратегий управления загрязненными территориями. Методология, представленная в исследовании, может быть адаптирована для изучения поведения других радионуклидов в водных экосистемах, способствуя улучшению прогнозирования и управления радиоэкологическими рисками в долгосрочной перспективе.

Ключевые слова: миграция радионуклидов, раствор, взвесь, диффузия, моделирование

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.1

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, 38 лет после аварии на Чернобыльской АЭС (далее – ЧАЭС) и 13 лет после аварии на АЭС «Фукусима-1» (далее – АЭС Ф-1), особый интерес представляет долговременная ди-

намика долгоживущих радионуклидов в водных объектах загрязненных территорий. Это связано как с важностью оценки доз для водной биоты, так и с тем, что в долговременной перспективе именно вода является основным путем выноса радионукли-

дов с загрязненных территорий на дальние расстояния [IAEA, 2006; Igarashi et al., 2022; Taniguchi et al., 2019]. Данные по долговременному изменению содержания радионуклидов в растворе и на взвеси природных вод, подверженных воздействию, доступны далеко не всегда. В особенности, для водных объектов зоны ЧАЭС это касается концентрации радионуклидов на взвеси, поскольку основное внимание систем мониторинга было сосредоточено на содержании радионуклидов в растворе, определяющем их подвижность и биологическую доступность [Konoplev et al., 2021].

Восстановить долговременные изменения ^{137}Cs аварийного происхождения в природных водах можно с помощью анализа его вертикального распределения в донных отложениях в случае озер, прудов и водохранилищ в случае рек. Целью настоящего аналитического обзора является обобщение результатов выполненных в этой области в последние годы исследований и формулировка общих принципов метода, его возможностей и ограничений.

Эмпирическое и полуэмпирическое моделирование долговременной динамики загрязнения водных объектов радиоцезием. После аварии на ЧАЭС временной ход концентрации растворенного ^{137}Cs в загрязненных водных объектах зачастую описывали простой эмпирической моделью в виде суммы нескольких экспоненциальных функций [Hilton, 1997; Monte, 1997; Chernobyl..., 2005]:

$$c(t) = \sum_i C_i^0 e^{-(\lambda + k_i)t}, \quad (1)$$

где $c(t)$ – текущая концентрация ^{137}Cs (на взвеси в Бк/кг, а в растворе в Бк/м³ или Бк/л); λ – константа скорости радиоактивного распада ^{137}Cs , равная 0,023 год⁻¹; k_i – подгоночные значения констант скорости первого порядка i -го процесса (год⁻¹); C_i^0 – подгоночные параметры, t – время. После аварии на АЭС Ф-1 этот подход был также использован многими исследователями для описания динамики как растворенного ^{137}Cs , так и ^{137}Cs на взвеси [Onda et al., 2020; Nakanishi and Sakuma, 2019; Funaki et al., 2020; Taniguchi et al., 2019; Ueda et al., 2021].

В последние годы достаточно широко используется альтернативный способ описания и прогнозирования долговременной динамики радиоцезия в водных объектах, а именно полуэмпирическая диффузионная модель [Коноплев и др., 2021]. Эта модель основана на предположении, что основным источником взвешенного материала в поверхностном стоке является верхний слой почвы водосбора, и вертикальное распределение радиоцезия в нем описывается обыкновенным диффузионным уравнением. В этом случае динамика изменения концентрации ^{137}Cs в верхнем слое почвы, а следова-

тельно, и на взвеси в поверхностном стоке и затем в реке может быть приближенно описана уравнением [Коноплев и др., 2021]:

$$C_p(t) = \frac{\sigma_0}{p\sqrt{\pi D_{eff}t}} e^{-\lambda t} = C_p^0 \frac{e^{-\lambda t}}{\sqrt{t}}, \quad (2)$$

где σ_0 – начальный средний запас ^{137}Cs на водосборе; D_{eff} – среднее по водосбору значение эффективного коэффициента дисперсии; λ – константа скорости радиоактивного распада ^{137}Cs ; p – средняя объемная плотность верхнего слоя почв на водосборе, t – время.

Используя коэффициент распределения, в системе «взвесь–раствор» изменение во времени концентрации ^{137}Cs в растворе может быть приближенно описано уравнением [Коноплев и др., 2021]:

$$C_d(t) = \frac{\sigma_0}{pK_d\sqrt{\pi D_{eff}t}} e^{-\lambda t}. \quad (3)$$

Достоинством этой модели является то, что одно и то же несложное уравнение может быть использовано для описания динамики ^{137}Cs в реках для широкого диапазона времени после аварии за исключением относительно короткого начального периода, когда загрязнение определяется прямыми выпадениями на водную поверхность. При этом используются всего два параметра – D_{eff} и K_d , имеющие ясный физический смысл.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Процессы формирования уровней загрязнения природных вод после ядерной аварии существенно отличаются для различных фаз после аварии. В начальный период после аварии основным путем радиоактивного загрязнения водоемов являются атмосферные выпадения на поверхность воды [Chernobyl..., 2005; Smith et al., 2005]. Эта фаза после аварии продолжается, как правило, от нескольких недель/месяцев до года. По ее завершении основным долговременным источником поступления радионуклидов в водные объекты является поверхностный сток с их водосборов [Smith et al., 2005]. Основным источником радионуклидов как в растворе, так и на взвешенных частицах в поверхностном стоке является верхний слой почвы водосбора. Многочисленные исследования смыва загрязняющих веществ различной природы показали, что эффективная толщина слоя почвы, вступающего во взаимодействие с поверхностным стоком, составляет несколько миллиметров (до 1 см) [Donigian et al., 1977; CREAMS..., 1980; Ahuja et al., 1981]. Концентрация радионуклида в верхнем «контактном» слое почвы уменьшается со временем вследствие его вертикальной миграции в более глубокие слои. Соответственно, уменьшается концентрация радионуклида на взвеси и, как следствие, в растворе

в поверхностном стоке и затем в водных объектах [Konoplev et al., 2021]. Взвесь поверхностного стока при его поступлении в озера или пруды осаждается на их дне в отложениях [Konoplev et al., 2022a], а в случае рек накапливается в донных отложениях водохранилищ [Ivanov et al., 2021; Konoplev et al., 2022b]. Таким образом, формируется вертикальный профиль наносов и связанного с ними радионуклида в донных отложениях.

Максимальные концентрации радионуклида в профиле донных отложений соответствуют начальному периоду после аварии. В тех случаях, когда перемешивание наносов в профиле донных отложений пренебрежимо мало, а радионуклид прочно связан с наносами, т. е. его коэффициент распределения в системе «взвесь–вода» (отношение концентрации радионуклида на взвеси к его концентрации в растворе) $K_d > 10^4$ л/кг [IAEA, 2010], максимум в вертикальном распределении радионуклида должен быть ярковыраженным, т. е. «острым» и без размытого фронта. Концентрация радионуклида в наносах выше максимума должна постепенно падать вплоть до поверхностного слоя отложений и соответствовать уменьшению со временем его содержания в верхнем слое почвы на водосборе водоема. Тогда положение максимума служит временной меткой аварии, а по профилю над пиком можно восстановить временной ход концентрации радионуклида на взвеси в водоеме, располагая данными по динамике среднегодовой скорости осадконакопления или, в первом приближении, предполагая ее постоянной на протяжении периода после аварии [Konoplev et al., 2022a, 2022b]. Не каждый профиль донных отложений может быть использован для реконструкции изменения концентраций радиоцезия в водном объекте. Кроме того, что колонка донных отложений должна отбираться в зоне аккумуляции наносов, необходимо, чтобы область отбора донных отложений не подвергалась антропогенному вмешательству и биотурбации биотой водного объекта. Опыт показывает, что в этом отношении даже колонки, отобранные вблизи друг от друга, могут существенно отличаться по перечисленным условиям [Konoplev et al., 2022b].

Коэффициент распределения K_d чернобыльского радиоцезия, как правило, лежит в пределах 10^4 – 10^5 л/кг, в то время как для фукусимского радиоцезия он как минимум на порядок больше – 10^5 – 10^6 л/кг. Таким образом, условие прочной связи радиоцезия с наносами выполняется для водных объектов как Чернобыльской [Ivanov et al., 2021], так и Фукусимской зон радиоактивного загрязнения. Необходимо также принимать во внимание, что в случае аварии на ЧАЭС радионуклиды были выброшены в атмосферу в значительной мере в составе топливных частиц,

нерастворимых в воде (в среднем порядка 75% для радиоцезия) [Бобовникова и др., 1991]. При этом формы выпадений радиоцезия существенным образом зависели от расстояния до ЧАЭС, поскольку топливные частицы выпадали в основном вблизи от аварийного реактора, а на большие расстояния переносился радиоцезий в составе конденсационных мелких частиц. С течением времени в почве происходит постепенное выщелачивание радионуклидов из топливных частиц в результате их разрушения и окисления кислородом воздуха. Однако в донных отложениях в отсутствие кислорода топливные частицы значительно более устойчивы и радионуклиды там выщелачиваются медленнее (примерно на порядок величины), чем в почве [Bulgakov et al., 2009]. Это еще более усиливает связанность радионуклидов с наносами особенно в зоне отчуждения ЧАЭС [Konoplev et al., 2022a] и является причиной того, что средние значения K_d для водных объектов ближней зоны были выше значений для водоемов на удаленных участках следа, например в Тульской области.

При выполнении перечисленных условий естественно предположить, что концентрация радиоцезия в каждом индивидуальном слое колонки донных отложений, скорректированная с учетом радиоактивного распада, соответствует его концентрации на взвеси в период времени, в течение которого этот слой формируется путем ее осаждения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Восстановление долговременного изменения концентрации ^{137}Cs аварийного происхождения в реках на основе его вертикального распределения в донных отложениях их водохранилищ. ^{137}Cs в реке, загрязненной в результате аварии на ЧАЭС в 1986 г. В первые годы после аварии на ЧАЭС важнейшие водные объекты, подвергшиеся радиоактивному загрязнению, контролировались системой мониторинга Госкомгидромета СССР на содержание радионуклидов [Вакуловский и др., 1991; Vakulovsky et al., 1994]. Однако, после 1991 г. мониторинг радиоактивного загрязнения природных вод в районах России, загрязненных в результате аварии на ЧАЭС, не осуществлялся. Между тем потребность в таких данных для достоверной оценки доз населения и биоты осталась. Возможность реконструкции концентраций ^{137}Cs в реках на основе его вертикальных профилей в донных отложениях была впервые изучена и опробована в работах [Konoplev et al., 2019; Ivanov et al., 2021] для р. Упа, протекающей через «Тульское пятно» Чернобыльского следа и расположенного на ней Щекинского водохранилища (рис. 1). На рис. 2А приведено вертикальное

распределение ^{137}Cs в одной из колонок донных отложений Щекинского водохранилища, отобранных в феврале 2018 г. [Ivanov et al., 2021].

Средняя скорость осадконакопления за 32 года после аварии на ЧАЭС составляла около 5 см/год (см. рис. 2А). На рис. 2 приведены также результаты восстановления удельной активности ^{137}Cs на взвеси (Б) и удельной активности ^{137}Cs в растворе (В) в р. Упе по его вертикальному профилю в донных

отложениях Щекинского водохранилища на основе данных [Ivanov et al., 2021]. Необходимо отметить, что, поскольку удельная активность ^{137}Cs на взвеси вообще не измерялась системой мониторинга, приведенные впервые оценки представляют интерес как с точки зрения радиационной безопасности в регионе, так и с точки зрения изучения геоморфологических процессов на водосборе р. Упы [Golosov, Ivanov, 2020].

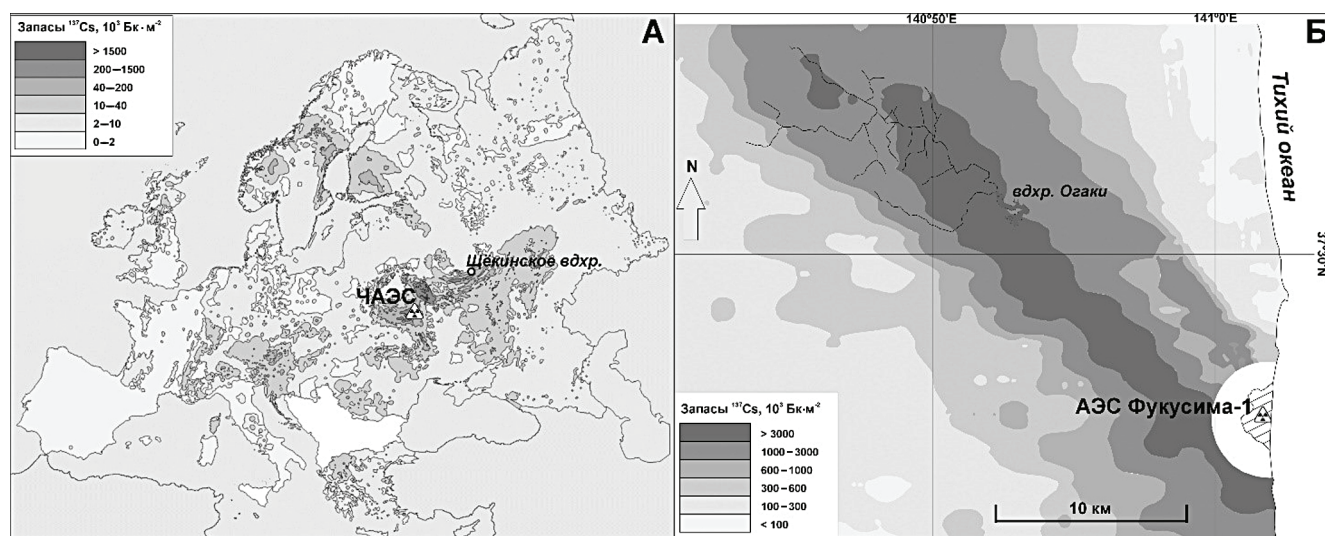


Рис. 1. Расположение объектов исследования: А – на европейской территории России; Б – на острове Хонсю в Японии

Fig. 1. Location of studied objects: A – in the European territory of Russia; Б – on the Honshu Island in Japan

Таким образом, в работах [Konoplev et al., 2019; Ivanov et al., 2021] впервые была предпринята попытка использовать вертикальные профили ^{137}Cs в донных отложениях водохранилища не только для изучения процессов осадконакопления на дне водоемов и стока наносов с их водосборов, но и для реконструкции долговременной динамики радиоактивного загрязнения рек после ядерных аварий. Точность метода может быть улучшена с помощью аппроксимации пика ^{137}Cs в профиле донных отложений функцией Гаусса, взяв за основу нижнее плечо его распределения, т. е. часть профиля, расположенного ниже максимума. В этом случае реальные концентрации ^{137}Cs в первые годы после аварии будут равны скорректированным на распад его концентрации в соответствующих слоях профиля за вычетом «хвостовых» значений концентраций ^{137}Cs распределения пика по Гауссу [Ivanov et al., 2021]. Улучшение точности метода возможно также в том случае, если есть дополнительная информация о скорости осадконакопления в водохранилище. Например, это возможно осуществить при сочетании метода с хронологией осадконакопления с использованием ^{210}Pb [Appleby et al., 2003; Putyrskaya

et al., 2020]. В свою очередь многолетние изменения скорости осадконакопления можно параметризовать через долговременные изменения годовых осадков [Konoplev et al., 2022a, 2022b].

^{137}Cs в реке, загрязненной в результате аварии на АЭС Ф-1 в 2011 г. Впоследствии предложенный метод реконструкции временного хода радиоактивного загрязнения реки по вертикальному распределению ^{137}Cs в донных отложениях ее водохранилища был использован для зоны аварии на АЭС Ф-1. Также как при аварии на ЧАЭС в 1986 г., в случае аварии на АЭС Ф-1 в 2011 г. произошло загрязнение ^{137}Cs бассейнов речных систем Абукума, Мано, Нитта, Ота, Укедо, Маеда, Кума и др. [Igarashi et al., 2022; Onda et al., 2020; Taniguchi et al., 2019], которые впадают в Тихий океан, вынося туда радиоцезий как в растворе, так и на взвеси.

Климат и географические условия префектуры Фукусима в Японии и зоны аварии на ЧАЭС существенно различаются. Так, ландшафты на водосборах Чернобыльской зоны равнинные и характеризуются небольшими уклонами, в то время как ландшафты на водосборах Фукусимы являются в основном горными с большими уклонами, при этом

также отмечаются и геохимические особенности почвенного покрова. Среднегодовые суммы осадков также сильно различаются: для Чернобыльской зоны она составляет порядка 600 мм, а для зоны АЭС Ф-1 – 1200–1800 мм, т. е. в 2–3 раза больше [Коноплев и др., 2021; Onda et al., 2020].

Помимо геоклиматических и геохимических различий районов радиоактивного загрязнения Фукусимы и Чернобыля отличаются также начальные формы нахождения радионуклидов. В случае аварии на ЧАЭС радиоцезий был выброшен в атмо-

сферу, в значительной мере (до 75%) в составе топливных частиц, нерастворимых в воде [Бобовникова и др., 1991]. При этом формы выпадений радиоцезия в результате аварии на ЧАЭС существенным образом зависели от расстояния до ЧАЭС, поскольку топливные частицы выпадали, в основном, вблизи от аварийного реактора, а на большие расстояния переносился радиоцезий в составе конденсационных мелких частиц. С течением времени происходит постепенное выщелачивание радиоцезия из топливных частиц в результате их разрушения и окисления.

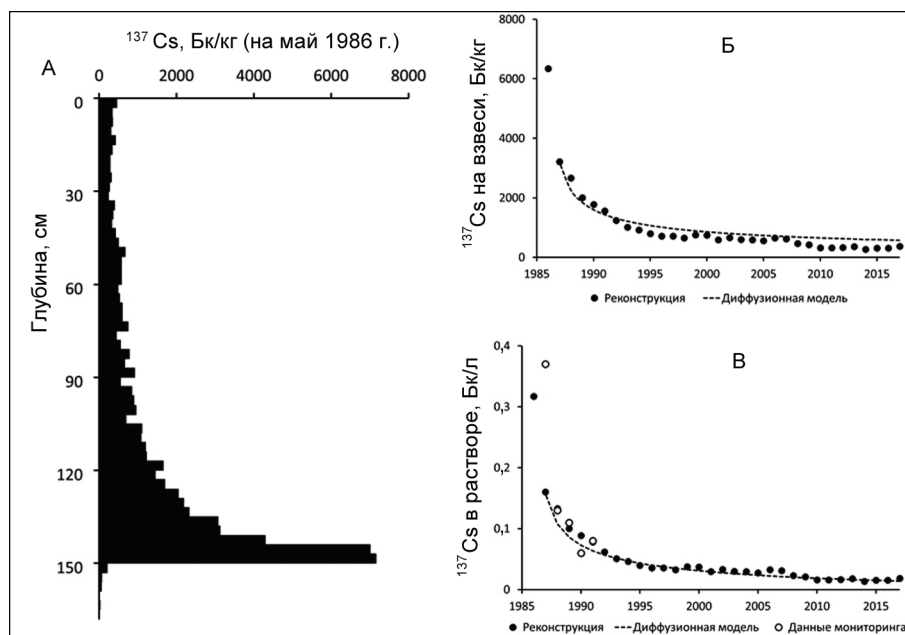


Рис. 2. Реконструкция ^{137}Cs в р. Упе после аварии на ЧАЭС и сравнение с результатами расчетов по диффузионной модели [Коноплев и др., 2021] при коэффициенте распределения ^{137}Cs в реках этого региона $2 \cdot 10^4$ л/кг и данными мониторинга ^{137}Cs в р. Упе в первые годы после аварии на ЧАЭС (1986–1991) [Вакуловский и др., 1991; Vakulovsky et al., 1994]: А – восстановление долговременной динамики удельной активности ^{137}Cs в р. Упе (Тульская обл.) в течение 32 лет после аварии на ЧАЭС на основе его профиля в колонке донных отложений Щекинского вдхр., отобранной в феврале 2018 г., с запасом ^{137}Cs 1260 кБк/м² на основе данных [Ivanov et al., 2021]; реконструированные зависимости от времени после аварии на ЧАЭС концентраций ^{137}Cs в р. Упе на входе в водохранилище: Б – на взвеси; В – в растворе

Fig. 2. Reconstruction of ^{137}Cs in the Upa River after the Chernobyl accident and comparison with the results of calculations using the diffusion model [Konoplev et al., 2021] with a ^{137}Cs distribution coefficient in the rivers of this region of $2 \cdot 10^4$ l/kg and ^{137}Cs monitoring data in the Upa River in the first years after the Chernobyl accident (1986–1991) [Vakulovsky et al., 1991; Vakulovsky et al., 1994]: А – reconstruction of the long-term dynamics of the specific activity of ^{137}Cs in the Upa River. Upa (Tula region) for 32 years after the Chernobyl accident based on its profile in the bottom sediment core of the Shchekino reservoir, collected in February 2018, with a ^{137}Cs reserve of 1260 kBq/m² based on data from [Ivanov et al., 2021]; reconstructed dependencies on time after the Chernobyl accident of ^{137}Cs concentrations in the Upa river at the entrance to the reservoir: Б – in suspension; В – in solution

В первое время после аварии на АЭС Ф-1 полагали, что радиоцезий в выпадениях находился в основном в виде сульфатов в подвижном состоянии, т. е. в растворимых и обменных формах [Kaneyasu et al., 2012]. Однако позднее были получены данные о том, что значительная доля радиоцезия выпала в составе стекловидных горячих частиц, нерастворимых в воде [Ikehara et al., 2018].

Выщелачивание радиоцезия из этих частиц происходит в окружающей среде значительно медленнее, чем из топливных частиц чернобыльского происхождения [Okumura et al., 2019]. Таким образом, различие начальных форм радиоцезия в выпадениях в Чернобыле и Фукусиме, а кроме того, различие в содержании глинистых минералов в почве и других ее свойств (водопроницае-

мости, кислотности и плотности), определяющих процессы его селективной сорбции и фиксации почвенными частицами, могут оказывать существенное влияние на транспорт наносов и радиоцезия с загрязненных водосборов и их накопления в донных отложениях. Поэтому важно было проверить применимость метода реконструкции временного хода загрязнения рек радиоцезием в зоне аварии АЭС Ф-1 в существенно отличающихся геоклиматических и геохимических условиях и специфических форм нахождения радиоцезия в системе «почва–вода».

На рис. 3А приведен один из профилей ^{137}Cs в донных отложениях водохранилища Огаки, расположенного на одной из наиболее загрязненных рек зоны аварии АЭС Ф-1 Укедо, на октябрь 2019 г. [Konoplev et al., 2022b]. Профиль соответствует критериям реконструкции загрязнения реки ^{137}Cs . Рис. 3Б и 3В иллюстрируют результаты реконструкции временного хода концентраций ^{137}Cs на взвеси и в растворе р. Укедо на входе в водохранилище Огаки, соответственно, и их сравнение с данными мониторинга [Nakanishi, Sakuma, 2019; Funaki et al., 2020].

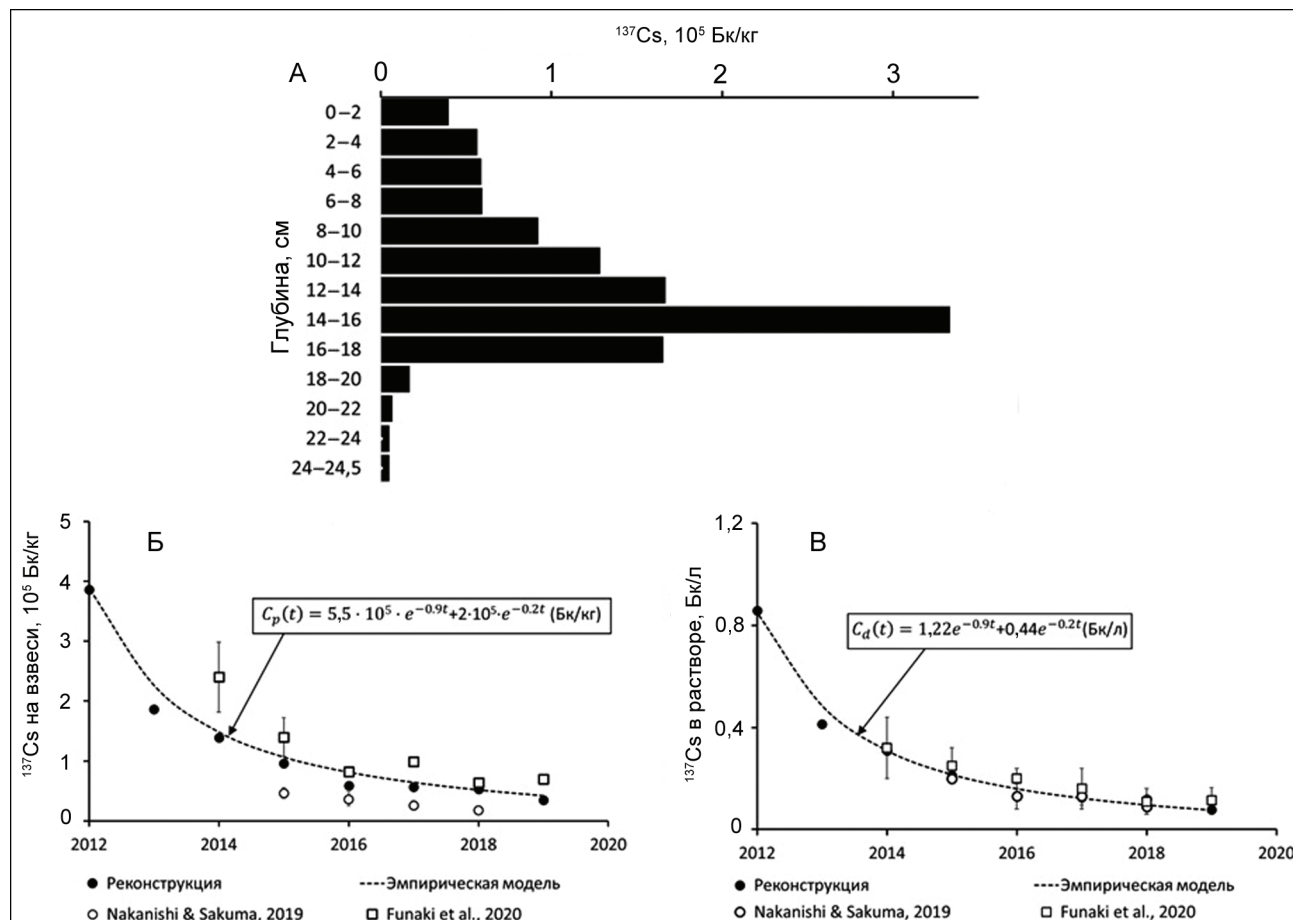


Рис. 3. Вертикальное распределение ^{137}Cs в одной из колонок донных отложений водохранилища Огаки на р. Укедо в зоне аварии АЭС Ф-1, отобранных в октябре 2019 г. (А), и восстановленные на его основе зависимости от времени концентраций ^{137}Cs на взвеси (Б) и в растворе (В) р. Укедо на входе в водохранилище. Для сравнения приведены данные мониторинга [Nakanishi, Sakuma, 2019; Funaki et al., 2020] и результаты расчетов по эмпирической двухэкспоненциальной модели по уравнению (1)

Fig. 3. Vertical distribution of ^{137}Cs in one of the bottom sediment cores from the Ogaki Reservoir on the Ukedo River in the Fukushima Daiichi NPP accident zone, sampled in October 2019 (A), and the reconstructed time-dependent concentrations of ^{137}Cs in suspended matter (Б) and in solution (В) of the Ukedo River at the reservoir inlet. For comparison, monitoring data [Nakanishi and Sakuma, 2019; Funaki et al., 2020] and calculation results using the empirical two-exponential model according to equation (1) are presented

Концентрации растворенного ^{137}Cs были получены с использованием экспериментального значения коэффициента распределения ^{137}Cs в р. Укедо, равного $4,5 \cdot 10^5 \text{ л/кг}$ [Funaki et al., 2020]. Там же для

сравнения приведены результаты расчетов по эмпирической двухэкспоненциальной модели в соответствии с уравнением (1). Видно, что восстановленные концентрации удовлетворительно согласуются

с данными мониторинга при том, что и те, и другие описываются двухэкспоненциальной эмпирической моделью. В то же время диффузионная модель прогнозирует более медленное снижение концентраций ^{137}Cs как на взвеси, так и в растворе. По всей видимости, это может быть связано с тем, что модель предполагает в качестве причины уменьшения содержания ^{137}Cs в верхнем слое естественные процессы его вертикальной миграции в почве [Коноплев и др., 2021], в то время как в зоне аварии АЭС Ф-1, и в том числе на водосборе р. Укедо, японское правительство осуществляло обширную программу ремедиации и дезактивации территорий. Это привело к эффективному искусственному снижению содержания ^{137}Cs в верхнем слое почвы на водосборе и, как следствие, снижению его концентраций в поверхностном стоке [Hardie, McKinley, 2014; Howard et al., 2016; Onda et al., 2020; Feng et al., 2022].

Таким образом, тестирование метода реконструкции долговременной динамики загрязнения реки ^{137}Cs после ядерной аварии на основе его вертикального распределения в донных отложениях глубоководных зон накопления наносов водохранилища показывает его применимость в будущем для целей достоверной оценки доз населения и биоты на загрязненных территориях [Konoplev et al., 2022b].

Восстановление долговременного изменения концентрации ^{137}Cs аварийного происхождения в озерах и прудах на основе его вертикального распределения в донных отложениях. Радиоэкологические исследования на Восточно-Уральском радиоактивном следе [Алексахин и др., 2001], территориях, загрязненных в результате ЧАЭС [Войцехович и др., 2016; Радионуклиды..., 2001; Bulgakov et al., 2002; Bulgakov et al., 2009; Ganzha et al., 2014], показали, что загрязнение радиоцезием наиболее устойчиво в замкнутых и слабопроточных озерах и водоемах, которые оказываются в результате наиболее чувствительными экосистемами по отношению к радиоактивному загрязнению. Исследования на загрязненных территориях в результате аварии на АЭС Ф-1 также указывают на уязвимость малых водоемов – озер и прудов – от радиоактивного загрязнения [Konoplev et al., 2021]. Только на загрязненных территориях Фукусимской префектуры имеется более трех тысяч мелиоративных прудов, создававшихся на протяжении последних столетий в целях подачи воды на рисовые чеки. Однако, ввиду их большого числа на загрязненных территориях долговременный мониторинг радиоактивного загрязнения каждого из них практически неосуществим. Данные по долговременному изменению содержания радионуклидов в растворе и на взвеси этих водоемов

доступны далеко не всегда. В особенности, для водных объектов зоны ЧАЭС это касается концентрации радионуклидов на взвеси, поскольку основное внимание систем мониторинга было сосредоточено на содержании радионуклидов в растворе, определяющем их мобильность и биологическую доступность. Вместе с тем для многих из этих водоемов взвешенный материал поступает с прилегающих водосборных территорий, и поэтому принцип метода реконструкции концентраций ^{137}Cs может быть использован и для этих водных объектов.

В работе [Konoplev et al., 2022a] метод реконструкции долговременной динамики концентрации ^{137}Cs на основе его профилей в донных отложениях использовался и показал свою применимость для водных объектов ближней зоны ЧАЭС – озер Азбучин и Глубокое и водоема-охладителя (ВО) ЧАЭС. На рис. 4 приведены профили ^{137}Cs в донных отложениях этих водоемов (А) и реконструированный временной ход его концентраций на взвеси в сравнении с расчетами по диффузионной модели (Б). Значимость данной реконструкции состоит в том, что это фактически первая и единственная оценка долговременного временного хода удельной активности ^{137}Cs на взвеси в сильно загрязненных водоемах зоны отчуждения ЧАЭС. Информация о содержании ^{137}Cs на взвеси представляет несомненный интерес с точки зрения понимания основных закономерностей не только его поведения в системе «почва–вода», но и его перехода в биоту и миграции по пищевым цепям.

На рис. 5 представлен временной ход растворенного ^{137}Cs в водоемах ближней зоны ЧАЭС, реконструированный из профиля донных отложений, отобранных в 2018 г. в сравнении с доступными данными мониторинга [Войцехович и др., 2016] и результатами расчетов по диффузионной модели. Видно, что восстановленная динамика ^{137}Cs , как на взвеси, так и в растворе, удовлетворительно соответствует данным мониторинга и описывается использованной полуэмпирической диффузионной моделью.

ВЫВОДЫ

Вертикальное распределение ^{137}Cs в донных отложениях глубоководных участков загрязненных водных объектов может служить основой для восстановления долговременной динамики концентрации этого радионуклида на взвеси. Для реконструкции временного хода концентрации ^{137}Cs в реках могут быть использованы колонки донных отложений расположенных на них водохранилищ. Концентрации растворенного ^{137}Cs могут быть восстановлены, используя эксперимен-

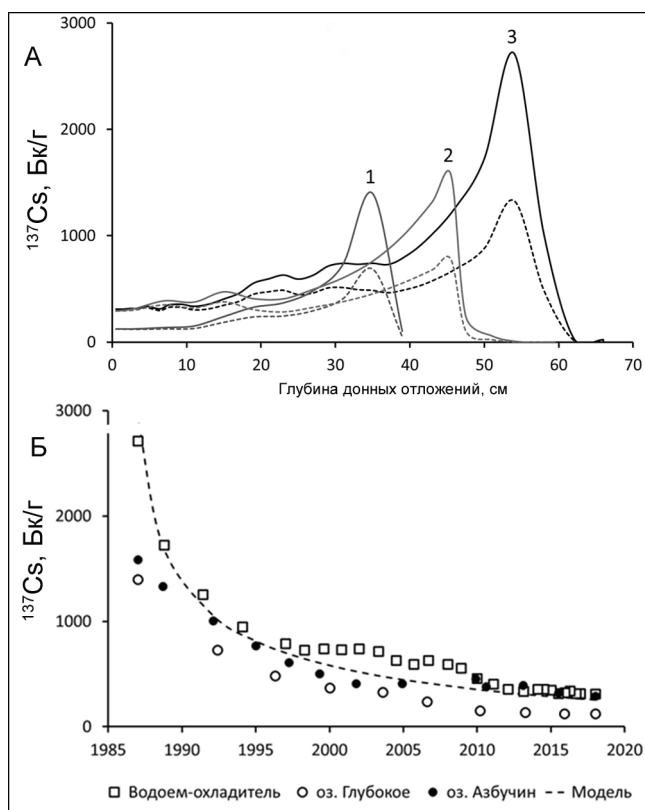


Рис. 4. Вертикальное распределение ^{137}Cs в донных отложениях в водоемах непосредственной близости от ЧАЭС: А – вертикальные распределения ^{137}Cs в донных отложениях оз. Глубокое (1), оз. Азбучин (2) и водоема-охладителя ЧАЭС (3). Пунктирные линии – удельные активности на дату отбора в 2018 г.; сплошные линии – профили удельных активностей скорректированные на расчетную дату осаждения взвеси; Б – реконструированный временной ход удельной активности ^{137}Cs на взвеси в водных объектах ближней зоны ЧАЭС и ее расчет по диффузионной модели по уравнению (2) при $c_p^0 = 3000 \text{ Бк} \cdot (\text{год})^{1/2} / \text{г}$. на основе данных работы [Konoplev et al., 2022a]

Fig. 4. Vertical distribution of ^{137}Cs in bottom sediments in reservoirs in the immediate vicinity of the Chernobyl nuclear power plant: А – vertical distributions of ^{137}Cs in bottom sediments of Lake Glubokoye (1), Lake Azbuchin (2), and the Chernobyl NPP cooling pond (3). Dashed lines represent specific activities on the sampling date in 2018, solid lines represent specific activity profiles adjusted to the calculated date of suspended matter deposition; Б – reconstructed temporal course of ^{137}Cs specific activity in suspended matter in water bodies of the Chernobyl NPP near zone and its calculation using the diffusion model according to equation (2) with $c_p^0 = 3000 \text{ Bq} \cdot (\text{year})^{1/2} / \text{g}$. Based on data from [Konoplev et al., 2022a]

тальные значения коэффициента распределения K_d водного объекта.

Реконструкция временного хода концентраций ^{137}Cs возможна в тех случаях, когда заметного перемешивания осаждаемой взвеси с нижележащими слоями отложений не происходит. Коэффициент распределения радионуклида должен иметь значение существенно выше 10^4 л/кг с тем, чтобы не происходило диффузионного размывания пика ^{137}Cs .

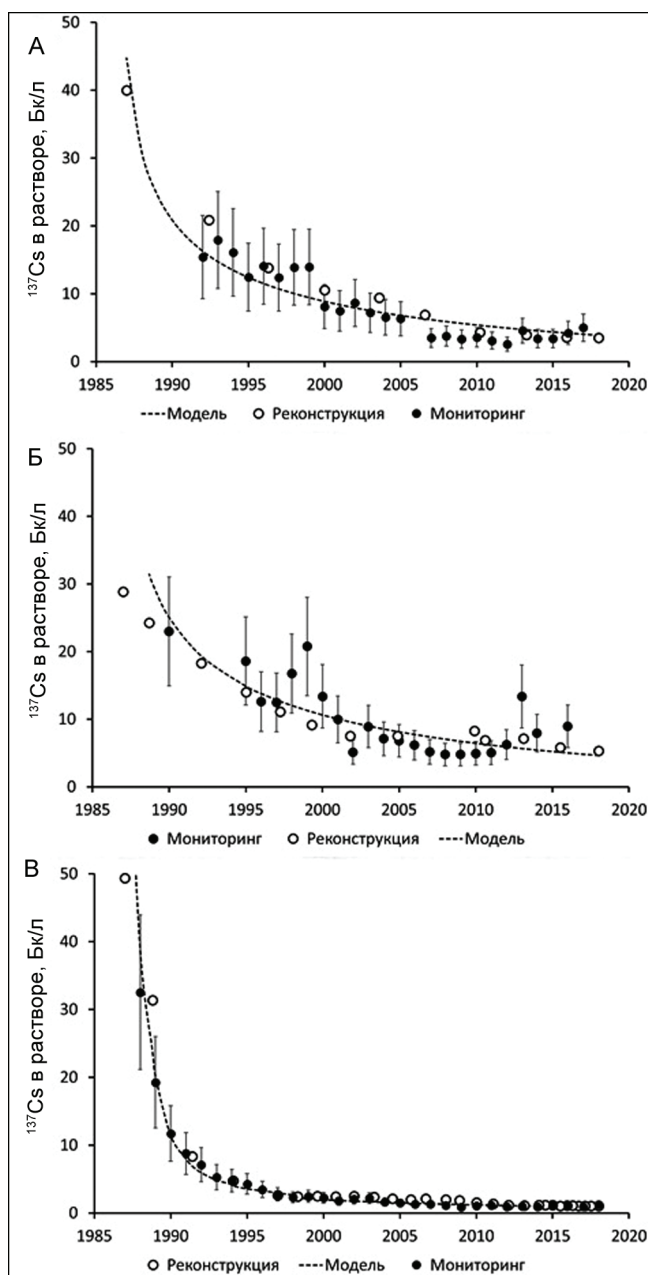


Рис. 5. Временной ход среднегодовых концентраций растворенного ^{137}Cs в трех водоемах ближней зоны ЧАЭС, реконструированный из профилей донных отложений, отобранных в 2018 г., в сравнении с доступными данными мониторинга и результатами расчетов по диффузионной модели: А – оз. Глубокое; Б – оз. Азбучин; В – водоем-охладитель ЧАЭС

Fig. 5. Temporal course of annual average concentrations of dissolved ^{137}Cs in three water bodies of the Chernobyl NPP near zone, reconstructed from bottom sediment profiles sampled in 2018, compared with available monitoring data and calculation results using the diffusion model: А – Lake Glubokoye; Б – Lake Azbuchin; В – Chernobyl NPP cooling pond

Исследования в этой области как в районах, загрязненных после аварии на ЧАЭС, так и в зоне загрязнения после аварии на АЭС Ф-1 показали, что при выполнении этих условий долговременные

изменения концентрации ^{137}Cs как на взвеси, так и в растворе после ядерной аварии могут быть с успехом реконструированы для рек, озер и прудов. Доступные данные мониторинга для тестовых водных объектов и их динамика удовлетворительно согласуются с восстановленными значениями концентраций ^{137}Cs .

Полученные данные представляют собой первую и единственную пока оценку временного хода

удельной активности ^{137}Cs на взвеси в водных объектах зоны загрязнения ЧАЭС. Рассчитанные на основе вертикальных профилей ^{137}Cs в донных отложениях зависимости от времени концентраций ^{137}Cs на взвеси и в растворе водных объектов как Чернобыльской, так и Фукусимской зон удовлетворительно описываются эмпирической двухэкспоненциальной и/или полуэмпирической диффузионной моделью.

Благодарности. Настоящая работа была выполнена в рамках мегагранта Минобрнауки номер 075-15-2024-614 и проекта Межуниверситетского центра радиоактивности окружающей среды Японии ERAN (Университет Цукубы) I-24-16.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексахин Р.М., Булдаков Л.А., Губанов В.А. и др. Крупные ядерные аварии: последствия и защитные меры. М.: ИздАТ, 2001. 572 с.
- Бобовникова Ц.И., Махонько К.П., Сиверина А.А. и др. Физико-химические формы радионуклидов в атмосферных выпадениях после аварии на Чернобыльской АЭС и их трансформация в почве // Атомная энергия. 1991. Т. 71. № 5. С. 449–454.
- Вакуловский С.М., Никитин А.И., Чумичев В.Б. и др. Загрязнение цезием-137 и стронцием-90 водных объектов на территории, подвергшейся воздействию выбросов аварийного блока ЧАЭС // Метеорология и гидрология. 1991. № 7. С. 64–73.
- Войцехович О.В., Канивец В.В., Киреев С.И. и др. Радиоактивное загрязнение поверхностных вод // 30 лет Чернобыльской катастрофы: сб. информационно-аналитических материалов. Киев, 2016. С. 129–139. (На украинском языке)
- Коноплев А.В., Канивец В.И., Жукова О.М. и др. Полуэмпирическая диффузионная модель смыва радионуклидов с загрязненных водосборов и ее проверка на основе данных мониторинга рек Фукусимы и Чернобыля // Геохимия. 2021. Т. 66. № 6. С. 1–12.
- Радионуклиды в водных экосистемах Украины. Влияние радионуклидного загрязнения на гидробионты зоны отчуждения / под ред. М.И. Кузьменко, Киев: Чернобыльинтеринформ, 2001. 318 с. (На украинском языке)
- Ahuja L.R., Sharpley A.N., Yamamoto M. et al. The depth of rainfall-runoff-soil interaction as determined by ^{32}P , *Water Resources Research*, 1981, vol. 17, p. 969–974.
- Appleby P.G., Haworth E.Y., Michel H. et al. The transport and mass balance of fallout radionuclides in Blelham Tarn, Cumbria (UK), *Journal of Paleolimnology*, 2003, vol. 29, p. 459–473.
- Bulgakov A., Konoplev A., Smith J. et al. Fuel particles in the Chernobyl cooling pond: current state and prediction for remediation options, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2009, vol. 100, no. 4, p. 329–332.
- Bulgakov A.A., Konoplev A.V., Smith J.T. et al. Modelling the long-term dynamics of radiocaesium in closed lakes, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2002, vol. 61, p. 41–53.
- Chernobyl Catastrophe and Consequences, J.T. Smith, N.A. Beresford (eds.), Springer-Praxis, 2005, 310 p.
- CREAMS: A field-scale model for chemicals runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems, W.G. Knisel (ed.), USDA Conservation Research Report, no. 26, 1980, 643 p.
- Donigian A.S., Beyerlein D.C., Davis H.H. et al. *Agricultural runoff management (ARM) model, version II: refinement and testing*, EPA 600/3-77-098, Athens, GA, Environmental Research Laboratory, US EPA, 1977.
- Feng B., Onda Y., Wakiyama Y. et al. Persistent impact of Fukushima decontamination on soil erosion and suspended sediment, *Nature Sustainability*, 2022, vol. 5, p. 879–889.
- Funaki H., Sakuma K., Nakanishi T. et al. Reservoir sediments as a long-term source of dissolved radiocaesium in water system; a mass balance case study of an artificial reservoir in Fukushima, Japan, *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 743, article 140668.
- Ganzha Ch., Gudkov D., Ganzha D. et al. Physicochemical forms of ^{90}Sr and ^{137}Cs in components of Gluboke lake ecosystem in the Chernobyl exclusion zone, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2014, vol. 127, p. 176–181.
- Golosov V., Ivanov M. Quantitative assessment of lateral migration of the Chernobyl-derived ^{137}Cs in contaminated territories of the East European Plain, *Behavior of radionuclides in the environment II: Chernobyl*, A. Konoplev, K. Kato, S. Kalmykov (eds.), Tokyo, Springer Nature, 2020, p. 195–226.
- Hardie S.M.L., McKinley I.G. Fukushima remediation: status and overview of future plans, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2014, vol. 133, p. 75–85.
- Hilton J. Aquatic radioecology post Chernobyl – a review of the past and look to the future, *Freshwater and Estuarine Radioecology*, G. Desmet, R.J. Blust, R.N.J. Comans et al. (eds.), Amsterdam, Elsevier, 1997, p. 47–74.
- Howard J., Fesenko S.V., Balonov M. et al. A Comparison of Remediation after the Chernobyl and Fukushima Daiichi Accidents, *Radiation Protection Dosimetry*, 2016, vol. 173, no. 1–3, p. 170–176.
- IAEA. *Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments*, Technical reports series no. 472, Vienna, IAEA, 2010, 194 p.

- IAEA. *Radiological conditions in the Dneper river basin, Assessment by an international expert team and recommendations for an action plan*, Vienna, IAEA, 2006, 185 p.
- Igarashi Y., Nanba K., Wada T. et al. Factors Controlling the Dissolved ^{137}Cs Seasonal Fluctuations in the Abukuma River Under the Influence of the Fukushima Nuclear Power Plant Accident, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2022, vol. 127, no. 1, p. 1–16, DOI: 10.1029/2021JG006591.
- Ikehara R., Suetake M., Komiya T. et al. Novel method of quantifying radioactive cesium-rich microparticles (CsMP) in the environment from the Fukushima Daiichi nuclear power plant, *Environmental Science & Technology*, 2018, vol. 52, p. 6390–6398.
- Ivanov M.M., Konoplev A.V., Walling D.E. et al. Using reservoir sediment deposits to reconstruct the longer-term fate of Chernobyl-derived ^{137}Cs fallout in the fluvial system, *Environmental Pollution*, 2021, vol. 274, article 116588.
- Kaneyasu N., Ohashi H., Suzuki F. et al. Sulfate Aerosol as a Potential Transport Medium of Radiocesium from the Fukushima Nuclear Accident, *Environmental Science & Technology*, 2012, vol. 46, p. 5720–5726.
- Konoplev A., Kanivets V., Zhukova O. et al. Mid- to long-term radiocesium wash-off from contaminated catchments at Chernobyl and Fukushima, *Water Research*, 2021, vol. 188, article 116514.
- Konoplev A., Laptev G., Igarashi Y. et al. Reconstruction of the Long-Term Dynamics of Particulate Concentrations and Solid–Liquid Distribution of Radiocesium in Three Severely Contaminated Water Bodies of the Chernobyl Exclusion Zone Based on Current Depth Distribution in Bottom Sediments, *Land*, 2022a, vol. 11, no. 1, article 29.
- Konoplev A., Wakiyama Y., Wada T. et al. Reconstruction of time changes in radiocesium concentrations in the river of the Fukushima Dai-ichi NPP contaminated area based on its depth distribution in dam reservoir's bottom sediments, *Environmental Research*, 2022b, vol. 206, article 112307.
- Konoplev A.V., Ivanov M., Golosov V.N. et al. Reconstruction of long-term dynamics of Chernobyl-derived ^{137}Cs in the Upa River using bottom sediments in the Schekino reservoir and semi-empirical modelling, *Proceedings of International Association of Hydrological Sciences*, 2019, vol. 381, p. 95–99.
- Monte L. A collective model for predicting the long-term behaviour of radionuclides in rivers, *Science of the Total Environment*, 1997, vol. 201, p. 17–29.
- Nakanishi T., Sakuma K. Trend of ^{137}Cs concentration in river water in the medium term and future following the Fukushima nuclear accident, *Chemosphere*, 2019, vol. 215, p. 272–279.
- Okumura T., Yamaguchi N., Dohi T. et al. Dissolution behaviour of radiocaesium-bearing microparticles released from the Fukushima nuclear power plant, *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, article 3520.
- Onda Y., Taniguchi K., Yoshimura K. et al. Radionuclides from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in terrestrial systems, *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, vol. 1, p. 644–660.
- Putyrskaya V., Klemt E., Roellin S. et al. Dating of recent sediments from Lago Maggiore and lago di Lugano (Switzerland/Italy) using ^{137}Cs and ^{210}Pb , *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020, vol. 212, article 106135.
- Smith J.T., Belova N.V., Bulgakov A.A. et al. The “AQ-UASCOPE” simplified model for predicting ^{89}Sr , and ^{134}Cs , ^{137}Cs in surface waters after a large-scale radioactive fallout, *Health Physics*, 2005, vol. 89, no. 6, p. 628–644.
- Taniguchi K., Onda Y., Smith H.G. et al. Transport and redistribution of radiocesium in Fukushima fallout through rivers, *Environmental Science & Technology*, 2019, vol. 53, p. 12339–12347.
- Ueda S., Hasegawa H., Ohtsuka Y. et al. Ten-year radiocesium fluvial discharge patterns from watersheds contaminated by the Fukushima nuclear power plant accident, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2021, vol. 240, article 106759.
- Vakulovsky S.M., Nikitin A.I., Chumichev V.B. et al. Cesium-137 and strontium-90 contamination of water bodies in the areas affected by releases from the Chernobyl nuclear power plant accident: an overview, *Journal of Environmental Radioactivity*, 1994, vol. 23, p. 103–122.

Поступила в редакцию 24.06.2024

После доработки 10.09.2024

Принята к публикации 15.10.2024

RECONSTRUCTION OF THE LONG-TERM DYNAMICS OF RADIOACTIVE CESIUM IN WATER BODIES CONTAMINATED AS A RESULT OF NUCLEAR ACCIDENTS (CASE STUDIES OF CHERNOBYL AND FUKUSHIMA)

A.V. Konoplev¹, M.M. Ivanov², M.A. Komissarov³, V.N. Golosov⁴, N.V. Kuzmenkova⁵

¹ Institute of Environmental Radioactivity, Fukushima University, Japan

^{1, 2, 4, 5} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Natural Waters Geochemistry

³ Ufa Institute of Biology, UFIC RAS, Laboratory of Soil Science

⁵ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Chemistry, Department of Radiochemistry

¹ Deputy Director, D.Sc. in Biology; e-mail: alexeikonoplev@gmail.com

² Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: ivanovm@bk.ru

³ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: mkomissarov@list.ru

⁴ Chief Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: golosov@gmail.com

⁵ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: kuzmenkovav@my.msu.ru

The study is focused on the reconstruction of long-term dynamics of ^{137}Cs concentration in water bodies contaminated as a result of Chernobyl and “Fukushima-1” NPP accidents. It was found that the vertical distribution of ^{137}Cs in bottom sediments of deep-water sites could be a basis for reconstruction of the dynamics of radionuclide concentration in suspension and in solution. Columns of bottom sediments of reservoirs and experimental values of distribution coefficient K_d are used for reconstruction. The method is applicable in the absence of mixing of the deposited suspension with the underlying layers and at K_d values significantly higher than 104 l/kg. Studies in the Chernobyl and “Fukushima-1” NPP contamination zones have shown that it is possible to reconstruct the long-term changes of ^{137}Cs concentration for rivers, lakes and ponds. The obtained data are the first assessment of the time course of ^{137}Cs specific activity on suspended sediment in water bodies of the Chernobyl NPP zone, which is important for understanding its behavior in the soil-water system and its migration through food chains. The time dependences of ^{137}Cs concentrations are described by the empirical two-exponential and/or semi-empirical diffusion model, applicable for predictive assessments of the long-term dynamics of radioactive contamination in water bodies after nuclear accidents. The results of the study are confirmed by monitoring data for the test water bodies, showing satisfactory agreement with the reconstructed values of ^{137}Cs concentrations. The information obtained is important for assessing the environmental consequences of nuclear accidents and developing strategies for the management of contaminated areas. The methodology presented in the study could be adapted to study the behavior of other radionuclides in aquatic ecosystems, contributing to better prediction and management of radioecological risks over a long term horizon.

Keywords: radionuclide migration, solution, suspension, diffusion, modeling

Acknowledgements. The research was carried out under the megagrant of the Ministry of Education and Science (no 075-15-2024-614) and the project of the Interuniversity Centre for Environmental Radioactivity of Japan ERAN (University of Tsukuba) I-24-16.

REFERENCES

- Ahuja L.R., Sharpley A.N., Yamamoto M. et al. The depth of rainfall-runoff-soil interaction as determined by ^{32}P , *Water Resources Research*, 1981, vol. 17, p. 969–974.
- Aleksakhin R.M., Buldakov L.A., Gubanov V.A. et al. *Krupnye yadernye avarii: posledstviya i zaschitnye mery* [Large nuclear accidents: consequences and protective measures], Moscow, Izdat Publ., 2001, 572 p. (In Russian)
- Appleby P.G., Haworth E.Y., Michel H. et al. The transport and mass balance of fallout radionuclides in Blelham Tarn, Cumbria (UK), *Journal of Paleolimnology*, 2003, vol. 29, p. 459–473.
- Bobovnikova Ts.I., Makhonko K.P., Siverina A.A. et al. Fiziko-khimicheskie formy radionuklidov v atmosferykh vypadeniyakh posle avarii na Chernobyl'skoj AES i ikh transformatsiya v pochve [Physicochemical forms of radionuclides in atmospheric fallout after the Chernobyl NPP accident and their transformation in soil], *Atomic Energy*, 1991, vol. 71, no. 5, p. 449–454. (In Russian)
- Bulgakov A., Konoplev A., Smith J. et al. Fuel particles in the Chernobyl cooling pond: current state and prediction for remediation options, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2009, vol. 100, no. 4, p. 329–332.
- Bulgakov A.A., Konoplev A.V., Smith J.T. et al. Modelling the long-term dynamics of radiocaesium in closed lakes, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2002, vol. 61, p. 41–53.
- Chernobyl Catastrophe and Consequences*, J.T. Smith, N.A. Beresford (eds.), Springer-Praxis, 2005, 310 p.
- CREAMS: A field-scale model for chemicals runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems*, W.G. Knisel (ed.), USDA Conservation Research Report, no. 26, 1980, 643 p.
- Donigan A.S., Beyerlein D.C., Davis H.H. et al. *Agricultural runoff management (ARM) model, version II: refinement and testing*, EPA 600/3-77-098, Athens, GA, Environmental Research Laboratory, US EPA, 1977.
- Feng B., Onda Y., Wakiyama Y. et al. Persistent impact of Fukushima decontamination on soil erosion and suspended sediment, *Nature Sustainability*, 2022, vol. 5, p. 879–889.
- Funaki H., Sakuma K., Nakanishi T. et al. Reservoir sediments as a long-term source of dissolved radiocaesium in water system; a mass balance case study of an artificial reservoir in Fukushima, Japan, *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 743, article 140668.
- Ganzha Ch., Gudkov D., Ganzha D. et al. Physicochemical forms of ^{90}Sr and ^{137}Cs in components of Gluboke lake ecosystem in the Chernobyl exclusion zone, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2014, vol. 127, p. 176–181.
- Golosov V., Ivanov M. Quantitative assessment of lateral migration of the Chernobyl-derived ^{137}Cs in contaminated territories of the East European Plain, *Behavior of radionuclides in the environment II: Chernobyl*, A. Konoplev, K. Kato, S. Kalmykov (eds.), Tokyo, Springer Nature, 2020, p. 195–226.
- Hardie S.M.L., McKinley I.G. Fukushima remediation: status and overview of future plans, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2014, vol. 133, p. 75–85.
- Hilton J. Aquatic radioecology post Chernobyl – a review of the past and look to the future, *Freshwater and Estuarine Radioecology*, G. Desmet, R.J. Blust, R.N.J. Comans et al. (eds.), Amsterdam, Elsevier, 1997, p. 47–74.
- Howard J., Fesenko S.V., Balonov M. et al. A Comparison of Remediation after the Chernobyl and Fukushima Daiichi Accidents, *Radiation Protection Dosimetry*, 2016, vol. 173, no. 1–3, p. 170–176.
- IAEA. *Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments*, Technical reports series no. 472, Vienna, IAEA, 2010, 194 p.
- IAEA. *Radiological conditions in the Dneper river basin, Assessment by an international expert team and recommendations for an action plan*, Vienna, IAEA, 2006, 185 p.

- Igarashi Y., Nanba K., Wada T. et al. Factors Controlling the Dissolved ^{137}Cs Seasonal Fluctuations in the Abukuma River Under the Influence of the Fukushima Nuclear Power Plant Accident, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2022, vol. 127, no. 1, p. 1–16, DOI: 10.1029/2021JG006591.
- Ikehara R., Suetake M., Komiya T. et al. Novel method of quantifying radioactive cesium-rich microparticles (CsMP) in the environment from the Fukushima Daiichi nuclear power plant, *Environmental Science & Technology*, 2018, vol. 52, p. 6390–6398.
- Ivanov M.M., Konoplev A.V., Walling D.E. et al. Using reservoir sediment deposits to reconstruct the longer-term fate of Chernobyl-derived ^{137}Cs fallout in the fluvial system, *Environmental Pollution*, 2021, vol. 274, article 116588.
- Kaneyasu N., Ohashi H., Suzuki F. et al. Sulfate Aerosol as a Potential Transport Medium of Radiocesium from the Fukushima Nuclear Accident, *Environmental Science & Technology*, 2012, vol. 46, p. 5720–5726.
- Konoplev A., Kanivets V., Zhukova O. et al. Mid- to long-term radiocesium wash-off from contaminated catchments at Chernobyl and Fukushima, *Water Research*, 2021, vol. 188, article 116514.
- Konoplev A., Laptev G., Igarashi Y. et al. Reconstruction of the Long-Term Dynamics of Particulate Concentrations and Solid–Liquid Distribution of Radiocesium in Three Severely Contaminated Water Bodies of the Chernobyl Exclusion Zone Based on Current Depth Distribution in Bottom Sediments, *Land*, 2022a, vol. 11, no. 1, article 29.
- Konoplev A., Wakiyama Y., Wada T. et al. Reconstruction of time changes in radiocesium concentrations in the river of the Fukushima Dai-ichi NPP contaminated area based on its depth distribution in dam reservoir's bottom sediments, *Environmental Research*, 2022b, vol. 206, article 112307.
- Konoplev A.V., Ivanov M., Golosov V.N. et al. Reconstruction of long-term dynamics of Chernobyl-derived ^{137}Cs in the Upa River using bottom sediments in the Schekino reservoir and semi-empirical modelling, *Proceedings of International Association of Hydrological Sciences*, 2019, vol. 381, p. 95–99.
- Konoplev A.V., Kanivets V.I., Zhukova O.M. et al. Polu-empiricheskaya diffuzionnaya model smyva radionuklidov s zagryaznennykh vodosborov i ee proverka na osnove dannykh monitoring rek Fukusimy i Chernobylya [Semi-empirical diffusion model of radionuclide washoff from contaminated catchments and its verification based on monitoring data from Fukushima and Chernobyl rivers], *Geochemistry*, 2021, vol. 66, no. 6, p. 1–12. (In Russian)
- Monte L. A collective model for predicting the long-term behaviour of radionuclides in rivers, *Science of the Total Environment*, 1997, vol. 201, p. 17–29.
- Nakanishi T., Sakuma K. Trend of ^{137}Cs concentration in river water in the medium term and future following the Fukushima nuclear accident, *Chemosphere*, 2019, vol. 215, p. 272–279.
- Okumura T., Yamaguchi N., Dohi T. et al. Dissolution behaviour of radiocaesium-bearing microparticles released from the Fukushima nuclear power plant, *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, article 3520.
- Onda Y., Taniguchi K., Yoshimura K. et al. Radionuclides from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in terrestrial systems, *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, vol. 1, p. 644–660.
- Putyrskaya V., Klemm E., Roellin S. et al. Dating of recent sediments from Lago Maggiore and Lago di Lugano (Switzerland/Italy) using ^{137}Cs and ^{210}Pb , *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020, vol. 212, article 106135.
- Radionuklidy v vodnykh ekosistemakh Ukrainy. Vliyanie radionuklidnogo zagryazneniya na gidrobionty zony otchuzhdeniya [Radionuclides in aquatic ecosystems of Ukraine. Impact of radionuclide contamination on hydrobionts of the exclusion zone], M.I. Kuzmenko (ed.), Kyiv, Chernobylinterinform, 2001, 318 p. (In Ukrainian)
- Smith J.T., Belova N.V., Bulgakov A.A. et al. The “AQ-UASCOPE” simplified model for predicting ^{89}Sr , and $^{134, 137}\text{Cs}$ in surface waters after a large-scale radioactive fallout, *Health Physics*, 2005, vol. 89, no. 6, p. 628–644.
- Taniguchi K., Onda Y., Smith H.G. et al. Transport and redistribution of radiocesium in Fukushima fallout through rivers, *Environmental Science & Technology*, 2019, vol. 53, p. 12339–12347.
- Ueda S., Hasegawa H., Ohtsuka Y. et al. Ten-year radiocesium fluvial discharge patterns from watersheds contaminated by the Fukushima nuclear power plant accident, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2021, vol. 240, article 106759.
- Vakulovsky S.M., Nikitin A.I., Chumichev V.B. et al. Cesium-137 and strontium-90 contamination of water bodies in the areas affected by releases from the Chernobyl nuclear power plant accident: an overview, *Journal of Environmental Radioactivity*, 1994, vol. 23, p. 103–122.
- Vakulovsky S.M., Nikitin A.I., Chumichev V.B. et al. Zagryaznenie tsesiem-137 i strontsiem-90 vodnykh ob'ektov na territorii podvergsheysya vozdeystviyu vybrosov avariynogo bloka ChAES [Contamination with cesium-137 and strontium-90 of water bodies in the territory affected by emissions from the emergency unit of the Chernobyl NPP], *Meteorology and Hydrology*, 1991, no. 7, p. 64–73. (In Russian)
- Voitsekhovich O.V., Kanivets V.V., Kireev S.I. et al. [Radioactive contamination of surface waters], 30 ket Chernobyl'skoj katastrofy [30 years of the Chernobyl catastrophe], Collection of information and analytical materials, Kyiv, 2016, p. 129–139. (In Ukrainian)

Received 24.06.2024

Revised 10.09.2024

Accepted 15.10.2024

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ И АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ НА КОРОТКОВОЛНОВУЮ И ДЛИННОВОЛНОВУЮ РАДИАЦИЮ ДЛЯ УСЛОВИЙ БЕЗОБЛАЧНОГО НЕБА

Н.А. Петров¹, Н.Е. Чубарова²

^{1,2}Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии

¹Бакалавр; e-mail: nial.03@mail.ru

²Проф., д-р геогр. наук; e-mail: natalia.chubarova@gmail.com

Газово-аэрозольный состав атмосферы определяет особенности радиационного баланса в атмосфере и связанные с этим климатические изменения. В исследовании обсуждаются антропогенно обусловленные вариации содержания важнейших парниковых газов (углекислого газа (CO_2), озона (O_3)), а также атмосферного аэрозоля. Приводятся оценки их радиационного воздействия (форсинга, RF) в различных геофизических условиях. На основе современной радиационной модели ECRAD оценивались величины RF рассматриваемых антропогенных примесей за последние 20 лет относительно их доиндустриального уровня для разных сезонов года на примере московского региона. Определены особенности вертикальных профилей радиационного воздействия в коротковолновом и длинноволновом спектральных диапазонах и их величины на нижней (НГА) и верхней границах атмосферы (ВГА) в зависимости от высоты Солнца и альбедо поверхности при учете сезонных вариаций концентраций примесей и без их учета. Для теплого периода при низком альбедо поверхности общее антропогенное радиационное воздействие (RF^{Total}) с учетом сезонных вариаций всех рассматриваемых примесей отрицательно, в целом составляет $-8,33 \text{ Вт/м}^2$ на НГА и $-1,35 \text{ Вт/м}^2$ на ВГА. Существенную роль в отрицательном радиационном воздействии играет характерный для умеренных широт слабопоглощающий аэрозоль. В холодный период года RF^{Total} составляет $-0,08 \text{ Вт/м}^2$ на НГА и $+0,38 \text{ Вт/м}^2$ на ВГА. Положительная величина общего RF на ВГА формируется за счет положительного радиационного воздействия аэрозоля из-за его поглощательных свойств и влияния высокого альбедо снежной поверхности, а также за счет положительного RF углекислого газа. Обнаружена нелинейная зависимость величин радиационного воздействия рассматриваемых примесей от высоты Солнца и альбедо поверхности. Изменение скорости радиационного нагрева (ΔHR) за счет антропогенных изменений парниковых газов и аэрозоля на ВГА закономерно отрицательна в оба сезона года. В то же время эта величина положительна на НГА (порядка $0,45 \text{ К/сут.}$ в теплый и $0,25 \text{ К/сут.}$ в холодный сезоны), главным образом, за счет небольшого поглощения аэрозолем в нижних слоях тропосферы. При этом скорость радиационного нагрева за счет CO_2 положительна, но невелика.

Ключевые слова: радиационное воздействие, климатические изменения, радиационный форсинг, модель ECRAD, радиационный баланс, скорость радиационного нагрева, аэрозоль, углекислый газ, озон

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.2

ВВЕДЕНИЕ

Географическое распределение и трансформация радиационного баланса в атмосфере Земли определяет основные закономерности преобразования энергетических потоков в климатической системе. В безоблачных условиях атмосферная радиация в коротковолновом спектральном диапазоне определяется астрономическими факторами, главным из которых является положение Солнца. Кроме того, большую роль играет газово-аэрозольный состав атмосферы и отражающие свойства подстилающей поверхности. В длинноволновом диапазоне спектра на излучение оказывает влияние газовое поглощение, а также температурный профиль атмосферы.

Воздействие аэрозоля на тепловую радиацию играет существенно меньшую роль.

Наблюдающиеся изменения климата во многом определяются увеличивающимися выбросами в атмосферу различных парниковых газов, важнейшими из которых является углекислый газ [IPCC, 2022], время жизни которого составляют десятилетия. Парниковые газы за счет интенсивного поглощения и переизлучения сильно трансформируют тепловое излучение, приводя к увеличению температуры в тропосфере и ее уменьшению в стратосфере. В конце XX в. возникла проблема резкого сокращения общего содержания озона, который наряду с его влиянием на ультрафиолетовую радиацию также

является парниковым газом. Для решения этой проблемы в 1987 г. был подписан Монреальский протокол, дополненный впоследствии большим числом соглашений [Монреальский..., 2023]. Выбросы антропогенного аэрозоля и его предшественников также оказывают большое влияние на радиационный режим атмосферы и климатические изменения [IPCC, 2022; IPCC, 2013]. Слабопоглощающий антропогенный аэрозоль, который доминирует в атмосфере, эффективно рассеивает солнечную коротковолновую радиацию, увеличивая долю рассеянной радиации в верхней полусфере и тем самым уменьшая коротковолновый баланс у поверхности Земли. Таким образом, парниковые газы и аэрозоль являются важнейшими компонентами атмосферы, которые влияют на изменчивость атмосферной радиации, а увеличение их концентрации вследствие антропогенной деятельности может заметным образом повлиять на климат. В то же время изменение полного радиационного баланса зависит от геофизических условий, главными из которых являются высота Солнца, вертикальные профили температуры и влажности, альбедо поверхности в коротковолновом диапазоне спектра.

Средние глобальные модельные оценки радиационного воздействия, или форсинга (RF), были представлены в отчетных докладах IPCC [IPCC, 2013; IPCC, 2022]. По последним данным [IPCC, 2022], среднее глобальное антропогенное радиационное воздействие на ВГА составляет $RF^{Total} = 2,72 \text{ Вт/м}^2$. При этом воздействие CO_2 оценивается в $2,16 \text{ Вт/м}^2$, влияние O_3 – около $0,47 \text{ Вт/м}^2$, а аэрозольное воздействие только за счет процессов рассеяния и поглощения составляет $-0,22 \text{ Вт/м}^2$. По данным российской климатической модели ИВМ РАН [Володин, Кострыкин, 2016], глобальное радиационное воздействие антропогенного аэрозоля оцениваются в $-0,7 \text{ Вт/м}^2$ для НГА и до -2 Вт/м^2 для ВГА. Однако наблюдается довольно большая географическая изменчивость оценок вплоть до изменения знака этих величин. В то же время в исследованиях не приводится детальный анализ оценок радиационного воздействия и его зависимости от различных факторов, а в климатических моделях радиационный блок часто довольно сильно упрощен вследствие высоких затрат машинного времени.

В работе [Тимофеев и др., 2019] проводится анализ антропогенного радиационного воздействия (форсинга) CO_2 для различных климатических моделей атмосферы Земли и с разделением на теплый и холодный сезоны. Так, для средних широт даны оценки воздействия CO_2 на уходящую длинноволновую радиацию на ВГА, которые составляют около $-1,47 \text{ Вт/м}^2$ и $-1,24 \text{ Вт/м}^2$ для лета и зимы соответственно. Работа [Heald, 2014] посвящена

оценкам различий между прямым аэрозольным эффектом и антропогенным воздействием, их пространственному распределению. В статье [Iacono et al., 2008] представлены значения RF , а также изменения скоростей нагрева для парниковых газов с использованием различных моделей (RRTMG, LBLRTM) для трех уровней в атмосфере. В работе [Myhre et al., 2017] анализируется совокупное радиационное антропогенное воздействие O_3 и аэрозоля за 1990–2015 гг., согласно которым оно составляет $0,17 \pm 0,08 \text{ Вт/м}^2$. Работа [Chen et al., 2007] посвящена будущим изменениям прямого радиационного воздействия аэрозолей, тропосферного озона и долгоживущих парниковых газов.

В последнее время появилась возможность оценить радиационные эффекты газов и аэрозолей с использованием современной радиационной модели ECRAD [Hogan, Bozzo, 2018], которая позволяет с высокой точностью рассчитывать радиацию в коротковолновом и длинноволновом диапазонах спектра. В настоящее время имеется ряд работ, которые используют ECRAD в автономном режиме. Статьи [Ren et al., 2022; Röttenbacher et al., 2024] посвящены расчетам облачных радиационных свойств, в статье [Ohneiser, 2023] анализируется влияние дымового аэрозоля от лесных пожаров. Однако детальных исследований радиационных воздействий газов и аэрозолей для ясного неба с учетом сезонной изменчивости, а также их зависимостей от различных геофизических факторов не проводилось.

Таким образом, в задачу нашего исследования входили региональные оценки радиационного воздействия парниковых газов (на примере углекислого газа и озона) и тропосферного аэрозоля на коротковолновую и длинноволновую радиацию на верхней (ВГА) и нижней (НГА) границах атмосферы и определения изменения скорости радиационного нагрева за счет этих факторов с использованием современной модели ECRAD.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выявления наиболее выраженного влияния антропогенного загрязнения на радиационное воздействие рассмотрен район Московской агломерации с населением свыше 13 млн человек. Из парниковых газов был выбран углекислый газ, поскольку именно для него наблюдаются самые значительные положительные тренды и самое высокое значение среднеглобального радиационного воздействия [IPCC, 2022]. Кроме того, рассматривался озон – другой парниковый газ, концентрации которого в стратосфере в последние десятилетия заметно уменьшались, и восстановление которого в будущем может заметно усилить потепление климата. При этом мы не рассматривали изменения

тропосферного озона, поведение которого в силу его высокой химической активности существенно изменяется, и для данного региона его отчетливых трендов не наблюдается. Анализировался также тропосферный аэрозоль, который также является фактором, способствующим уменьшению радиационного воздействия парниковых газов [IPCC 2013; Heald, 2014].

Для исследования радиационного воздействия парниковых газов и аэрозолей была использована современная радиационная модель ECRAD [Hogan, Bozzo, 2018], которая была реализована в автономном режиме [ECMWF..., 2023]. Благодаря гибкой и настраиваемой структуре, ECRAD удобно использовать для оценки влияния отдельных атмосферных переменных на атмосферную радиацию при различных геофизических условиях. ECRAD состоит из совокупности связанных между собой оптических модулей и вычислительного алгоритма (в работе использован RRTM-G), реализованных на языке FORTRAN 2003 [Hogan, 2022]. Алгоритм считывает конфигурационный файл, который определяет все параметры расчетов, и вычисляет полусферические плотности потоков излучения в коротковолновом (SW: 0,2–12,2 мкм) и длинноволновом (LW: 3,08–1000 мкм) спектральных диапазонах.

Для настройки модели в условиях Московского региона были подготовлены входные данные, которые включали в себя метеорологические параметры (температура воздуха, удельное содержание водяного пара, температура поверхности, массовая доля O_3) из реанализа ERA5 [Hersbach et al., 2020]. В качестве объемных долей газовых составляющих (CO_2 , CH_4 , N_2O , CFC-11, CFC-12, O_3) были использованы средние зональные данные для каждого месяца по IFS Cycle 46R1 [Section..., 2023]. Для климатической оценки радиации в со-

временную эпоху использовались среднемесячные данные, которые были усреднены за 20-летний период (2003–2023) для Московского региона и непосредственно для метеорологической обсерватории Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (МО МГУ) (координаты МО МГУ: 55,71° с. ш., 37,52° в. д.) (табл. 1). При сравнении с данными измерений в МО МГУ [Чубарова и др., 2014; Горбаренко, 2022] отмечено удовлетворительное согласие этих характеристик. Аэрозольные данные, которые включали в себя массовые доли пяти видов тропосферных аэрозолей (морская соль, пыль, органический, сульфатный аэрозоли и черный углерод), были взяты по данным реанализа CAMS [Innes, 2019]. Оптические свойства аэрозоля (массовый коэффициент ослабления, альbedo однократного рассеяния, фактор асимметрии индикатрисы рассеяния) задавались в каждом спектральном диапазоне по данным многомерных таблиц IFS 45R1 [Remy et al., 2019]. При этом оптические параметры задавались при фиксированной относительной влажности в диапазоне 60–70%, поскольку предварительные расчеты показали неверные значения оптических свойств аэрозолей при использовании реальных данных по влажности. Оптические и радиационные параметры аэрозолей для длины волны 550 нм представлены в (табл. 1, 2). Для выявления особенностей влияния высоких значений альbedo подстилающей поверхности и контрастных значений температуры и влагосодержания результаты анализировались отдельно для теплого (с июня по август) и холодного периодов (с декабря по март). Все переменные были линейно интерполированы в единую пространственную сетку 0,25×0,25° для 37 модельных уровней давления. Вертикальные профили основных атмосферных параметров для холодного и теплого периодов показаны на рис. 1.

Таблица 1

Средние метеорологические характеристики, содержание газов в столбе атмосферы и их приземные концентрации для холодного и теплого периодов за 20 лет (2003–2023) для территории метеорологической обсерватории МГУ

Параметр	Теплый период	Холодный период
Влагосодержание в столбе атмосферы (ERA5), кг/м ²	25,4	7,6
Температура воздуха у поверхности (ERA5), °C	18,8	–5,8
Содержание O_3 в столбе атмосферы (по спутниковым данным OMI), ед. Добсона	320,98	345,22
Объемное отношение смеси CO_2 у поверхности (IFS 46R1), ppm	383,6	392,5
АОТ для длины волны 550 нм в столбе атмосферы (CAMS)	0,25 (0,202)*	0,083 (0,105)*
Волновой параметр Ангстрема (CAMS)	1,39	1,26

Примечание. * В скобках даны данные измерений сети AERONET.

Таблица 2

Оптические параметры аэрозолей (для длины волны 550 нм), использованные из реанализа CAMS по IFS Cycle 45R1 [Remy et al., 2019]

Тип аэрозоля	Массовый коэффициент ослабления, м²/кг			Альбе́до однократного рассеяния (SSA)			Фактор асимметрии индикатрисы рассеяния		
Органический гидрофильный	4795			0,937			0,679		
Органический гидрофобный	3331,7			0,909			0,634		
Сульфатный	7695,5			1			0,682		
	Диапазон размеров частиц, мкм								
	0,03–0,5	0,5–5	0,5–20	0,03–0,5	0,5–5	0,5–20	0,03–0,5	0,5–5	0,5–20
Морской солевой	2945,8	379,9	105,9	1	1	1	0,778	0,804	0,847
	Диапазон размеров частиц, мкм								
	0,03–0,5	0,5–0,9	0,9–20	0,03–0,5	0,5–0,9	0,9–20	0,03–0,5	0,5–0,9	0,9–20
Пылевой	2539,6	943,9	411,6	0,986	0,961	0,931	0,627	0,664	0,757
Черный углерод	9412,3			0,206			0,335		

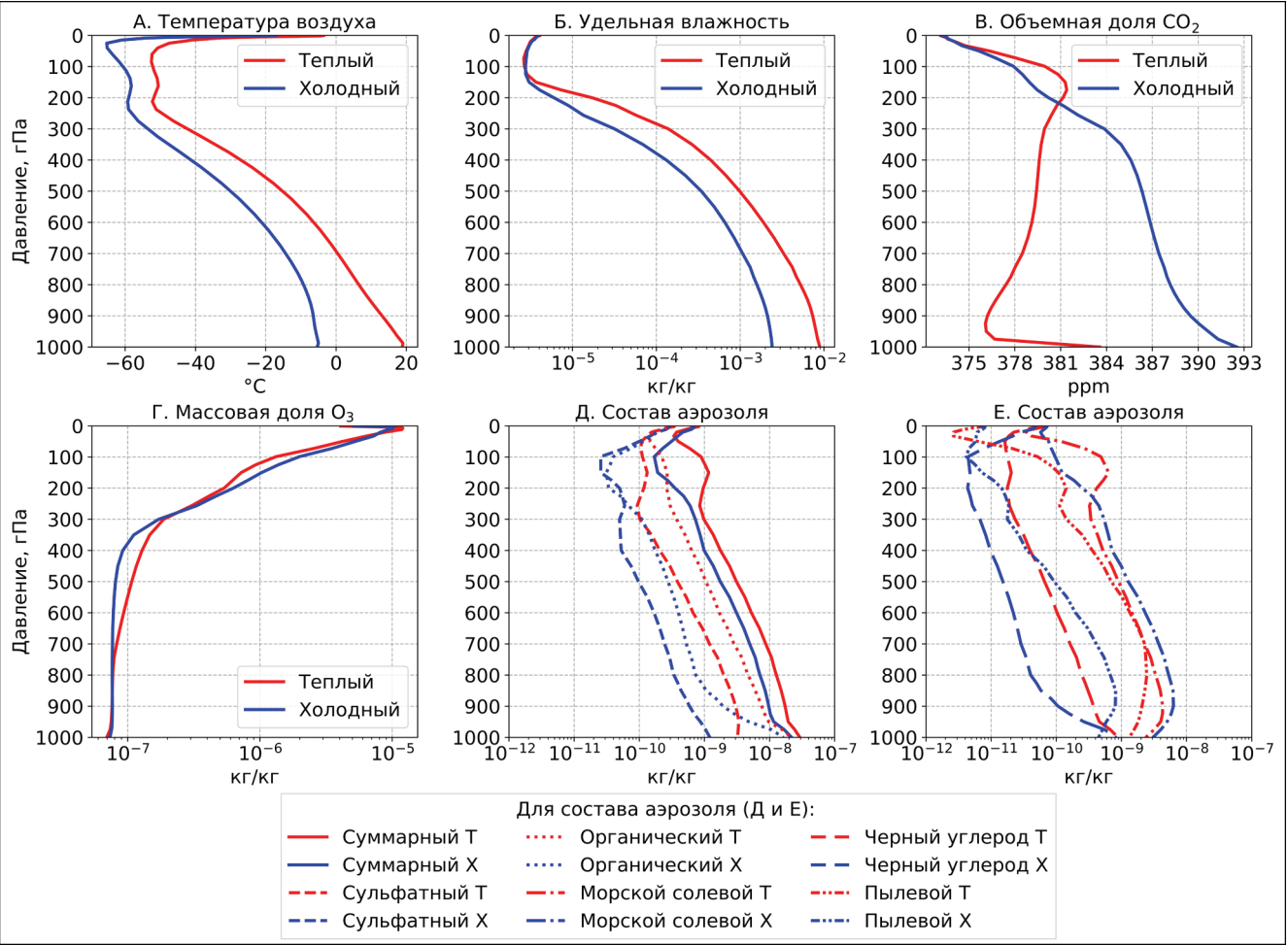


Рис. 1. Вертикальные профили основных атмосферных параметров для осредненного периода 2003–2023 гг. в холодный (Х) и теплый (Т) сезоны: А – температура воздуха; Б – удельная влажность; В – объемное отношение смеси; Г – массовая доля O_3 ; Д – массовая доля главных и Е – второстепенных компонентов аэрозоля. Графики представлены для МО МГУ

Fig. 1. Vertical profiles of the main atmospheric parameters for the average period 2003–2023 in the cold (X) and warm (T) seasons: A – air temperature; Б – specific humidity; В – volume mixing ratio of carbon dioxide; Г – mass mixing ratio of the O_3 ; Д – mass mixing ratio of the main and Е – secondary components of the aerosol. Plots are presented for MO MSU

По данным CAMS стоит отметить преобладающую роль органического аэрозоля (около 56%) в ослаблении радиации в оба сезона. Основными источниками органического аэрозоля антропогенного происхождения в Москве являются продукты выбросов от автомобилей и промышленных предприятий. Доля в суммарной аэрозольной оптической толщине (AOT) сульфатного аэрозоля, который доминировал до перехода на более чистое топливо в 1990-е гг., составляет 23% в холодный и 31% в теплый период. В холодный период из-за большего содержания солевой морской фракции (11% в холодный и 3% в теплый период), аэрозоль несколько крупнее, что отражается в меньших величинах волнового показателя Ангстрема. Отметим, что черный углерод по данным CAMS для московского региона составляет порядка 6–7%, что близко к величинам, полученным по данным непосредственных измерений [Chubarova et al., 2022] и позволяет говорить о надежном получении значения альbedo однократного рассеяния (SSA).

Для оценки радиационного воздействия CO_2 , O_3 и аэрозоля расчеты проводились для диапазонов реальной изменчивости того или иного параметра. В частности, диапазон изменения приземной концентрации CO_2 составлял от 280 до 450 ppm с шагом в 1 ppm, изменение интегрального содержания O_3 варьировало от 200 до 400 ед. Добсона с шагом 2 ед. Добсона, диапазон изменения AOT 550 нм задавался от 0,01 до 1 с шагом 0,01 при неизменной форме вертикального профиля. При этом не изменялся состав аэрозоля и, следовательно, его оптические характеристики в связи с отсутствием достоверных и полных данных о распределении состава аэрозоля в доиндустриальный период. В будущем мы планируем оценить чувствительность оценок радиационного воздействия к возможной изменчивости аэрозольного состава в доиндустриальную эпоху.

Вычисления проводились для широкого диапазона геофизических параметров: высота Солнца (h) изменялась от 2 до 60° с шагом 2°, альbedo поверхности (A) от 0,1 до 1 с шагом 0,1. Кроме того, анализировались результаты расчетов для медианных полуденных значений высот Солнца за теплый (54,89°) и холодный (12,63°) периоды. Альbedo поверхности задавалось равным $A = 0,63$ в холодный период и $A = 0,2$ – в теплый период в соответствии с данными многолетних измерений [Чубарова и др., 2014]. Внеатмосферная солнечная радиация вычислялась относительно солнечной постоянной 1361 Вт/м² [Prša et al., 2016] с учетом поправки на эллиптичность земной орбиты. Ее медианная величина для теплого периода составила 1319,7 и 1405,9 Вт/м² – для холодного. Значение длинноволновой излучательной способности для всех расчетов было выбрано

0,98, которое соответствует суглинистой почве и травяному покрову согласно [Тимофеев, Васильев, 2003]. Спектральный ход альbedo подстилающей поверхности при расчетах не учитывался. Стоит отметить, что учет зависимости альbedo от длины волны не вносит заметную ошибку по сравнению с другими факторами и погрешностью метода.

Согласно [IPCC, 2013], значения радиационного воздействия антропогенных примесей определяется как разница соответствующих компонентов радиационного баланса в коротковолновом, длинноволновом и во всем спектральном диапазоне (SW , LW , $Total$) между современным (modern) и доиндустриальным (Pre-ind) их содержанием:

$$RF^{SW, LW, Total} = F_{modern}^{SW, LW, Total} - F_{Pre-ind}^{SW, LW, Total} \quad (1)$$

Эти величины анализировались на верхней (0 гПа) и нижней (1013 гПа) модельных границах атмосферы, а также рассматривались профили RF при различных геофизических условиях согласно расчетам по модели ECRAD. Проводился анализ RF при учете сезонных изменений содержания CO_2 , O_3 и аэрозоля в современных и доиндустриальных условиях холодного и теплого периодов. В качестве аэрозольного параметра использовались данные по AOT, как наиболее значимой характеристики для оценки его содержания. Спектральный ход AOT учитывался с помощью волнового экспонента Ангстрема.

В качестве современных данных по среднегодовому содержанию CO_2 в работе взяты средние многолетние значения измерений для условий Москвы за первое десятилетие XXI в. с приземным отношением смеси, равным 393 ppm [Чубарова и др., 2014]. Для учета сезонных вариаций использовались величины 383 ppm для теплого и 402 ppm для холодного периодов. Для озона современное содержание задавалось по среднемесячным значениям, полученным по спутниковым данным OMI за 2003–2023 гг.: для холодного периода величина составила 345 ед. Добсона, для теплого периода – 321 ед. Добсона. При вычислениях без учета сезонных вариаций примесей выбрано примерно среднее значение между сезонами – 334 ед. Добсона. Для оценки аэрозольного влияния задавалось среднее многолетнее значение AOT на длине волны 550 нм, равное 0,19 [Чубарова и др., 2014]. Сезонные вариации задавались по данным реанализа CAMS: соответственно AOT = 0,08 для холодного и AOT = 0,25 для теплого периодов (см. табл. 1). Это удовлетворительно описывает сезонный ход AOT в Московском регионе и примерно соответствует величинам, наблюдающимся по данным многолетних измерений.

Доиндустриальные (Pre-ind) среднегодовые значения для приземного отношения смеси CO_2 при-

няты равными 280 ppm [IPCC, 2007], содержание O_3 на широте Москвы взято равным 365 ед. Добсона [Austin et al., 2013]. Оценка антропогенной компоненты АОТ была выбрана на основании многолетних спутниковых данных MODIS в московском регионе. Она определялась по разнице АОТ в Москве и величиной 5% квантиля АОТ по всему Московскому региону, которая наблюдалась на его северо-западе, в чистом районе Подмосквья. Эта величина составляет 0,08 и соответственно фоновые среднегодовые значения АОТ равны 0,11 [Климат Москвы..., 2017]. Оценка особенностей радиационного воздействия с учетом сезонного хода составила соответственно значения АОТ, равное 0,25 в современную и 0,17 в доиндустриальную эпохи в теплый период. Для холодного периода в связи с практически полным отсутствием данных спутниковых измерений и их большими погрешностями использовались средние различия АОТ, составившие 0,03 по данным AERONET между Москвой и Звенигородом, расположенном на западе Подмосквья в чистом, удаленном от городских загрязнений месте [Chubarova et al., 2011]. Соответственно, доиндустриальная величина АОТ составила 0,05. Эта оценка соответствует АОТ в холодный период года в умеренных широтах Северного полушария и в других чистых регионах, согласно данным AERONET [AERONET..., 2023]. Для CO_2 межсезонные различия не вводились, поскольку концентрация мало изменчива и недоста-

точно изучена. Для доиндустриальных значений O_3 сезонные различия определялись по относительным отклонениям содержания от среднегодовых значений по спутниковым данным за период 2003–2023 гг. Соответственно, получены значения: 358 ед. Добсона для теплого и 385 ед. Добсона для холодного сезонов.

Дополнительно были рассчитаны скорости радиационного нагрева (HR), которые определялись через радиационный баланс (F^{Total}) по формуле:

$$HR = \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_{rad} = - \frac{g}{C_p} \frac{dF^{Total}}{dp}.$$

(2)

По значениям HR были вычислены изменения скорости радиационного нагрева (ΔHR) под действием изменения радиационного баланса с доиндустриального периода:

$$\Delta HR = HR_{modern} - HR_{Pre-ind}.$$

(3)

Для оценки качества радиационных расчетов по модели ECRAD были проведены сравнения расчетов суммарной радиации с высокоточными численными расчетами по методу Монте-Карло (МК) [Чубарова и др., 1999] при одинаковых внешних параметрах (высота Солнца, альbedo поверхности, влагосодержание атмосферы, интегральное содержание озона) и разном содержании аэрозоля континентального типа. Результаты сравнений показаны на рис. 2.

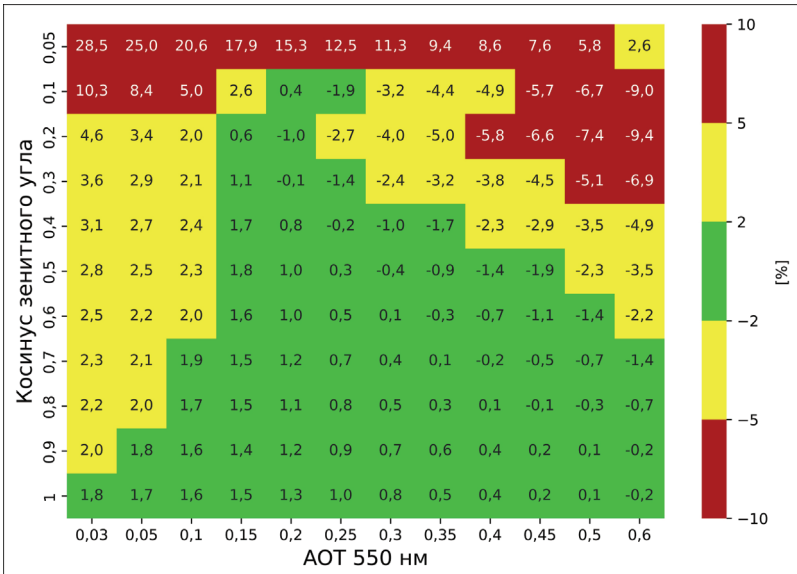


Рис. 2. Относительная разница в величинах суммарной коротковолновой радиации у поверхности Земли между расчетами методом Монте-Карло и по модели ECRAD для разных аэрозольных оптических толщин и косинусов зенитного угла Солнца. Вычисления проведены для влагосодержания атмосферы 19,6 кг/м²; SSA = 0,9; интегрального содержания O_3 – 330 ед. Добсона, объемного отношения смеси CO_2 – 380 ppm

Fig. 2. The relative difference in the values of the Global radiation at the BOA between calculations using the Monte Carlo method and the ECRAD model for different AOT 550 nm and cosines of the Sun zenith angle. Calculations were performed for the following conditions: precipitable water: 19,6 kg/m², SSA = 0,9, integral O_3 content: 330 DU, CO_2 volume mixing ratio: 380 ppm

Стоит отметить хорошее согласие двух моделей для широкого диапазона высот Солнца и АОТ: при АОТ от 0,05 до 0,3 и высотах Солнца ($h > 6^\circ$), соответствующих косинусу зенитного угла Солнца $\cos(Z) > 0,1$, относительная погрешность в большинстве значений не превышает 2%. Это сравнение гарантирует приемлемую точность вычислений ECRAD в данном диапазоне высот Солнца и АОТ 550 нм. Однако по сравнению с высокоточным методом Монте-Карло ECRAD существенно занижает аэрозольные эффекты при низких высотах солнца ($\cos(Z) < 0,1$, $h < 6^\circ$), а также при больших значениях АОТ 550 нм ($> 0,3$).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим результаты радиационных расчетов антропогенного радиационного воздействия, выполненных с помощью модели ECRAD, с учетом сезонных изменений концентраций рассматриваемых компонентов и для среднегодовых значений в осредненных условиях теплого и холодного периодов. Рассмотрим и проанализируем вначале вертикальные профили радиационного воздействия с учетом сезонного хода концентраций CO_2 , интегрального содержания O_3 и АОТ для коротковолнового, длинноволнового диапазона спектра и во всем спектральном диапазоне (рис. 3).

Рассмотрим вначале антропогенное радиационное воздействие (RF) за счет CO_2 (см. рис. 3, I). Углекислый газ активно поглощает и переизлучает длинноволновое излучение в полосах поглощения 10,6 и 15 мкм, что определяет его парниковые свойства. Также CO_2 поглощает солнечную радиацию и в ближнем ИК-диапазоне на 4,3 мкм, однако не так интенсивно [Тимофеев и др., 2019]. Стоит отметить, что для холодного сезона характерно более выраженное положительное радиационное воздействие CO_2 во всем спектральном диапазоне (RF^{Total}) от поверхности до высоты 600 гПа, составляющее 1,2–2 Вт/м² (см. рис. 3, IB), что связано с меньшим ослаблением за счет поглощения солнечной радиации при низкой высоте Солнца (около –0,06 Вт/м²) и более эффективным излучением в длинноволновом диапазоне (см. рис. 3, IB). В некоторой степени это определяется и несколько большими значениями отношения смеси у поверхности, чем в теплый период, а также особенностями профиля CO_2 в приземном слое (см. рис. 1). В стратосфере наблюдается максимум радиационного выхолаживания ΔHR , который составляет –1,01 К/сут. для теплого и –0,97 К/сут. для холодного периодов. В то же время у поверхности наблюдается небольшой радиационный нагрев (в холодный период около 0,02 К/сут., в теплый – порядка 0,034 К/сут.) (см. рис. 3, IG).

Озон является также парниковым газом и поглощает тепловое излучение главным образом вблизи 9,6 мкм. Большее влияние оказывает поглощение O_3 солнечной радиации в УФ-С и УФ-В областях спектра в полосах Хартли и Хюггинса, а также в видимом диапазоне (полоса поглощения Шаппюи). На графиках видно значительно большее влияние O_3 на коротковолновую радиацию, при этом величина RF^{Total} положительна на НГА и отрицательна на ВГА для обоих периодов (см. рис. 3, II). Это происходит из-за антропогенного уменьшения концентрации стратосферного озона, в связи с чем происходит увеличение нисходящей солнечной радиации к поверхности Земли и рост RF в коротковолновом диапазоне (RF^{SW}) у поверхности. В стратосфере в связи с уменьшением концентрации парникового газа наблюдается отрицательное радиационное воздействие в длинноволновом диапазоне спектра (RF^{LW}). В целом на ВГА отмечается отрицательная величина RF^{Total} для всего года, но в холодный период RF^{Total} несколько больше по модулю (–1,47 для холодного и –1,22 Вт/м² для теплого периодов), что может быть объяснено высоким значением альбедо поверхности и его влиянием на коротковолновый диапазон спектра. Изменение в радиационном воздействии также определяет и относительно высокие значения скоростей радиационного охлаждения (ΔHR) в стратосфере (около –1,77 и –0,6 К/сут. соответственно для теплого и холодного периодов).

Слабопоглощающий антропогенный аэрозоль эффективно ослабляет солнечную коротковолновую радиацию, главным образом, за счет рассеяния, что определяет преобладающее отрицательное радиационное антропогенное воздействие в коротковолновом диапазоне спектра на НГА (порядка –10 для теплого и –1,62 Вт/м² для холодного периодов). В холодный период RF^{Total} за счет аэрозоля гораздо ниже, что связано с малой высотой Солнца, более низким значением антропогенного АОТ (0,03) и высоким альбедо поверхности. Отметим, что из-за высокого альбедо в холодный сезон на ВГА наблюдается слабое положительное радиационное воздействие (0,67 Вт/м²), в то время как в теплый период величина RF^{Total} на ВГА отрицательна (–1,36 Вт/м²). Радиационное воздействие, связанное с аэрозолем, заметно влияет на скорость нагрева приземной тропосферы – около 0,23 К/сут. для холодного и 0,41 К/сут. для теплого сезонов.

Значения RF с учетом сезонных вариаций для ВГА и на НГА отдельно для газов и аэрозоля и для их общего действия в коротковолновом и длинноволновом диапазоне спектра, а также изменение скоростей радиационного нагрева даны в табл. 3. Суммируя влияние всех трех факторов, следует заметить, что для Московского региона антропогенное радиационное воздействие (RF^{Total}) отрицательно у поверхности для

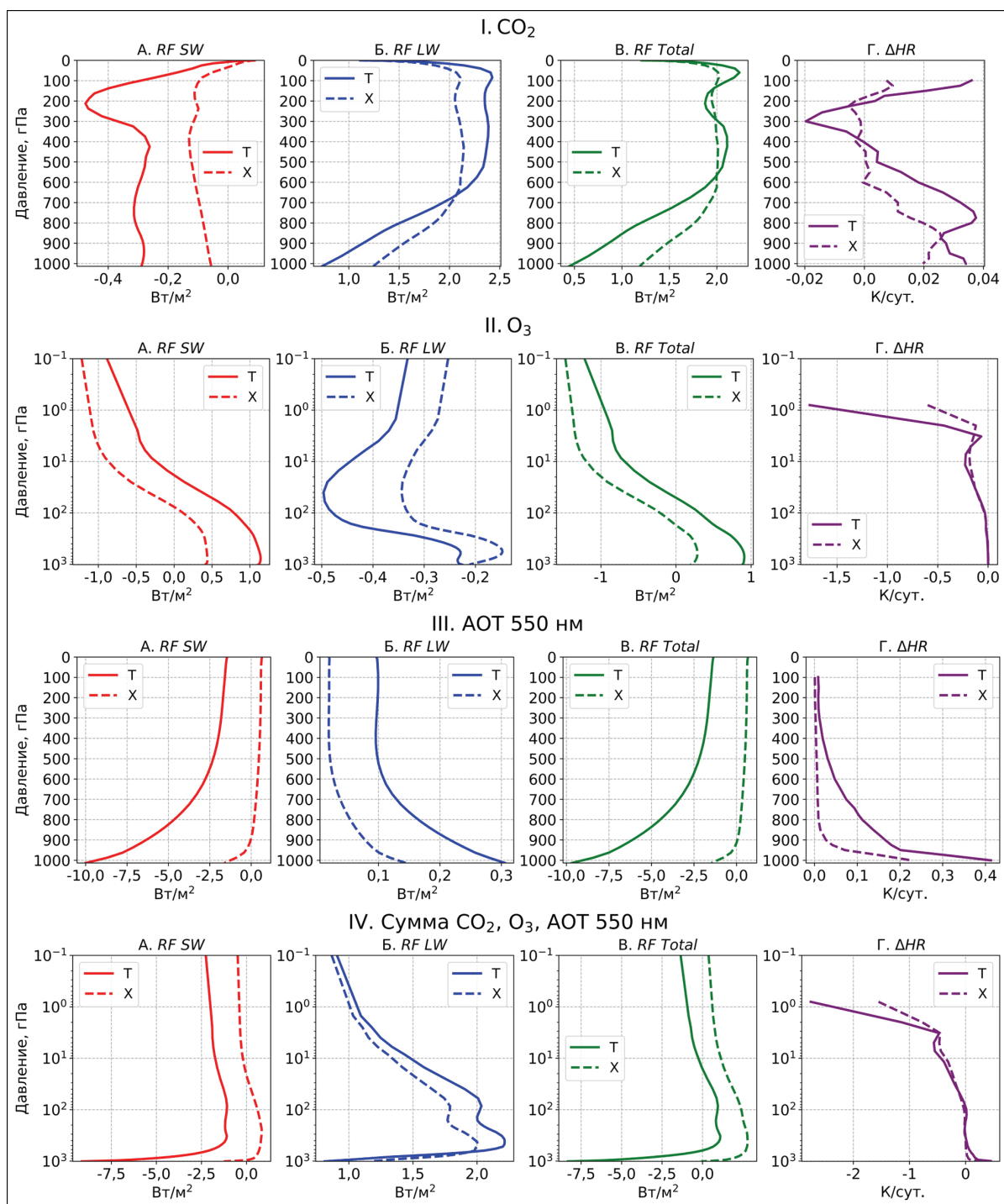


Рис. 3. Вертикальные профили антропогенных радиационных воздействий $RF^{SW, LW, Total}$ за счет CO₂ (I), O₃ (II), AOT 550 нм (III) и совокупного влияния данных факторов (IV) в коротковолновом (А), длинноволновом (Б) и во всем спектральном диапазоне (В), а также на скорость радиационного нагрева (ΔHR) (Г) с учетом сезонных вариаций примесей по данным расчетов модели ECRAD для МО МГУ в теплый (Т) и холодный (Х) сезоны.

Приземные концентрации CO₂ для теплого сезона – 383 и 280 ppm; для холодного сезона – 402 и 280 ppm; интегральное содержание O₃ для теплого сезона – 321 и 358 ед. Добсона; для холодного сезона – 345 и 385 ед. Добсона; значение AOT 550 нм для теплого сезона – 0,25 и 0,17; для холодного сезона – 0,08 и 0,05 для современных и доиндустриальных условий соответственно

Fig. 3. Vertical profiles of anthropogenic radiative forcings (RF) of CO₂ (I), O₃ (II), AOT 550 nm (III) and cumulative effect of this factors (IV) in (A) shortwave, (Б) longwave, and in the entire spectral range (B), on the heating rate (Γ), taking into account seasonal variations in CO₂ concentration according to calculations of the ECRAD model for MO MSU in the cold (X) and warm (T) seasons. Surface CO₂ mixing ratio for the warm season: 383 and 280 ppm, for the cold season: 402 and 280 ppm; integral content of O₃ for the warm season: 321 and 358 DU; for the cold season: 345 and 385 DU; value of AOT 550 nm for the warm season: 0,25 and 0,17; for the cold season: 0,08 and 0,05 for modern and pre-industrial conditions, respectively

теплого сезона ($-8,33 \text{ Вт/м}^2$) и слабо отрицательно для холодного периода ($-0,08 \text{ Вт/м}^2$). Для теплого сезона определяющее влияние на приземный и стратосферный RF^{Total} в городских условиях оказывает антропогенное увеличение АОТ в атмосфере, воздействие которого на НГА на порядок больше CO_2 и O_3 . Для холодного периода важным фактором приземного RF^{Total} является антропогенное увеличение CO_2 , а на ВГА – уменьшение содержания O_3 , при этом аэрозольное воздействие на ВГА оценивается как второстепенное. В результате суммарного антропогенного воздействия скорость радиационного нагрева в приземной тропосфере увеличивается на $0,45 \text{ К/сут.}$ для теплого и $0,25 \text{ К/сут.}$ для холодного сезонов. В то же время в

стратосфере наблюдается сильное радиационное выхолаживание до $-2,76 \text{ К/сут.}$ для теплого и $-1,55 \text{ К/сут.}$ для холодного периодов, главным образом, за счет уменьшения переизлучения длинноволновой радиации из-за уменьшения концентрации стратосферного озона.

В табл. 4 приведены аналогичные расчеты, что и в табл. 3, но при использовании среднегодовых значений для современного и доиндустриального периодов. Хорошо видно, что в целом знаки величин радиационного воздействия практически везде сохраняются. Наибольшие различия наблюдаются для аэрозоля, эффекты которого по модулю заметно выше в холодный период и ниже в теплый за счет учета сезонности АОТ.

Таблица 3

Значения антропогенного радиационного воздействия (RF) на коротковолновую и длинноволновую радиацию и на весь спектральный диапазон (SW , LW , $Total$), а также изменение скорости нагрева атмосферы (ΔHR) вследствие антропогенного радиационного воздействия с учетом сезонного хода антропогенных изменений примесей

Фактор	RF для коротковолнового диапазона, Вт/м²		RF для длинноволнового диапазона, Вт/м²		RF для всего спектрального диапазона, Вт/м²		ΔHR , К/сут.	
Для НГА (1013 гПа)								
Период	Т	Х	Т	Х	Т	Х	Т	Х
CO ₂	-0,29	-0,06	0,73	1,24	0,45	1,19	0,034	0,020
O ₃	1,11	0,41	-0,23	-0,21	0,89	0,19	0,002	0,006
АОТ 550 нм	-9,99	-1,62	0,31	0,14	-9,68	-1,48	0,413	0,227
Сумма	-9,14	-1,26	0,81	1,18	-8,33	-0,08	0,448	0,251
Для ВГА (0 гПа)								
Период	Т	Х	Т	Х	Т	Х	Т	Х
CO ₂	0,08	0,09	1,15	1,10	1,23	1,20	-1,013	-0,970
O ₃	-0,89	-1,22	-0,33	-0,25	-1,22	-1,47	-1,771	-0,599
АОТ 550 нм	-1,46	0,65	0,10	0,02	-1,36	0,67	0,021	0,015
Сумма	-2,26	-0,49	0,91	0,87	-1,35	0,38	-2,760	-1,552

Примечание. Получено по данным расчетов модели ECRAD для МО МГУ.

Рассмотрим зависимость радиационных воздействий во всем спектральном диапазоне (RF^{Total}) CO_2 , O_3 и АОТ 550 нм без учета сезонных вариаций их содержания как функцию от высоты Солнца и альбедо поверхности для теплого и холодного сезонов (рис. 4). Это позволит оценить полученные нами ранее величины радиационного воздействия для широкого диапазона этих геофизических факторов. Высота Солнца устанавливалась от 6° до значения, близкого к максимальному полуденному в теплый (56°) и холодный (16°) периоды для оценки реально возможных изменений антропогенно обусловленного радиационного воздействия при различных геофизических условиях в течение рассматриваемых периодов. Видно, что наблюдается нелинейный характер изменения величины радиационного

воздействия на ВГА и НГА от высоты Солнца и альбедо поверхности. Оно закономерно наиболее сильно выражено для аэрозоля, поскольку эти факторы влияют, главным образом, на коротковолновую радиацию. Хорошо видно как меняется знак радиационного воздействия при увеличении альбедо поверхности и высоты Солнца, которое при больших высотах Солнца уже может наблюдаться при альбедо поверхности $A = 30\%$. Минимальное влияние эти факторы оказывают на вариации $RF^{Total} \text{ CO}_2$. Для холодного и теплого сезонов характерны в целом похожие закономерности, однако имеется ряд важных количественных различий. В первую очередь стоит отметить преобладание положительных значений RF^{Total} АОТ для холодного периода и отрицательного – для теплого периода, которые объясняются раз-

лиями в значениях альбеда. Нелинейный отклик RF^{Total} на изменение высоты Солнца связан с изменением оптической массы атмосферы, а нелинейная связь RF^{Total} АОТ с альбедо определяется нелинейными эффектами многократного переотражения.

Рассмотрим также изменение радиационного нагрева атмосферы (ΔHR) на НГА и ВГА за счет радиационного воздействия трех рассматриваемых антропогенных факторов в зависимости от высоты Солнца и альбеда поверхности (рис. 5).

Таблица 4

Значения антропогенного радиационного воздействия (RF) на коротковолновую, длинноволновую радиацию и на весь спектральный диапазон ($SW, LW, Total$), а также на изменение скорости нагрева атмосферы (ΔHR) вследствие антропогенного радиационного воздействия для среднегодовых антропогенных изменений примесей

Фактор	RF для коротковолнового диапазона, Вт/м ²		RF для длинноволнового диапазона, Вт/м ²		RF для всего спектрального диапазона, Вт/м ²		ΔHR , К/сут.	
Для НГА (1013 гПа)								
Период	Т	Х	Т	Х	Т	Х	Т	Х
CO ₂	−0,31	−0,05	0,8	1,15	0,49	1,1	0,037	0,019
O ₃	0,94	0,29	−0,19	−0,17	0,75	0,12	0,001	0,009
АОТ 550 нм	−10,01	−3,76	0,31	0,38	−9,71	−3,38	0,417	0,500
Сумма	−9,36	−3,50	0,92	1,38	−8,45	−2,13	0,453	0,524
Для ВГА (0 гПа)								
Период	Т	Х	Т	Х	Т	Х	Т	Х
CO ₂	0,09	0,09	1,24	1,03	1,33	1,12	−1,102	−0,905
O ₃	−0,73	−0,94	−0,27	−0,20	−1,00	−1,140	−1,457	−0,482
АОТ 550 нм	−1,47	1,6	0,10	0,05	−1,37	1,65	0,021	0,039
Сумма	−2,11	0,73	1,06	0,88	−1,04	1,61	−2,536	−1,346

Примечание. Получено по данным расчетов модели ECRAD для МО МГУ.

Хорошо видно, что на ВГА альbedo поверхности практически не влияет на изменение скоростей радиационного нагрева. В то же время наблюдается заметное радиационное выхолаживание стратосферы, которое увеличивается по модулю в зависимости от высоты Солнца: от −1,3 до −2,6 К/сут. для теплого и от −1,1 до −1,47 К/сут. для холодного периода. На нижней границе атмосферы роль альбеда поверхности несколько увеличивается с увеличением высоты Солнца: происходит увеличение скорости радиационного нагрева приземной тропосферы с ростом альбеда поверхности.

Сравним также расчетные оценки RF^{Total} по модели ECRAD (см. табл. 3) со средними антропогенными RF^{Total} по земному шару по данным [IPCC, 2022]. Среднее глобальное радиационное воздействие на ВГА за счет CO₂ составляет около 2,16 (от 1,90 до 2,41) Вт/м², в то время как по расчетам в Московском регионе его величина значительно ниже: около 1,2 Вт/м² в холодный и 1,23 Вт/м² в теплый периоды. Стоит отметить удовлетворительное согласие по RF в длинноволновом спектре (RF^{LW}) на ВГА (1,15 и 1,10 Вт/м² для теплого и холодного периодов соответственно) по ECRAD с оценками по [Тимофеев и др.,

2019] для модели атмосферы средних широт, которые составляют для холодного периода 1,47 Вт/м² и для теплого периода 1,24 Вт/м². Главным образом, различия в оценках связаны с задаваемыми современными концентрациями CO₂. Для озона также характерен разный знак RF^{Total} на ВГА для среднеглобальных оценок (−0,47 Вт/м²) и для оценок по ECRAD в Москве (от −1,22 до −1,47 Вт/м² для разных сезонов). Это связано с влиянием антропогенного увеличения тропосферного O₃, радиационное воздействие которого в среднем по земному шару положительно и превышает по модулю отрицательное воздействие антропогенного уменьшения содержания стратосферного O₃. При этом наибольшие по модулю отрицательные RF для стратосферного озона смещены к полюсам [Плахина, Махоткина, 2008]. В данной работе приводится оценка антропогенного RF стратосферного озона. Прямое аэрозольное радиационное воздействие оценивается в среднем по Земле в −0,22 Вт/м², для условий Московской городской атмосферы он равен около −1,36 Вт/м² для теплого и +0,67 Вт/м² для холодного периодов. Это связано с существенным влиянием антропогенного источника аэрозоля в Москве.

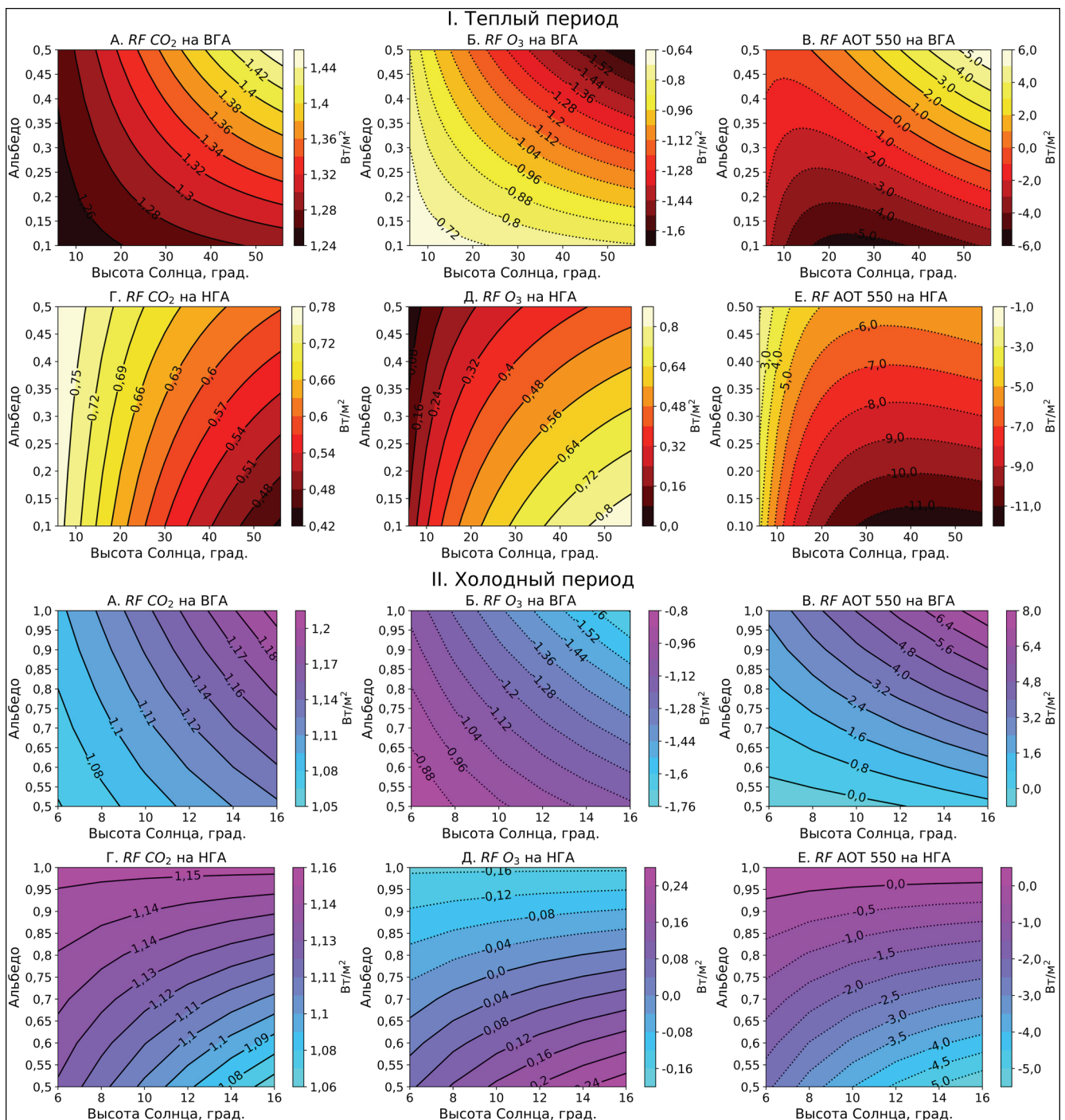


Рис. 4. Радиационное воздействие (RF^{total}) на ВГА: А – углекислого газа; Б – озона; В – АОТ 550 нм; на НГА: Г – углекислого газа; Д – озона; Е – АОТ 550 нм; во всем диапазоне спектра при различных значениях альбедо и высоты Солнца для теплого (I) и холодного (II) периодов при среднегодовых значениях концентрации примесей в современный и доиндустриальный периоды. *Источник:* получено по данным расчетов модели ECRAD для МО МГУ

Fig. 4. Radiative forcing (RF^{total}) at TOA: А – carbon dioxide; Б – ozone; В – АОТ 550 nm; at BOA: Г – carbon dioxide; Д – ozone; Е – АОТ 550 nm; in the entire spectrum range at different albedo values and solar altitudes for the warm (I) and cold (II) periods at average annual values of impurity concentration in the modern and pre-industrial periods. *Source:* obtained from calculations of the ECRAD model for the Moscow State University

ВЫВОДЫ

Антропогенное радиационное воздействие углекислого газа во всем спектральном диапазоне положительно и составляет с учетом сезонного хода

концентрации CO_2 около $0,45 \text{ Вт/м}^2$ в теплый и $1,19 \text{ Вт/м}^2$ в холодный периоды на НГА и порядка $1,2 \text{ Вт/м}^2$ – на ВГА. Изменения в скоростях нагрева небольшие у поверхности земли, однако отмечает-

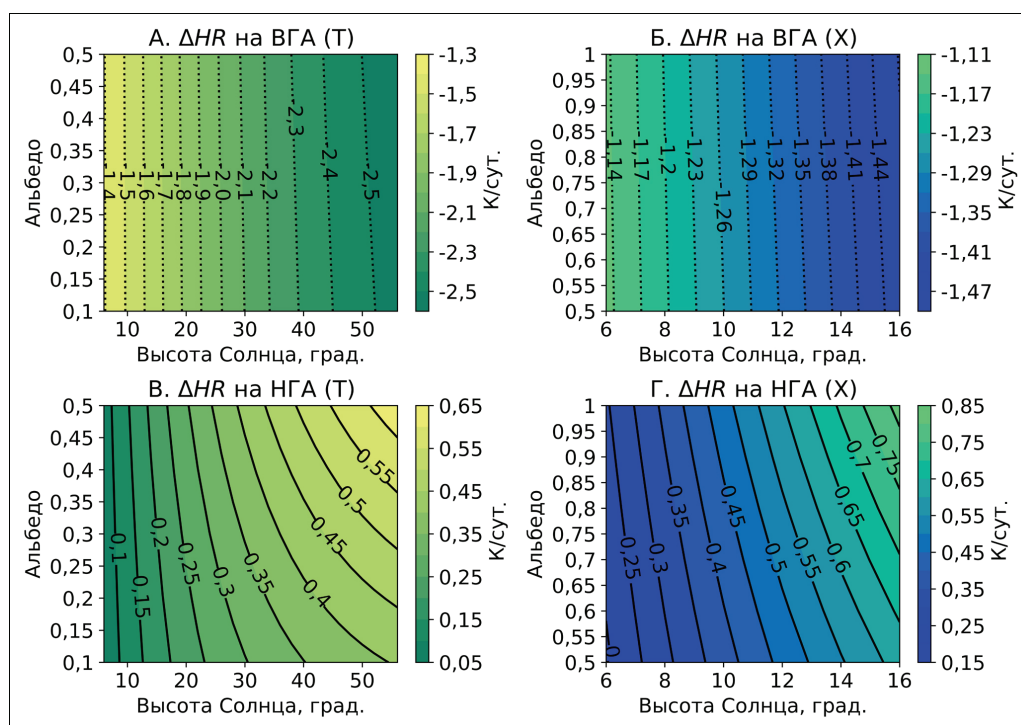


Рис. 5. Изменение скоростей радиационного нагрева (ΔHR) на ВГА в теплый (А) и холодный (Б) периоды; на НГА в теплый (В) и холодный (Г) периоды. Источник: получено по данным модели ECRAD для МО МГУ

Fig. 5. Change in radiative heating rates (ΔHR) on the TOA: for warm (A), for cold periods (B); on the BOA: for warm (B), for cold periods (Г). Source: obtained according to the ECRAD model for the MO MSU

ся заметное радиационное выхолаживание на ВГА, порядка -1 К/сут. При неучете сезонных различий и использовании среднегодовых содержаний CO_2 наблюдаются похожие количественные оценки.

Для общего содержания озона, содержание которого понижено относительно доиндустриального периода, характерны минимальные значения радиационного воздействия для средней стратосферы и на ВГА при расчетах с учетом сезонных вариаций ($-1,22$ Вт/м² для теплого и $-1,47$ Вт/м² для холодного сезонов) и при среднегодовых значениях концентраций (-1 Вт/м² для теплого и $-1,14$ Вт/м² для холодного сезонов). Изменения в RF сильно влияют на скорость радиационного выхолаживания стратосферы, которое сильнее проявляется в теплый сезон и составляет $-1,77$ К/сут. при учете сезонных вариаций.

Аэрозоль эффективно рассеивает солнечное излучение в нижней тропосфере, величина его RF отрицательна и сильно зависит от высоты Солнца и альбедо поверхности. RF АОТ гораздо выше по модулю в условиях теплого периода и составляет $-9,68$ Вт/м² у поверхности. Наличие аэрозольного поглощения вызывает радиационное повышение температуры в приземном слое примерно на $0,41$ К/сут. (при учете сезонных вариаций). Величина RF аэрозоля на ВГА отрицательна для теплого периода (около $-1,36$ Вт/м²) и положительна для холодного периода (порядка $0,67$ Вт/м²).

Суммарное радиационное воздействие всех трех факторов при учете их сезонных вариаций оценивается отрицательным для теплого сезона ($-8,33$ Вт/м² (НГА), $-1,35$ Вт/м² (ВГА)) и для холодного периода на НГА ($-0,08$ Вт/м²), а также положительно для холодного периода на ВГА ($0,38$ Вт/м²). При этом определяющую роль как на ВГА, так и на НГА для теплого периода играет аэрозоль, а для холодного периода важными факторами являются углекислый газ для приземной тропосферы и озон в стратосфере. Скорости радиационного нагрева закономерно положительны в приземной тропосфере — $0,45$ и $0,25$ К/сут. и отрицательны в верхней атмосфере — $-2,76$ и $-1,55$ К/сут. для теплого и холодного сезонов соответственно.

Выявлены нелинейные зависимости RF и величины изменения скорости нагрева (ΔHR) за счет действия антропогенных факторов от высоты Солнца и альбедо поверхности, которые связаны с нелинейными изменениями оптической массы и условиями многократного рассеяния в коротковолновом диапазоне спектра.

Отметим, что проведенные исследования могут служить основой для тестирования качества воспроизведения радиации в глобальных климатических моделях, а также являются важными при определении роли различных геофизических параметров в неопределенности таких оценок.

Благодарности. Анализ антропогенного аэрозоля и его радиационного воздействия выполнены при финансовой поддержке проекта РНФ № 19-77-30004-П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Володин Е.М., Кострыкин С.В. Аэрозольный блок в климатической модели ИВМ РАН. Метеорология и гидрология // Метеорология и гидрология. 2016. № 8. С. 5–17.
- Горбаренко Е.В. Экстремумы и основные тенденции в многолетней изменчивости радиационных параметров атмосферы города Москвы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2022. № 6. С. 90–103
- Климат Москвы в условиях глобального потепления / под ред. А.В. Кислова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2017. 288 с.
- Плахина И.Н., Махоткина Е.Л. Аэрозольно-радиационный форсинг в атмосфере. Обзор современных данных // Ученые записки Российского гос. гидрометеорологического ун-та. 2008. № 6. С. 20–37.
- Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003. 474 с.
- Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А., Поляков А.В. Оценки вариаций радиационного форсинга для углекислого газа в последнее столетие и в будущем // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 10. С. 856–859. DOI: 10.15372/AOO20191009.
- Чубарова Н.Е., Незваль Е.И., Беликов И.Б. и др. Климатические и экологические характеристики московского мегаполиса за 60 лет по данным Метеорологической обсерватории МГУ // Метеорология и гидрология. 2014. № 9. С. 49–64.
- Чубарова Н.Е., Рублев А.Н., Троценко А.Н. и др. Вычисление потоков солнечного излучения и сравнение с результатами наземных измерений в безоблачной атмосфере // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 1999. Т. 35. № 2. С. 222–239.
- Austin J., Horowitz L.W., Schwarzkopf D.M. et al. Stratospheric Ozone and Temperature Simulated from the Pre-industrial Era to the Present Day, *Journal of Climate*, 2013, vol. 26(11), p. 3528–3543, DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00162.1.
- Chen W.-T., Hong L., Seinfeld J.H. Future climate impacts of direct radiative forcing of anthropogenic aerosols, tropospheric ozone, and long-lived greenhouse gases, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, vol. 112, iss. D14.
- Chubarova N.E., Sviridenkov M.A., Smirnov A. et al. Assessments of urban aerosol pollution in Moscow and its radiative effects, *Atmos. Meas. Tech.*, 2011, vol. 4, p. 367–378, DOI: 10.5194/amt-4-367-2011.
- Chubarova N.E., Vogel H., Androsova E.E. et al. Columnar and surface urban aerosol in the Moscow megacity according to measurements and simulations with the COSMO-ART model, *Atmos. Chem. Phys.*, 2022, vol. 22, p. 10443–10466, DOI: 10.5194/acp-2022-83.
- Heald C.L., Ridley D.A., Kroll J.H. et al. Contrasting the direct radiative effect and direct radiative forcing of aerosols, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, vol. 14(11), p. 5513–5527, DOI: 10.5194/acp-14-5513-2014.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Meteorological Society*, 2020, vol. 146, DOI: 10.1002/qj.3803.
- Hogan R.J. ECRAD radiation scheme: User Guide, European Centre for Medium Range Weather Forecasts, Reading, UK, 2022.
- Hogan R.J., Bozzo A.A. flexible and efficient radiation scheme for the ECMWF model, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2018, 10, DOI: 10.1029/2018MS001364.
- Iacono M.J., Delamere J.S., Mlawer E.J. et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, vol. 113, iss. D13, DOI: 10.1029/2008JD009944.
- Inness A., Ades M., Agustí-Panareda A. et al. The CAMS reanalysis of atmospheric composition, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, vol. 19(6), DOI: 10.5194/acp-19-3515-2019.
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change R.K. Pachauri, A. Reisinger (eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, 104 p.
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p., DOI: 10.1017/CBO9781107415324.
- IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor et al. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 p., DOI: 10.1017/9781009325844.
- Myhre G., Aas W., Cherian R. et al. Multi-model simulations of aerosol and ozone radiative forcing due to anthropogenic emission changes during the period 1990–2015, *Atmos. Chem. Phys.*, 2017, vol. 17, p. 2709–2720, DOI: 10.5194/acp-17-2709-2017.
- Ohnaiser K., Ansmann A., Witthuhn J. et al. Self-lofting of wildfire smoke in the troposphere and stratosphere: simulations and space lidar observations, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 23, p. 2901–2925, DOI: 10.5194/acp-23-2901-2023.
- Prša A., Harmanec P., Torres G. et al. Nominal Values for Selected Solar and Planetary Quantities: IAU 2015 Resolution B3, *Astron. J.*, 2016, 152:41, DOI: 10.3847/0004-6256/152/2/41.
- Rémy S., Kipling Z., Flemming J. et al. Description and evaluation of the tropospheric aerosol scheme in the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Integrated Forecasting System (IFS-AER, cycle 45R1), *Geosci. Model Dev.*, 2019, vol. 12, p. 4627–4659, DOI: 10.5194/gmd-12-4627-2019.
- Ren T., Ping Y., Jian W. et al. Performance of Cloud 3D Solvers in Ice Cloud Shortwave Radiation Closure Over the Equatorial Western Pacific Ocean, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2022, vol. 14(2), DOI: 10.1029/2021MS002754, 2022.
- Röttenbacher J., Ehrlich A., Müller H. et al. Evaluating the Representation of Arctic Cirrus Solar Radiative Effects in the IFS with Airborne Measurements, *EGUsphere* [preprint], 2024, DOI: 10.5194/egusphere-2024-281.

Электронные ресурсы

Монреальский протокол. URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/montreal_prot.shtml (дата обращения 10.05.2023).

AERONET Data Synergy Tool. URL: https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/bamgommas_interactive (дата обращения 10.05.2023).

ECMWF Radiation Scheme Home. URL: <https://confluence.ecmwf.int/display/ECRAD> (дата обращения 15.05.2023).

Section 2.1.5.7. Aerosols and Greenhouse Gases URL: <https://confluence.ecmwf.int/display/FUG/Section+2.1.5.7+Aerosols+and+Greenhouse+Gases> (дата обращения 15.05.2023).

Поступила в редакцию 23.08.2024

После доработки 10.09.2024

Принята к публикации 15.10.2024

THE ASSESSMENT OF SHORTWAVE AND LONGWAVE RADIATIVE FORCING OF GREENHOUSE GASES AND ATMOSPHERIC AEROSOL FOR THE CLOUDLESS SKY CONDITIONS

N.A. Petrov¹, N.E. Chubarova²

^{1,2} *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology*

¹ *Bachelor's degree; email: nial.03@mail.ru*

² *Professor; D.Sc. in Geography; email: natalia.chubarova@gmail.com*

The gas-aerosol composition of the atmosphere determines specific features of the radiative net irradiance in the atmosphere and the associated climatic changes. The study discusses the anthropogenic variations in the content of the most important greenhouse gases, such as carbon dioxide (CO₂) and ozone (O₃), as well as the atmospheric aerosol. The estimates of their radiative effects (forcing, *RF*) in various geophysical conditions are given. Based on the modern ECRAD radiation model, the *RF* values of considered anthropogenic trace gases and aerosols over the past 20 years were estimated for different seasons of the year relative to their pre-industrial level for the Moscow region. We determined specific features of the vertical profiles of *RF* in the shortwave and longwave spectral ranges and their values at the bottom (BOA) and the top of the atmosphere (TOA) depending on solar elevation and surface albedo, both taking seasonal variations into account and without them. The total *RF^{Total}* for the warm period with a low surface albedo is negative (−8,33 W/m² at BOA and −1,35 W/m² at TOA) if seasonal variations of all considering trace gases and aerosols are taken into account. A weakly absorbing aerosol typical of mid-latitudes plays a significant role in the negative *RF*. The *RF^{Total}* for the cold season is −0,08 W/m² at BOA and +0,38 W/m² at TOA. The positive value of the total *RF* at the TOA is due to the positive *RF* of the aerosol with its absorbing properties and the influence of the high albedo of snow surface, as well as due to the positive *RF* of carbon dioxide. A nonlinear *RF* dependence of the trace gases and aerosol on the solar elevation and surface albedo was found. The radiative heating rate due to greenhouse gases at TOA is negative in all seasons of the year. At the same time, it is positive at BOA (about 0,45 K/day in the warm season and 0,25 K/day in the cold season), mainly due to the absorption by aerosol in the lower layers of the troposphere. The radiative heating rate due to CO₂ is slightly positive.

Keywords: radiative forcing, climate changes, ECRAD model, net irradiance, heating rate, aerosol, carbon dioxide, ozone

Acknowledgements. The analysis of anthropogenic aerosol and its radiation effects was financially supported by the Russian Science Foundation (project 19-77-30004-II).

REFERENCES

- Austin J., Horowitz L.W., Schwarzkopf D.M. et al. Stratospheric Ozone and Temperature Simulated from the Pre-industrial Era to the Present Day, *Journal of Climate*, 2013, vol. 26 (11), p. 3528–3543, DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00162.1.
- Chen W.-T., Hong L., Seinfeld J.H. Future climate impacts of direct radiative forcing of anthropogenic aerosols, tropospheric ozone, and long-lived greenhouse gases, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, vol. 112, iss. D14.
- Chubarova N.E., Nezval' E.I., Belikov I.B. et al. Climatic and environmental characteristics of Moscow megalopolis according to the data of the Moscow State University Meteorological Observatory over 60 years, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2014, vol. 39(9), p. 602–613, DOI: 10.3103/S1068373914090052.
- Chubarova N.E., Rublev A.N., Trotsenko A.N. and Trembach V.V. Comparisons between modeled and measured surface shortwave irradiances under clear sky conditions.,

- Izvestiya – Atmospheric and Oceanic Physics*, 1999, vol. 35, no. 2, p. 201–216.
- Chubarova N.E., Sviridenkov M.A., Smirnov A. et al. Assessments of urban aerosol pollution in Moscow and its radiative effects, *Atmos. Meas. Tech.*, 2011, vol. 4, p. 367–378, DOI: 10.5194/amt-4-367-2011.
- Chubarova N.E., Vogel H., Androsova E.E. et al. Columnar and surface urban aerosol in the Moscow megacity according to measurements and simulations with the COSMO-ART model, *Atmos. Chem. Phys.*, 2022, vol. 22, p. 10443–10466, DOI: 10.5194/acp-2022-83.
- Gorbarenko E.V. Ekstremumy i osnovnye tendentsii v mnogoletnej izmenchivosti radiatsionnykh parametrov atmosfery goroda Moskvy [Extremes and general trends in long-term variability of atmospheric radiation parameters in Moscow], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2022, no. 6, p. 90–103. (In Russian)
- Heald C.L., Ridley D.A., Kroll J.H. et al. Contrasting the direct radiative effect and direct radiative forcing of aerosols, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, vol. 14(11), p. 5513–5527, DOI: 10.5194/acp-14-5513-2014.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Meteorological Society*, 2020, vol. 146, DOI: 10.1002/qj.3803.
- Hogan R.J. *ECRAD radiation scheme: User Guide*, European Centre for Medium Range Weather Forecasts, Reading, UK, 2022.
- Hogan R.J., Bozzo A.A. Flexible and efficient radiation scheme for the ECMWF model, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2018, 10, DOI: 10.1029/2018MS001364.
- Iacono M.J., Delamere J.S., Mlawer E.J. et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, vol. 113, iss. D13, DOI: 10.1029/2008JD009944.
- Inness A., Ades M., Agustí-Panareda A. et al. The CAMS reanalysis of atmospheric composition, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, vol. 19(6), DOI: 10.5194/acp-19-3515-2019.
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: Synthesis Report*, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, R.K. Pachauri, A. Reisinger (eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, 104 p.
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p., DOI: 10.1017/CBO9781107415324.
- IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor et al. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 p., DOI: 10.1017/9781009325844.
- Klimat Moskvy v usloviyakh global'nogo potepeniya [The climate of Moscow in the context of global warming], A.V. Kislov (eds.), L.I. Alekseeva, M.I. Varentsov, E.V. Gorbarenko et al., Moscow, Moscow University Press, 2017, 288 p. (In Russian)
- Myhre G., Aas W., Cherian R. et al. Multi-model simulations of aerosol and ozone radiative forcing due to anthropogenic emission changes during the period 1990–2015, *Atmos. Chem. Phys.*, 2017, vol. 17, p. 2709–2720, DOI: 10.5194/acp-17-2709-2017.
- Ohneiser K., Ansmann A., Witthuhn J. et al. Self-lifting of wildfire smoke in the troposphere and stratosphere: simulations and space lidar observations, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 23, p. 2901–2925, DOI: 10.5194/acp-23-2901-2023.
- Plahina I.N., Mahotkina E.L. Aerazol'no-radiatsionnyj forsirovaniye v atmosfere. Obzor sovremennykh dannyyh [Aerosol-radiation forcing in the atmosphere. Overview of current data], *Proceedings of the Russian state hydrometeorological university*, 2008, no. 6, p. 20–37. (In Russian)
- Prša A., Harmanec P., Torres G. et al. Nominal Values for Selected Solar and Planetary Quantities: IAU 2015 Resolution B3, *Astron. J.*, 2016, 152:41, DOI: 10.3847/0004-6256/152/2/41.
- Rémy S., Kipling Z., Flemming J. et al. Description and evaluation of the tropospheric aerosol scheme in the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Integrated Forecasting System (IFS-AER, cycle 45R1), *Geosci. Model Dev.*, 2019, vol. 12, p. 4627–4659, DOI: 10.5194/gmd-12-4627-2019.
- Ren T., Ping Y., Jian W. et al. Performance of Cloud 3D Solvers in Ice Cloud Shortwave Radiation Closure Over the Equatorial Western Pacific Ocean, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2022, vol. 14(2), DOI: 10.1029/2021MS002754, 2022.
- Röttenbacher J., Ehrlich A., Müller H. et al. Evaluating the Representation of Arctic Cirrus Solar Radiative Effects in the IFS with Airborne Measurements, *EGU sphere* [preprint], 2024, DOI: 10.5194/egusphere-2024-281.
- Timofeev Yu.M., Virolainen Ya.A., Polyakov A.V. Estimates of Variations in CO₂ Radiative Forcing in the Last Century and in the Future, *Environmental Science, Physics Atmospheric and Oceanic Optics*, 2019, vol. 33(2), p. 206–209, DOI: 10.1134/S1024856020020141.
- Timofeev Yu.M., Vasil'ev A.V. *Teoreticheskie osnovy atmosferno-optiki* [Theoretical basics of the atmospheric optics], St Petersburg, Nauka Publ., 2003, p. 474. (In Russian)
- Volodin E.M., Kostykin S.V. The aerosol module in the INM RAS climate model., *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, vol. 41, no. 8, p. 519–528, DOI: 10.3103/s106837391608001x.

Web sources

- The Montreal Protocol, URL: <https://www.undp.org/chemicals-waste/montreal-protocol> (date of access 10.05.2023).
- AERONET Data Synergy Tool, URL: https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/bamgomax_interactive (date of access 10.05.2023).
- ECMWF Radiation Scheme Home, URL: <https://confluence.ecmwf.int/display/ECRAD> (date of access 15.05.2023).
- Section 2.1.5.7 Aerosols and Greenhouse Gases, URL: <https://confluence.ecmwf.int/display/FUG/Section+2.1.5.7+Aerosols+and+Greenhouse+Gases> (date of access 15.05.2023).

Received 23.08.2024

Revised 10.09.2024

Accepted 15.10.2024

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 911.7:339.924

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ РАЗЛИЧИЯ ГЛУБИНЫ ИНТЕГРАЦИИ ОБЩИХ РЫНКОВ

Н.М. Хасая¹, Е.А. Гречко²

^{1,2} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра географии мирового хозяйства*

¹ *Магистр; e-mail: nikolai.khasaya@gmail.com*

² *Доц., канд. геогр. наук; e-mail: grechko-gmh@yandex.ru*

Интеграционные объединения разного уровня активно развиваются во всех регионах мира. Центральное место среди них занимают восемь общих рынков – Европейское экономическое пространство (ЕЭП), Евразийский экономический союз (ЕАЭС), Совет сотрудничества арабских государств Персидского залива (ССАГПЗ), Восточноафриканское сообщество (ВАС), Центральноеафриканское валютно-экономическое сообщество (ЦАВЭС), общий рынок стран Южной Америки (МЕРКОСУР), Центральноамериканский общий рынок (ЦАОР) и общий рынок Карибского сообщества (КАРИКОМ). Это интеграционные объединения, основанные на свободной торговле и свободном обмене всеми факторами производства. Целью исследования стало выявление географических различий глубины интеграции общих рынков мира. Глубина интеграции исследуется количественно при помощи разработанного авторами индекса глубины интеграции, в основу которого положен принцип единства подходов к оценке интеграции по четырем свободам: движения товаров, услуг, людей и капитала, представленных в агрегированном индексе двумя показателями – открытостью (отношением потоков внутри общего рынка по одному из показателей к размерам страны) и значимостью (долей потоков внутри общего рынка во всех внешних потоках). Такой подход позволяет оценить участие страны как в региональном, так и в международном движении факторов производства. В результате исследования выявлено, что образованные по схожим принципам общие рынки существенно отличаются по глубине интеграции. В отличие от развитого европейского общего рынка участники азиатских, африканских и латиноамериканских общих рынков характеризуются значительно более интенсивным обменом факторов производства с третьими странами, чем друг с другом; этому способствуют региональные особенности процессов международной экономической интеграции. К числу общих рынков с высоким уровнем интеграции можно отнести только ЕЭП; в ЕАЭС, ЦАОР, КАРИКОМ и ВАС – низкий уровень интеграции; в ССАГПЗ, МЕРКОСУР и ЦАВЭС – очень низкий. В ЕЭП и КАРИКОМ существует множество центров диффузии интеграционных процессов; в ЦАОР, ВАС, ССАГПЗ и МЕРКОСУР – один главный центр и один субцентр; в ЕАЭС – один суперцентр. В большинстве случаев уровень интеграции центра один из самых низких в пределах общего рынка.

Ключевые слова: международная торговля товарами и услугами, прямые иностранные инвестиции, международная миграция, международная экономическая интеграция

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.3

ВВЕДЕНИЕ

Во второй половине XX в. усиление процессов международной экономической интеграции качественно изменило экономические и политические отношения, трансформируя территориальную структуру хозяйства и отражая общие закономерности развития мирохозяйственной системы. В зависимости от особенностей отдельных государств и территорий эти процессы приводят к разным формам интеграции, определяя дальнейшее развитие стран. Изучение межгосударственной интеграции

востребовано, поскольку интеграционными процессами охвачены практически все страны мира, вне зависимости от их уровня развития или географического положения.

Вместе с началом процесса активного взаимопроникновения европейских национальных хозяйств в конце 1940-х гг. возник термин «международная экономическая интеграция», а с 1950–1960-х гг. появились различные теории, которые строились в основном на опыте развивающегося западноевропейского объединения. При этом пони-

мание механизма интеграции, ее целей и субъектов различно. Представители *неолиберальной школы* (М. Алле, Б. Балашша, Дж. Вайнер, М. Бийе) полагали, что основой интеграции является торговля, механизм которой должен сочетать наднациональное и рыночное регулирование [Balassa, 1961; Viner, 1950]. Основоположителем многих современных положений теории интеграции является Б. Балашша, рассматривавший ее в динамике и как результат, и как процесс. Согласно сторонникам *функционального подхода* (Д. Митрани, Э. Хаас, Л. Линдберг, А. Этциони), механизм интеграции должен быть деполитизированным, ведь конечной идеей является создание единого государства, главным субъектом и управляющим элементом которого должны стать ТНК [Etzioni, 1956; Mitrany, 1934].

Советские ученые также исследовали интеграционные процессы на опыте стран Западной Европы. Главным центром изучения международной экономической интеграции стал ИМЭМО РАН, где в 1950-е гг. появилась, а к 1970-м гг. окончательно сформировалась *отечественная школа* интеграции (М.М. Максимова, Ю.В. Шишков, В.С. Паньков, Л.И. Глухарев). Отдельного внимания заслуживают исследования интеграционных процессов на постсоветском пространстве (Л.Б. Вардомский). В прорывных в научном отношении публикациях были не только сформулированы объективные основы, причины и сущность интеграции [Макимова, 1971], но также введено понятие «интеграционной зрелости» стран [Шишков, 2003] и определено соотношение интеграции, интернационализации и глобализации мирового хозяйства [Глобализация..., 2004].

Центробежные процессы в Европейском союзе (ЕС) привели к появлению новых концепций интеграции, а представление о ее развитии как о движении от одного кризиса к другому стало «мейнстримом» [Моисеева, 2022]. Сторонники *интергouverнменталистского подхода* (А. Милворд, С. Хоффман, А. Моравчик) делают акцент на ключевой роли национальных государств и правительств [Moravcsik, 2013], считая, что интеграция будет продолжаться при условии, что ее положительные эффекты затронут все страны-участницы, даже несмотря на неравномерность их распределения по странам [Milward, 1992]. Представители *постфункционального течения* (Л. Хукс, Г. Маркс, Б. Колер-Кох) трактуют интеграцию как процесс, который вышел за рамки исключительно экономического измерения и потому должен происходить одновременно на наднациональном, национальном и региональном уровнях и опираться на общую культуру и идентичность с учетом общественного мнения [Hooghe, Marks, 2009].

Исследования интеграции проводятся и в отношении измерения уровня экономической интеграции с использованием комплексных эконометрических и гравитационных моделей, чему посвящено немало публикаций [Arribas et al., 2006; Dalimov, 2010]. В последнее десятилетие также существенно усложнились и методы оценки глубины интеграционных процессов на постсоветском пространстве [Оценка интеграционных..., 2021]. Однако можно отметить недостаток комплексности таких исследований, в частности, те из них, которые носят географический характер, зачастую посвящены лишь отдельным странам, чего в современных условиях явно недостаточно [Обуховский, 2007].

Процесс международной интеграции является многоуровневым и проходит в несколько стадий, среди которых, как правило, выделяют пять: преференциальная зона, зона свободной торговли, таможенный союз, общий рынок, экономический союз. Общий рынок является четвертой стадией интеграции и предполагает отмену ограничений в торговле между странами-участницами и свободный обмен всеми факторами производства. Наднациональные структуры – парламент, совет министров, межгосударственный суд, антимонопольные органы, центральный банк – отвечают не только за политику внутри блока, но и за применение защитных мер по отношению к товарам и факторам производства из третьих стран [Шкваря, 2006].

В настоящий момент функционирует восемь общих рынков: Европейское экономическое пространство (ЕЭП), Евразийский экономический союз (ЕАЭС), Совет сотрудничества арабских государств Персидского залива (ССГАПЗ), Восточноафриканское сообщество (ВАС), Центральноафриканское валютно-экономическое сообщество (ЦАВЭС), общий рынок стран Южной Америки (МЕРКОСУР), Центральноамериканский общий рынок (ЦАОР) и общий рынок Карибского сообщества (КАРИКОМ). Они занимают около трети территории, на которой проживает пятая часть населения мира, аккумулируя при этом более трети мирового валового продукта.

Общий рынок, как форма международной экономической интеграции, является стратегической целью большинства существующих интеграционных объединений и наиболее вероятной заключительной ступенью их интеграции. Тем не менее общие рынки различаются между собой в силу внутренних и внешних факторов, имеют свои географические, экономические и политические особенности. Дальнейшая интеграция требует новых вложений, и во многих общих рынках усиливаются диспаритет и центробежные процессы. В этих условиях анализ глубины интеграции отдельных национальных хо-

зайств в общие рынки, а общих рынков – в мировую экономику представляет особый интерес.

Целью данного исследования стало выявление географических различий глубины интеграции общих рынков мира. Гипотеза: формально схожие интеграционные процессы между странами-членами общих рынков в действительности разнонаправлены и отличаются по глубине. Эти различия обусловлены рядом факторов, в первую очередь характеризующих особенности национальных хозяйств, в связи с чем для проверки гипотезы могут быть эффективно использованы количественные методы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для количественной оценки глубины интеграции общих рынков предлагается специально составленный для этих целей *индекс глубины интеграции*,

основополагающим принципом которого является единство подходов к оценке интеграции по каждой из четырех свобод: свобод движения товаров, услуг, людей и капитала, каждая их которых в агрегированном индексе представлена двумя показателями – открытостью и значимостью [Хасая, Гречко, 2022] (рис. 1). *Открытость* представляет собой отношение потоков внутри общего рынка по одному из показателей к размерам страны, в качестве которых выступают ВВП или численность населения, а *значимость* отражает долю потоков внутри общего рынка во всех внешних потоках. Такой подход позволяет оценить участие страны как в региональном, так и в международном движении факторов производства, а совместный анализ открытости и значимости дает возможность объективно оценить процессы взаимопроникновения национальных хозяйств [König, Ohr, 2013].

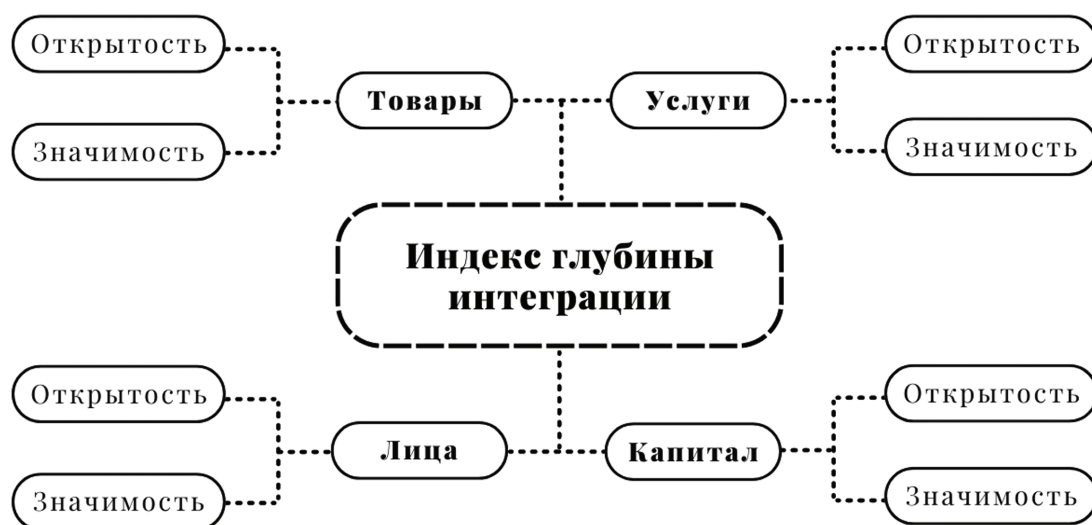


Рис. 1. Общая схема составления индекса глубины интеграции

Fig. 1. General scheme for compiling the integration depth index

Методика расчета индекса состоит из четырех шагов.

Первый шаг – сбор первичной информации и расчет показателей для каждой из исследуемых стран (табл. 1). Для этого были использованы базы данных Всемирного банка [GDP..., 2019], Всемирной торговой организации [WTO..., 2019], Департамента по экономическим и социальным вопросам ООН [Data Portal..., 2019; International Migrant..., 2019], Международного торгового центра [Investment..., 2019] и Обсерватории экономической сложности [The Trade..., 2019]; в отдельных случаях – данные национальных статистических служб и экспертные оценки.

Второй шаг – минимаксная нормализация¹, позволяющая выразить отклонения системы раз-

нородных показателей и корректно сопоставить данные между собой. Для дальнейшей работы с показателями все значения были заключены между 0 и 1 по формуле [Тикунов, 1997]:

$$\hat{y} = \frac{y - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}},$$

где $\hat{y}$ – нормированное значение показателя для страны, y – исходное значение показателя для страны, $y_{\min}$ – минимальное значение показателя, $y_{\max}$ – максимальное значение показателя.

ны на основании анализа распределения вторичных показателей: из выборки предварительно исключены значения, выходящие за пределы 1,5 межквартильных размахов ($Q_3 - Q_1$), число которых не превысило допустимое для нормального распределения. Существование подобных аномальных значений связано с офшорными экономиками и странами-реэкспортерами.

¹ Минимальные и максимальные значения были установле-

Таблица 1

Подготовка показателей для индекса глубины интеграции

Рынок	Открытость	Значимость	Расчетные показатели
Товаров	$I_g^o = \frac{x^{int} + m^{int}}{GDP} 100\%$	$I_g^i = \frac{x^{int} + m^{int}}{x^{all} + m^{all}} 100\%$	x^{int} – экспорт товаров в страны общего рынка; m^{int} – импорт товаров из стран общего рынка; x^{all} – экспорт товаров; m^{all} – импорт товаров; GDP – ВВП
Услуг	$I_s^o = \frac{X^{int} + M^{int}}{GDP} 100\%$	$I_s^i = \frac{X^{int} + M^{int}}{X^{all} + M^{all}} 100\%$	X^{int} – экспорт услуг в страны общего рынка; M^{int} – импорт услуг из стран общего рынка; X^{all} – экспорт услуг; M^{all} – импорт услуг; GDP – ВВП
Капитала	$I_c^o = \frac{f^{int}}{GDP} 100\%$	$I_c^i = \frac{f^{int}}{f^{all}} 100\%$	f^{int} – накопленные ПИИ из стран общего рынка; f^{all} – накопленные ПИИ; GDP – ВВП
Труда	$I_l^o = \frac{P^{int}}{P^{all}} 100\%$	$I_l^i = \frac{P^{int}}{P^{for}} 100\%$	P^{int} – численность иностранного населения с гражданством стран общего рынка; P^{for} – численность иностранного населения; P^{all} – численность населения

Предположение о том, что значимость и открытость каждой из свобод могут иметь разный вклад в общий уровень интеграции, не подтвердилось. Веса² показателей, рассчитанные двумя способами – с помощью коэффициента относительного разброса и факторного анализа – очень слабо различаются. С учетом этого и равнозначного позиционирования каждой из четырех свобод, весами для дальнейших расчетов можно пренебречь.

Третий шаг – агрегация данных. Расчет уровня интеграции для каждой из свобод проводился на основе среднего арифметического³ (табл. 2), что позволило сохранить диапазон значений от 0 до 1, где 0 – минимальный уровень интеграции, 1 – максимальный.

Четвертый шаг – классификация, необходимая для дальнейшего сравнения глубины интеграции. На основе значений показателей стран – членов разных общих рынков были выделены единые для всех свобод уровни интеграции (табл. 3) с сопоставимым количеством наблюдений [Тикунов, 1997].

Такой подход позволяет оценить участие страны как в региональном, так и в международном движе-

нии факторов производства, а совместный анализ открытости и значимости дает возможность объективно оценить процессы взаимопроникновения национальных хозяйств. При этом появляется возможность детально рассмотреть и интеграцию по отдельным свободам.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Интеграция рынков товаров. Несмотря на то что интеграция рынков товаров является одной из базовых и легкодостижимых целей процессов взаимопроникновения национальных хозяйств, только ЕЭП характеризуется высоким значением субиндекса по этой свободе, что достигается благодаря как экспортно-ориентированным, так и импорто-зависимым экономикам. Притом что все страны этого блока обладают схожей глубиной интеграции по рынку товаров, наиболее высокими значениями отличаются «новые члены» ЕЭП за счет вынужденной зависимости от европейских товаров и слабого доступа своих товаров на мировой рынок.

Крайне похожи модели взаимопроникновения рынков товаров у ЕАЭС и МЕРКОСУР – в обоих блоках с небольшим количеством стран выделяется «суперядро» – *Россия и Бразилия* соответственно⁴. Эти

² Рассчитанные предварительно показатели подтверждают возможность использования данных. Мера адекватности выборки Кайзера–Мейера–Олкина $> 0,5$ и p -значение $< 0,05$.

³ Несмотря на то что среднее геометрическое дает возможность учесть существенные различия между отдельными показателями, его применение в данном случае ограничено из-за несопоставимо большей глубины интеграции в ЕЭП по сравнению с другими общими рынками.

⁴ Говоря о «суперядре» интеграционных процессов, мы подразумеваем диффузию этих процессов, которая обеспечивается в первую очередь политическим весом страны в соответствующем макрорегионе, поскольку экономическое развитие «суперядра» в меньшей степени зависит от результатов функционирования

Таблица 2

Расчет индекса глубины интеграции и его субиндексов

Индекс	Формула для расчета	Показатели
Субиндексы (интеграция по отдельным свободам)	$I_{g,s,l,c} = \frac{I^o + I^i}{2}$	I^g – интеграция рынка товаров; I^s – интеграция рынка услуг; I^l – интеграция рынка труда; I^c – интеграция рынка капитала;
Индекс глубины интеграции	$I = \frac{I_g + I_s + I_l + I_c}{4}$	I^o – открытость; I^i – значимость; I – индекс глубины интеграции

Таблица 3

Шкала индекса глубины интеграции и его субиндексов

Уровень интеграции	Очень высокий	Высокий	Средний	Низкий	Очень низкий
Значения индекса и его субиндексов	$\geq 0,7$	0,5–0,7	0,2–0,5	0,1–0,2	$< 0,1$

страны аккумулируют почти весь валовый продукт и экономический потенциал своих объединений, поэтому остальные страны находятся в зависимом положении и ведут крайне активный товарооборот с «суперядром», а не между собой. Крупнейшие экономики отличаются крайне низкими значениями субиндекса, из-за чего возникает парадоксальная ситуация: «суперядра» – *Россия и Бразилия* – характеризуются наименьшей степенью интеграции в рынки товаров своих объединений, поскольку их заинтересованность носит прежде всего политический характер [Гусаков, Андропова, 2015].

Иначе выстроена интеграция рынков товаров в ССАГПЗ, ЦАОР и КАРИКОМ, где ярко выражена схожая проблема. Участники этих блоков отличаются однотипностью, а нередко и монокультурностью национальных экономик и практически не торгуют внутри блока, будучи зависимыми от экспорта в развитые страны (ССАГПЗ – полезных ископаемых, ЦАОР – продовольственных культур). При отсутствии «суперядра» это приводит к несущественным различиям между странами по взаимопроникновению рынков товаров, причем крупнейшие национальные хозяйства своих блоков – *Саудовская Аравия, Гватемала и Тринидад и Тобаго* соответственно – занимают промежуточное положение по глубине интеграции.

ВАС и ЦАВЭС – объединения с самым низким уровнем интеграции по свободе движения товаров. Большая часть стран – членов этих блоков относится к числу наименее развитых по классификации ООН. Более «гомогенное» ВАС, продолжившее свое расширение по инициативе «снизу», рования интеграционного объединения (если не рассматривать политические цели создания и развития блока, которые, как правило, не декларируются открыто).

достигло несколько больших успехов, и страны в целом торгуют между собой на одном уровне. ЦАВЭС же объединяет конфликтующие христианские и мусульманские страны, в некоторых из которых в настоящий момент продолжается гражданская война, и значения субиндекса в ряде случаев достигают нулевых значений; из-за чего выделение лидеров и аутсайдеров статистически некорректно.

Интеграция рынков услуг и рынков капитала. Рынки услуг и капитала целесообразно рассмотреть вместе, поскольку большая часть третичного сектора приходится на финансовые услуги, а степень корреляции между значениями индекса интеграции по рынкам услуг и рынкам капитала весьма высока. Свободы движения услуг и капитала отличаются наиболее низкими значениями среди других свобод, хотя внутри блоков они достаточно однородны.

ЕЭП – единственный блок, достигающий высокого уровня интеграции рынков услуг и рынков капитала, со значительным превосходством над другими группировками, что обеспечивается двумя противоположными тенденциями: максимальных значений субиндекса достигают восточноевропейские страны – за счет значимости, а страны Западной Европы, будучи более инвестиционно привлекательными, – за счет открытости. Лидерами по интеграции в единые рынки услуг и капитала ЕЭП являются сильно зависимые от общего рынка *Эстония, Литва, Чехия, Словакия, Словения и Хорватия*. Высокие показатели открытости и интеграции характерны для «налоговых гаваней» – *Ирландии, Бельгии, Нидерландов, Люксембурга и Мальты*, а самые низкие значения субиндекса в регионе имеют *Германия, Испания, Италия и Франция*.

ЕАЭС и МЕРКОСУР, так же как и по рынку товаров, отличаются крайне низкими значениями субиндексов из-за «суперядер» – *Россия* и *Бразилия* являются практически единственными инвесторами внутри своих объединений. При этом почти весь приток инвестиций в эти страны аккумулируется извне региона, что существенно снижает уровень интеграции по свободам движения услуг и капитала. В то время как в *России* и *Бразилии* доля накопленных ПИИ из стран блока держится на уровне 1%, в *Беларуси*, *Армении* и *Парагвае* данный показатель превышает 20%, что связано исключительно с их зависимостью от «суперядра».

В ССАГПЗ, ЦАОР и КАРИКОМ, при сохранении тенденции к относительно равномерному распределению показателей по рынкам услуг и менее равномерному по рынкам капитала, выделение лидеров и аутсайдеров неоднозначно в силу закрытости некоторых статистических данных. Однако объединяет эти блоки очень низкий уровень интеграции по свободе движения услуг и низкий – по свободе движения капитала при крайне близких средних и медианных значениях. Лидерами по глубине интеграции в контексте этих свобод выступают: в ССАГПЗ – *Бахрейн*, в ЦАОР – *Сальвадор* и в КАРИКОМ – *Сент-Люсия* и *Барбадос*. Все эти страны можно с разной степенью условности отнести к числу «налоговых гаваней», что и объясняет их ведущие позиции.

Наконец, в конце рейтинга интеграционных объединений находятся ВАС и ЦАВЭС. В этих блоках все страны отличаются очень низким уровнем интеграции по взаимопроникновению рынков услуг и капитала. Это связано и со слабым развитием интеграционных процессов, и самих стран, где торговля услугами и инвестирование крайне затруднены и наблюдается «бегство капитала» [Otieno et al., 2021].

Интеграция рынков труда. Совершенно другие тренды определяют степень взаимопроникновения рынков труда, значения субиндекса для которых наиболее высоки и неоднородны. Из-за этого на лидирующие позиции в этом отношении выходят другие блоки и субрегионы.

Так, для ЕЭП высокий уровень интеграции рынков труда обеспечивает исключительно Западная Европа, что связано с «наложением» эффектов региональной и международной миграции. Внутри ЕЭП четко прослеживается трудовая миграция из «новых» членов ЕС в более развитые страны региона, и дополнительно усиливает разрыв в глубине интеграции международная миграция, но уже за счет показателя открытости – практически все трудовые мигранты из других регионов мира сосредоточены в границах ЕС-15 [Трофимова, 2017]. Так, абсолютными лидерами выступают *Люксембург*, *Бельгия*

и *Швейцария*, характер развития внешнеэкономического сектора которых делает их зависимыми от трудовых ресурсов соседних стран, а большая часть приехавших иностранцев являются гражданами ЕЭП, за счет чего достигаются высокие показатели и значимости, и открытости. Аутсайдерами являются *Польша*, *Чехия*, *Болгария*, *Румыния* и *Греция*.

Второе место по глубине интеграции рынков труда в силу исторических причин занимает ЕАЭС со средними значениями субиндекса. Здесь лидером выступает *Казахстан*, который не только является главным центром притяжения мигрантов в пределах Центральной Азии [Письменная и др., 2014], но и принимает значительные потоки из «суперядра», достигая высокого уровня интеграции по этой свободе. *Россия* является одним из четырех главных в мире центров притяжения мигрантов, большинство из которых приезжает из бывших республик СССР, не обязательно ЕАЭС, поэтому показатели значимости несколько снижаются, и «суперядро» характеризуется средним уровнем интеграции.

Кроме ЕАЭС, средним уровнем интеграции характеризуются и африканские группировки – в ряде стран ВАС и ЦАВЭС большинство иностранного населения представлено гражданами стран – участников соответствующих блоков. Однако такая картина не имеет ничего общего с фактическим положением дел или углублением интеграции в регионе; в действительности большинство мигрантов являются беженцами из стран, где продолжаются конфликты, и поэтому такие значения связаны исключительно с формальным статистическим подходом. Так, в *Уганде* и *Камеруне*, где более 50% всего иностранного населения приходится на граждан *Южного Судана* и *ЦАР* соответственно, лидерство в своих блоках обеспечивается близостью к наименее благополучным участникам общих рынков.

Латиноамериканские объединения – МЕРКОСУР, ЦАОР и КАРИКОМ – характеризуются близкими значениями на границе среднего и низкого уровней интеграции, но внутри самих блоков сохраняются сильные различия между странами при относительно успешной реализации свободы движения людей. Лидерами в этих блоках оказываются страны, которые нельзя отнести ни к числу наиболее развитых, ни к числу крупнейших – *Парагвай*, *Белиз*, *Антигуа* и *Барбуда* соответственно. Наименее интегрированными оказываются: в МЕРКОСУР – «суперядро» *Бразилия*, в ЦАОР – «новый член» *Доминиканская Республика* и в КАРИКОМ – *Белиз*, который, одновременно входя в состав двух общих рынков, значительно более интегрирован в ЦАОР.

Абсолютным аутсайдером по интеграции рынка труда выступает ССАГПЗ со значениями, близкими к нулю. Несмотря на то что в ССАГПЗ

институционально создана полная свобода передвижения и граждане разных стран блока равны в своих правах на трудоустройство, образование и владение недвижимостью [Babar, 2011], миграция из одной арабской страны в другую практиче-

ски не наблюдается, т. к. в силу схожих условий в странах блока в изменении постоянного места жительства нет необходимости и доля «внутри-блоковых» иностранцев для стран ССАГПЗ не превышает 1%.

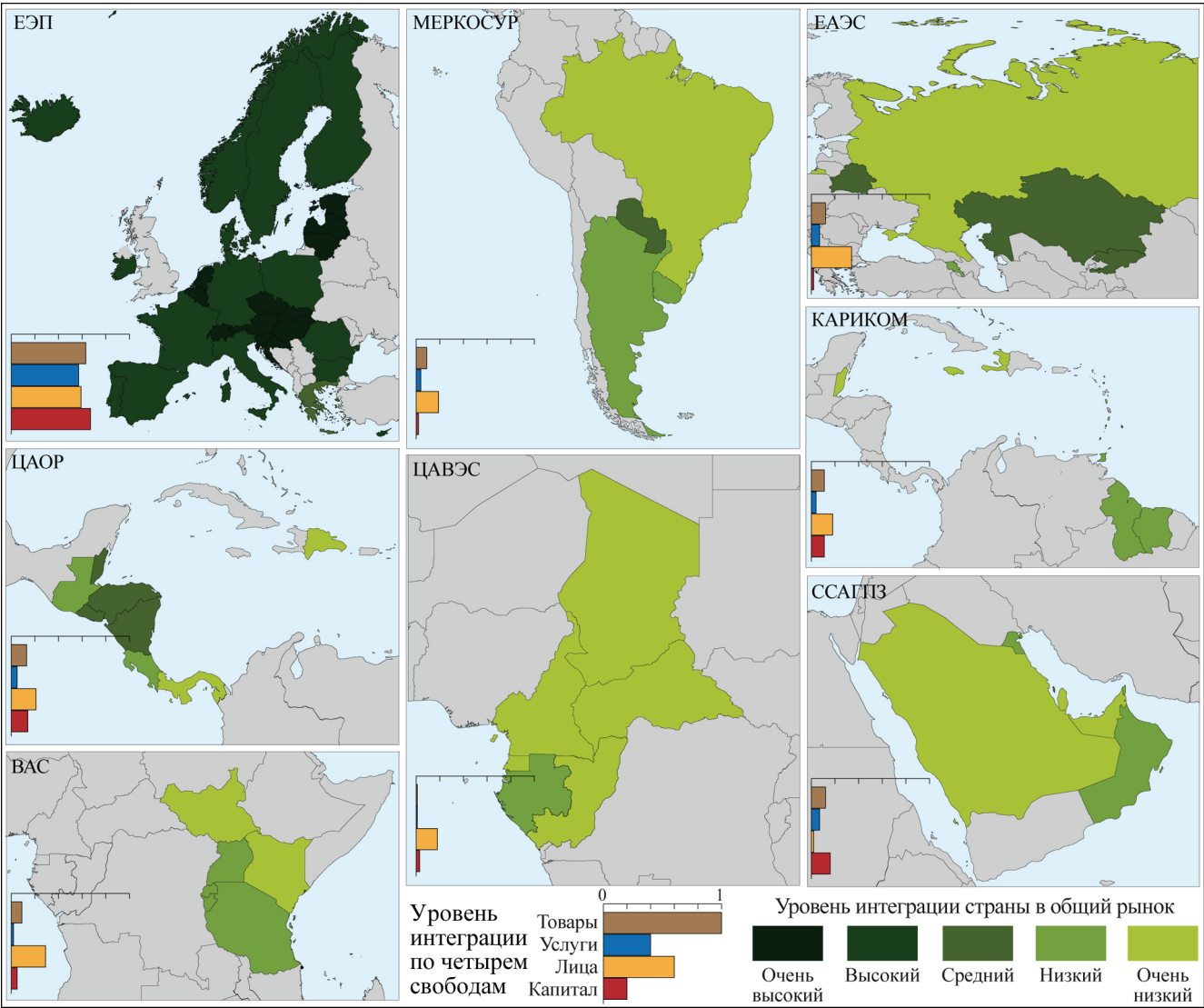


Рис. 2. Глубина интеграции общих рынков мира
Fig. 2. The depth of integration of the world's common markets

Глубина интеграции общих рынков мира. Различия между общими рынками по свободам движения товаров, услуг, людей и капитала подтверждают тезис о том, что в действительности процессы интеграции в этих объединениях разнонаправлены и отличаются по глубине (рис. 2) и другим характеристикам (табл. 4).
ЕЭП является безусловным лидером по глубине интеграции. Все остальные общие рынки, несмотря на формально осуществленное устранение многих барьеров в движении факторов производства, находятся на границе низкого и очень низкого уровней

интеграции и характеризуются крайне высокой пространственной неоднородностью⁵ процессов взаимопроникновения национальных хозяйств (см. табл. 4).
ЦАОР, КАРИКОМ, ВАС и ЦАВЭС достигают незначительного уровня интеграции, в первую очередь благодаря значениям по свободе движения людей, и в последнюю – из-за значений по свободам движения товаров или услуг. При этом именно внутриблоковая торговля является важным индикатором того, что интеграционные процессы в регионе

⁵ Степень неоднородности определялась на основании значений коэффициента вариации (см. табл. 4).

не носят условный характер. Главной и общей проблемой в этих объединениях становится недостаточный уровень развития и однотипность экономик.

Отдельно отметим ССАГПЗ, где, несмотря на схожие трудности, из-за особенностей управления сложилась особая ситуация и рынком с максимальной глубиной интеграции является рынок капитала, а с минимальной – рынок труда. В ЕАЭС и МЕРКОСУР, похожих по многим показателям, главным препятствием на пути к полноценной интеграции является наличие «суперядер» на политической, а не экономической воле которых фактически строятся современные интеграционные процессы. Это подтверждается и тем, что на последнем месте в этих блоках стоит рынок капитала, который в ЕЭП выходит на первое место.

ЕАЭС и МЕРКОСУР являются наиболее ярким примером «парадокса ядра», однако он в той или иной степени свойственен большинству общих рынков. Суть этого явления заключается в том, что страна, обеспечивающая интеграцию в регионе, обычно отличается наименьшим уровнем интеграции в общем рынке [Rajagopal, 2007], поскольку лидирующие страны блоков оказываются менее заинтересованными в развитии торговли со странами своей Периферии и предпочитают более экономически выгодный обмен факторами производства с развитыми странами за пределами общего рынка.

Таким образом, общие рынки мира в значительной степени отличаются между собой по тому, на-

сколько в них в действительности осуществляются свободы движения товаров, услуг, людей и капитала и насколько важны для стран – членов общих рынков эти свободы. Следовательно, процессы интеграции в общих рынках отличаются по глубине и разнонаправлены, что обусловлено в том числе региональными особенностями международной экономической интеграции.

ВЫВОДЫ

Авторский индекс глубины интеграции, основанный на расчете открытости и значимости по свободам движения товаров, услуг, людей и капитала, может быть эффективно использован для детального анализа географических различий интеграционных процессов общих рынков мира.

Образованные по схожим принципам общие рынки существенно отличаются по глубине интеграции. К числу общих рынков с высоким уровнем интеграции можно отнести только ЕЭП; в ЕАЭС, ЦАОР, КАРИКОМ и ВАС – низкий уровень интеграции; в ССАГПЗ, МЕРКОСУР и ЦАВЭС – очень низкий.

Наименьшие различия между общими рынками наблюдаются по интеграции рынков труда, но внутри объединений значения показателей по этой свободе, напротив, наиболее неоднородны. При этом большинство объединений достигают своего уровня интеграции, в первую очередь именно из-за рынков труда.

Таблица 4

Сравнение общих рынков мира

Общие рынки	Значение индекса	Глубина интеграции		Однородность интеграции		«Ядра интеграции»*
		max	min	по свободам	по странам	
ЕЭП	0,62	Рынок капитала	Рынок услуг	Высокая	Средняя	–
ЕАЭС	0,14	Рынок труда	Рынок капитала	Крайне низкая	Низкая	Россия
ЦАОР	0,13	Рынок труда	Рынок услуг	Низкая	Низкая	Панама, Коста-Рика
ВАС	0,11	Рынок труда	Рынок услуг	Крайне низкая	Средняя	Кения, Уганда
КАРИКОМ	0,11	Рынок труда	Рынок услуг	Низкая	Низкая	Тринидад и Табаго, Ямайка
ССАГПЗ	0,09	Рынок капитала	Рынок труда	Низкая	Низкая	С. Аравия, ОАЭ
МЕРКОСУР	0,08	Рынок труда	Рынок капитала	Крайне низкая	Низкая	Бразилия, Аргентина
ЦАВЭС	0,06	Рынок труда	Рынок товаров	Крайне низкая	Низкая	–

Примечание. * Страны, на которые приходится более 50% от внутриблоковых потоков для нескольких участников рынка.

Несмотря на свое значение, рынки товаров, услуг и капитала вносят наименьший вклад в итоговое значение индекса глубины интеграции. Во многих случаях это связано со сложностью либерализации третичного сектора и искажениями статистики офшорными зонами.

В настоящий момент в ЕЭП и КАРИКОМ существует множество центров диффузии интеграционных процессов; в ЦАОР, ВАС, ССАГПЗ и МЕРКОСУР – один главный центр и один субцентр; в ЕАЭС – один суперцентр. В большинстве случаев уровень интеграции центра один из самых низких в пределах общего рынка.

Интеграционные процессы во многих регионах приносят больше политических, чем экономических преимуществ. Страны, обеспечивающие интеграцию в общих рынках, обычно не заинтересованы в торговле со странами своей Периферии и поэтому отличаются наименьшим уровнем интеграции.

В отличие от развитого европейского общего рынка, участники азиатских, африканских и латиноамериканских общих рынков характеризуются значительно более интенсивным обменом факторов производства с третьими странами, чем друг с другом; этому способствуют региональные особенности процессов международной экономической интеграции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Глобализация экономики и внешнеэкономические связи России / И.П. Фаминский и др. М.: Республика, 2004. 444 с.
- Гусаков Н.П., Андропова И.В. Перспективы развития Евразийского экономического союза в контексте внешнеэкономической безопасности Российской Федерации // Вестник Российского ун-та дружбы народов. Серия: Экономика. 2015. № 1. С. 47–56.
- Максимова М.М. Основные проблемы империалистической интеграции: экономический аспект. М.: Мысль, 1971. 359 с.
- Моисеева Д.Э. Теории европейской интеграции в поисках объяснения дезинтеграции // Анализ и прогноз. Журнал ИМЭМО РАН. 2022. № 3. С. 37–44. DOI: 10.20542/afij-2022-3-37-44.
- Обуховский В.В. Теории международной экономической интеграции // Экономика XXI века. 2007. № 1. С. 27–45.
- Оценка интеграционных процессов ЕАЭС в сфере торговли. М.: Издательский дом Высшей школы экономики, 2021. 253 с.
- Письменная Е.Е., Рязанцев С.В., Тикунов В.С. Географические особенности трудовой миграции в контексте евразийской интеграции // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2014. № 5. С. 42–52.
- Тикунов В.С. Классификации в географии. М.: Смоленск: Изд-во СГУ, 1997. 367 с.
- Трофимова О.Е. Миграционные процессы в Евросоюзе: новые вызовы и риски // Вестник Ин-та экономики РАН. 2017. № 5. С. 132–145.
- Хасая Н.М., Гречко Е.А. Оценка глубины межгосударственной интеграции в рамках Европейского единого рынка // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2022. № 28. С. 240–254. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-240-254.
- Шишков Ю.В. Интеграционная зрелость – непереносимое условие сращивания национальных экономик. Россия и СНГ в новейших европейских интеграционных процессах (Москва, 17–18 октября 2002 г.): сб. материалов международной научной конференции. М.: ИМЭМО РАН, 2003. 448 с.
- Шкваря Л.В. Экономическая интеграция в условиях глобализации мировой экономики: трансформация форм и теорий. М.: Компания Спутник+, 2006. 92 с.
- Balassa B. *The Theory of Economic Integration*, London, George Allen & Unwin Ltd, 1961, 316 p., DOI: 10.2307/1055477.
- Dalimov R. *Dynamics of International Economic Integration: Non-linear Analysis*, Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2010, 277 p.
- Etzioni A. *Political unification: a comparative study of leaders and forces*, New York, Rinehart, 1956, 346 p., DOI: 10.2307/2092795.
- Hooghe L., Marks G. A postfunctionalist theory of European integration: from permissive consensus to constraining dissensus, *British Journal of Political Science*, 2009, no. 1, p. 1–23, DOI: 10.1017/S0007123408000409.
- König J., Ohr R. Different Efforts in European Economic Integration: Implications of the EU Index, *JCMS: Journal of Common Market Studies*, 2013, no. 6, p. 1074–1090, DOI: 10.1111/jcms.12058.
- Mitrany D. *The Progress of International Government*, New Haven, Yale University Press, 1934, 176 p., DOI: 10.2307/2603955.
- Milward A.S. *The European Rescue of the Nation-State*, London, Routledge, 1992, 466 p.
- Moravcsik A. Did Balance of Power Politics Cause European Integration? Realist Theory Meets Qualitative Methods, *Security Studies*, 2013, no. 4, p. 773–790, DOI: 10.1080/09636412.2013.844511.
- Otieno S.J., Kiprop S.K., Muluvi A.S. Determinants of Capital Flight in the East African Community, *Journal of Economics and Sustainable Development*, 2021, no. 10, p. 1–9, DOI: 10.7176/JESD/12-10-01.
- Rajagopal. Dynamics of Growth in Foreign Trade in Transitional Economies: Analysis of European, Latin American, and Asian Countries, *Journal of East-West Business*, 2007, no. 4, p. 37–64, DOI: 10.1300/J097v13n04_03.
- Viner J. *The Customs Union Issue*, New York, Carnegie Endowment for International Peace, 1950, 221 p., DOI: 10.1017/S0003055400060755.

Электронные ресурсы

- Arribas I., Pérez F., Tortosa-Ausina E. Measuring International Economic Integration: Theory and Evidence of Globalization, Munich Personal RePEc Archive, URL: <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/16010/> (дата обращения 24.07.2024).

- Babar Z. Free Mobility within the Gulf Cooperation Council, CIRS Occasional Papers, 2011, URL: <https://ssrn.com/abstract=2825921> (дата обращения 12.12.2023).
- Data Portal Population Division, United Nations, URL: <https://population.un.org/dataportal/> (дата обращения 10.05.2023).
- GDP (current US\$), World Bank Open Data, URL: https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD?end=2019&name_desc=false&start=1960&year_high_desc=true (дата обращения 10.05.2023).
- International Migrant Stock 2019, United Nations, URL: <https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.devel->
- [opment.desa.pd/files/undesd_pd_2019_migrant_stock_origin_destination_dataset.xlsx](https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/undesd_pd_2019_migrant_stock_origin_destination_dataset.xlsx) (дата обращения 10.05.2023).
- Investment Map, International Trade Center, URL: <https://www.investmentmap.org/investment/time-series-by-country> (дата обращения 10.05.2023).
- The Trade Data You Need, When You Need It, The Observatory of Economic Complexity, URL: <https://oec.world/> (дата обращения 10.05.2023).
- WTO Stats, World Trade Organization, URL: <https://stats.wto.org/> (дата обращения 10.05.2023).

Поступила в редакцию 06.06.2024

После доработки 25.09.2024

Принята к публикации 15.10.2024

GEOGRAPHICAL DIFFERENCES IN THE DEPTH OF INTEGRATION OF THE WORLD'S COMMON MARKETS

N.M. Khasaya¹, E.A. Grechko²

^{1,2} *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geography of the World Economy*

¹ *Master student; e-mail: nikolai.khasaya@gmail.com*

² *Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: grechko-gmh@yandex.ru*

Integration associations of different levels are actively developing in all regions of the world. Eight common markets, namely the European Economic Area (EEA), the Eurasian Economic Union (EEU), the Cooperation Council for the Arab States of the Gulf (GCC), the East African Community (EAC), the Economic Community of Central African States (ECCAS), the Southern Common Market (MERCOSUR), the Central American Common Market (CACM) and the Caribbean Single Market and Economy (CSME) are central. These are integration associations based on free trade and free exchange of all factors of production. The purpose of the study was to identify geographic differences in the depth of integration within the world's common markets. The depth of integration is studied quantitatively using the index of integration depth developed by the authors. It is based on the principle of common approach to assessing integration across four freedoms, i. e. the movement of goods, services, people and capital, represented in the aggregate index by two indicators, namely openness (the ratio of a particular flow within the common market to the size of the country) and importance (the share of flows within the common market in all external flows). This approach allows to assess the country's participation in both regional and international movement of production factors. The study revealed that common markets formed on similar principles differ significantly in the depth of integration. In contrast to the developed European common market, participants in the Asian, African and Latin American common markets are characterized by a much more intensive exchange of production factors with third countries than with each other. This is facilitated by the regional specific features of the processes of international economic integration. Only the EEA can be classified as a common market with high level of integration; the EEU, CACM, CSME and EAC are characterised by the low level of integration; and it is very low in the GCC, MERCOSUR and ECCAS. There are many centres of diffusion of integration processes in the EEA and CSME; the CACM, EAC, GCC and MERCOSUR have one main centre and one sub-centre; and there is one supercentre in the EEU. In most cases, the centre's level of integration is one of the lowest within the market.

Keywords: international trade in goods and services, direct foreign investments, international migration, international economic integration

REFERENCES

- Balassa B. *The Theory of Economic Integration*, London, George Allen & Unwin Ltd, 1961, 316 p., DOI: 10.2307/1055477.
- Dalimov R. *Dynamics of International Economic Integration: Non-linear Analysis*, Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2010, 277 p.
- Etzioni A. *Political unification: a comparative study of leaders and forces*, New York, Rinehart, 1956, 346 p., DOI: 10.2307/2092795.
- Globalizatsiya ekonomiki i vneshneekonomicheskie svyazi Rossii* [Economic globalization and foreign economic

- relations of Russia], I.P. Faminskii et al. (avt.), Moscow, Respublika Publ., 2004, 444 p. (In Russian)
- Gusakov N.P., Andronova I.V. Perspektivy razvitiya Evraziiskogo ekonomicheskogo soyuza v kontekste vneshneekonomicheskoi bezopasnosti Rossiiskoi Federatsii [Prospects for the development of the Eurasian Economic Union in the context of external economic security of the Russian Federation], *Vestn. Rossiiskogo un-ta družby narodov. Seriya: Ekonomika*, 2015, no. 1, p. 47–56. (In Russian)
- Hooghe L., Marks G. A postfunctionalist theory of European integration: from permissive consensus to constraining dissensus, *British Journal of Political Science*, 2009, no. 1, p. 1–23, DOI: 10.1017/S0007123408000409.
- Khasaya N.M., Grechko E.A. Otsenka glubiny mezhgosudarstvennoi integratsii v ramkakh Evropeiskogo edinogo rynka [Assessment of the degree of interstate integration within the European single market], *InterCarto. InterGIS*, 2022, no. 28, p. 240–254, DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-240-254. (In Russian)
- König J., Ohr R. Different Efforts in European Economic Integration: Implications of the EU Index, *JCMS: Journal of Common Market Studies*, 2013, no. 6, p. 1074–1090, DOI: 10.1111/jcms.12058.
- Maksimova M.M. *Osnovnye problemy imperialisticheskoi integratsii: ekonomicheskii aspekt* [The main problems of imperialist integration: the economic aspect], Moscow, Mysl' Publ., 1971, 359 p. (In Russian)
- Milward A.S. *The European Rescue of the Nation-State*, London, Routledge, 1992, 466 p.
- Mitrany D. *The Progress of International Government*, New Haven, Yale University Press, 1934, 176 p., DOI: 10.2307/2603955.
- Moiseeva D.E. Teorii evropeiskoi integratsii v poiskakh ob'yasneniya dezintegratsii [European integration theories in search of an explanation for disintegration], *Analiz i prognoz. Zhurnal IMEMO RAN*, 2022, no. 3, p. 37–44, DOI: 10.20542/afij-2022-3-37-44. (In Russian)
- Moravcsik A. Did Balance of Power Politics Cause European Integration? Realist Theory Meets Qualitative Methods, *Security Studies*, 2013, no. 4, p. 773–790, DOI: 10.1080/09636412.2013.844511.
- Obukhovskii V.V. Teorii mezhdunarodnoi ekonomicheskoi integratsii [Theories of international economic integration], *Ekonomika XXI veka*, 2007, no. 1, p. 27–45. (In Russian)
- Otieno S.J., Kiprop S.K., Muluvi A.S. Determinants of Capital Flight in the East African Community, *Journal of Economics and Sustainable Development*, 2021, no. 10, p. 1–9, DOI: 10.7176/JESD/12-10-01.
- Otsenka integratsionnykh protsessov EAES v sfere torgovli: 2021 [Evaluation of the EAEU integration processes in the field of trade: 2021], M.K. Glazatova et al. (avt.), Moscow, Higher School of Economics Publ., 2021, 253 p. (In Russian)
- Pis'mennaya E.E., Ryazantsev S.V., Tikunov V.S. Geograficheskie osobennosti trudovoi migratsii v kontekste evraziiskoi integratsii [Geographical features of labor migration in the context of Eurasian integration], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2014, no. 5, p. 42–52. (In Russian)
- Rajagopal. Dynamics of Growth in Foreign Trade in Transitional Economies: Analysis of European, Latin American, and Asian Countries, *Journal of East-West Business*, 2007, no. 4, p. 37–64, DOI: DOI: 10.1300/J097v13n04_03.
- Shishkov Yu.V. [Integration maturity is an indispensable condition for the merging of national economies], *Rossiya i SNG v noveishikh evropeiskikh integratsionnykh protsessakh: sbornik materialov mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* [Russia and the CIS in the newest European integration processes: sourcebook from an international scientific conference], Moscow, Institute of World Economy and International Relations Publ., 2003, 448 p. (In Russian)
- Shkvarya L.V. *Ekonomicheskaya integratsiya v usloviyakh globalizatsii mirovoi ekonomiki: transformatsiya form i teorii* [Economic integration in the context of globalization of the world economy: transformation of forms and theories], Moscow, Kompaniya Sputnik+ Publ., 2006, 92 p. (In Russian)
- Tikunov V.S. *Klassifikatsii v geografii* [Classifications in geography], Moscow, Smolensk, Smolensk St. University Publ., 1997, 367 p. (In Russian)
- Trofimova O.E. Migratsionnye protsessy v Evrosoyuze: novye vyzovy i riski [Migration processes in the European Union: new challenges and risks], *Vestnik Instituta ekonomiki RAN*, 2017, no. 5, p. 132–145. (In Russian)
- Viner J. *The Customs Union Issue*, New York, Carnegie Endowment for International Peace, 1950, 221 p., DOI: 10.1017/S0003055400060755.
- Web sources*
- Arribas I., Pérez F., Tortosa-Ausina E. *Measuring International Economic Integration: Theory and Evidence of Globalization*, Munich Personal RePEc Archive, URL: <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/16010/> (access date 24.07.2024).
- Babar Z. *Free Mobility within the Gulf Cooperation Council*, CIRS Occasional Papers, URL: <https://ssrn.com/abstract=2825921> (access date 12.12.2023).
- Data Portal Population Division, United Nations, URL: <https://population.un.org/dataportal/> (access date 10.05.2023).
- GDP (current US\$), World Bank Open Data, URL: https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD?end=2019&name_desc=false&start=1960&year_high_desc=true (access date 10.05.2023).
- International Migrant Stock 2019, United Nations, URL: https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org/development/desa/pd/files/undesa_pd_2019_migrant_stock_origin_destination_dataset.xlsx (access date 10.05.2023).
- Investment Map, International Trade Center, URL: <https://www.investmentmap.org/investment/time-series-by-country> (access date 10.05.2023).
- The Trade Data You Need, When You Need It, The Observatory of Economic Complexity, URL: <https://oec.world/> (access date 10.05.2023).
- WTO Stats, World Trade Organization, URL: <https://stats.wto.org/> (access date 10.05.2023).

Received 04.06.2024

Revised 25.09.2024

Accepted 15.10.2024

ВИТАЛЬНЫЕ ИЗОТОПНЫЕ СМЕЩЕНИЯ КИСЛОРОДА ОСТРАКОД КАСПИЙСКОГО РЕГИОНА

А.А. Ткач¹, Н.Т. Ткач², М.А. Зенина³, Т.А. Янина⁴

^{1,4} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, лаборатория новейших отложений и палеогеографии плейстоцена

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра нефтегазовой седиментологии и морской геологии

³ Институт океанологии РАН, лаборатория палеоокеанологии

¹ Мл. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: tkachaa@my.msu.ru

² Инженер; e-mail: tkachgeo@gmail.com

³ Ст. науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: maria_zenina@mail.ru

⁴ Проф., зав. лабораторией, д-р геогр. наук; e-mail: paleo@inbox.ru

В работе измерены показатели $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ для шести наиболее часто встречающихся в современных донных осадках видов остракод из 33 точек отбора проб со всей акватории Каспийского моря. Установлено, что изотопно-кислородный состав раковин каспийских остракод несет следы метаболических эффектов, связанных с их жизненным циклом. Величина витального изотопного смещения составляет $-0,11\text{‰}$ ($\pm 0,7$) для *Euxinocythere virgata*, $-0,25\text{‰}$ ($\pm 1,14$) для *Tyrrhenocythere amnicola donetziensis*, $+2,94\text{‰}$ ($\pm 0,16$) для *Candona schweyeri*, $+1,55\text{‰}$ ($\pm 1,12$) для *Paracyprideis* sp., $+1,77\text{‰}$ ($\pm 0,22$) для *Bakunella dorsoarcuata* и $+2,45\text{‰}$ ($\pm 0,95$) для *Camptocypria* sp. Искомое изотопное смещение по смешанному комплексу остракод оказалось эквивалентно среднему изотопному смещению по изученной выборке и составило $+1\text{‰}$ ($\pm 0,5$). Проведенная работа доказывает, что метаболические процессы остракод провоцируют смещения в ожидаемом фракционировании изотопов кислорода между CaCO_3 и водой. Возникаемое при этом изотопное смещение необходимо учитывать при палеогеографических исследованиях для корректной интерпретации палеоклиматических изменений в Каспийском регионе на основании изотопно-кислородной летописи.

Ключевые слова: $\delta^{18}\text{O}$, геохимия стабильных изотопов, изотопно-кислородный анализ, метаболические эффекты

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.4

ВВЕДЕНИЕ

Каспийское море является уникальным, крупнейшим в мире бессточным внутренним водоемом, региональное положение которого во многом предопределило особенности его развития [Квасов, 1975; Рычагов, 1997; Yanina, 2014]. Четвертичная история Каспия описывается трансгрессивно-регрессивными циклами различной амплитуды и продолжительности [Свиточ, 1991; Рычагов, 1997; Янина, 2012; Krijgsman et al., 2019]. По особенностям рельефа дна и гидрологического режима Каспийское море подразделяется на три участка: Северный, Центральный (или Средний) и Южный. Глубина моря увеличивается от нескольких метров в Северной акватории до 1025 м на юге [Каспийское море..., 1986]. Соленость вод Каспийского моря увеличивается от 1–4‰ на севере вблизи дельты Волги до 13‰ на юге [Тужилкин и др., 1997]. Наибольшая соленость отмечается вдоль восточного побережья Средней и Южной частей моря, где достигает 13,5‰ (без учета залива Кара-Богаз-Гол),

в то время как вблизи устьев крупных рек показатели солености уменьшаются. Вертикальные изменения солености незначительны. В температурном отношении толща воды до глубины 350 м подвержена сезонным колебаниям; на большей глубине температура воды колеблется от $+3,80^\circ\text{C}$ до $+5,35^\circ\text{C}$, при среднем значении $+4,5^\circ\text{C}$ [Каспийское море..., 1986]. Верхняя 100-метровая толща воды подвержена наиболее сильным сезонным изменениям: летом мелководья прогреваются до $+25...26^\circ\text{C}$ как в Северной, так и в Южной котловине. Зимой акватория Северного Каспия частично покрыта льдом. В Каспийском море преобладают ветровые течения. Наряду с ветрами основными факторами, влияющими на течения, являются пространственная неоднородность плотности воды, конфигурация береговой линии и рельефа дна, а также приток речной воды [Гинзбург и др., 2021]. Течения в Каспийском море представлены в виде общей циклонической циркуляции, охватывающей всю глубоководную часть моря и состоящей из двух циклонических

круговоротов в Среднем и Южном Каспии. Течения в Северном Каспии определяются ветровым полем, стоком рек и распределением поля плотности воды [Лебедев и др., 2015]. По данным некоторых исследователей [Ferronsky et al., 2014], средние изотопно-кислородные показатели придонных вод (здесь и далее $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$) Центрального и Южного Каспия составляют порядка 1,7–1,5‰.

Стабильные изотопы кислорода морских карбонатных микрофоссилий – в первую очередь, фораминифер – широко используются для выявления изменений глобального объема льда, циркуляции океана и температуры. В то же время остракоды, мелкие двустворчатые ракообразные, в контексте изотопно-кислородных исследований остаются несколько в стороне. Идея использования остракод для изотопно-кислородных исследований Каспия в первую очередь объясняется более широкой встречаемостью их раковин и створок в четвертичных осадках региона по сравнению с фораминиферами. Секреция раковины остракоды происходит быстро, в течение нескольких часов [Turpen, Angell, 1971] или нескольких дней [Chivas et al., 1983]. Таким образом, значения $\delta^{18}\text{O}$ кальцита их раковин (здесь и далее $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$) обеспечивают «моментальную» запись состояния воды конкретного времени – времени кальцификации [Holmes, DeDeckker, 2012]. Раковины обладают хорошей сохранностью и их легко выделить из отложений [Бердникова, 2021].

В карбонатах кальция $\delta^{18}\text{O}$ определяется несколькими факторами. Важнейшие из них определяют применимость изотопно-кислородного метода для палеогеографических реконструкций. К ним относятся температура окружающей среды, в данном случае каспийской воды, и ее изотопный состав [Urey, 1947; Epstein et al., 1953]. Однако, для того чтобы перейти к анализу взаимосвязи изотопно-кислородного состава раковины с условиями среды, в которой она формировалась, необходимо исключить влияние других немаловажных аспектов. Если минеральный состав раковин остракод определен, однороден и стабилен – раковина состоит из богатого хитиноидным веществом низкомагnezийного кальцита, что в работе позволяет избежать осложнений, связанных со сложной минералогией, то возможные метаболические эффекты самих организмов требуют предметного изучения.

В целом для изотопно-кислородных измерений можно использовать только те организмы, которые формируют свою раковину с соблюдением изотопного равновесия с водой. Однако важно отметить, что это равновесие все же условно, так как не существует организмов, изотопный состав которых не несет в себе следов метаболических эффектов. Такие витальные эффекты (от англ. *vital*, т. е. свя-

занные с жизненным циклом организма, метаболически обусловленные) могут провоцировать смещения в ожидаемом фракционировании изотопов кислорода между CaCO_3 и водой, что приводит к возникновению изотопного смещения и осложняет палеоклиматическую интерпретацию изотопно-кислородных данных [Epstein et al., 1953].

В целом механизмы, вызывающие изотопные смещения, обусловленные жизненным циклом остракод, изучены недостаточно [Gemery et al., 2022]. Предполагается [Kim, O'Neil, 1997], что они связаны с фракционированием изотопов в результате биологических процессов. Согласно мнению [Xia et al., 1997a], этому фракционированию способствуют физиологические факторы (например, скорость метаболизма, количество пищи, проникновение света сквозь водную толщу). Авторы в [Decrouy, Vennemann, 2013] предположили, что обусловленные жизненными эффектами изотопные смещения в пределах таксона (ими изучены пресноводные и солоноватоводные виды) из разных мест отбора могут быть связаны с различиями в химическом составе воды: солености, щелочности, Mg/Ca , а также степени насыщения воды кальцитом (концентрации ионов CO_3^{2-} в воде). О роли щелочности воды и степени насыщения кальцитом также писали другие исследователи [Devriendt et al., 2017].

Несмотря на эти неопределенности, влияние витальных эффектов на фракционирование изотопов кислорода известно для многих видов остракод. Согласно литературным данным, остракоды, как правило, демонстрируют смещения в сторону утяжеления изотопного состава [Xia et al., 1997a; Grafenstein von et al., 1999; Simstich et al., 2004]. Предыдущие исследования [Gemery et al., 2022] показали, что значения $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$, как правило, отражают средние летние свойства водной массы (в том числе, значения $\delta^{18}\text{O}$ воды – $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$), т. е. периода, на который приходится достижение организмами зрелости и пик их продуктивности. Считается, что влияние метаболических эффектов на фракционирование изотопов кислорода зависит от рода или вида, однако до сих пор остается нерешенным вопрос, в какой степени значения стабильных изотопов контролируются родовой/видовой принадлежностью [Xia et al., 1997a, 1997b; Grafenstein von et al., 1999; Simstich et al., 2004; Decrouy et al., 2011].

Для использования результатов изотопно-кислородного анализа изотопные смещения, обусловленные метаболическими эффектами, должны быть предварительно установлены – этому посвящена настоящая работа. Кроме того, в интересах палеогеографических исследований, в частности для интерпретации палеоклиматических измене-

ний в Каспийском регионе на основании изотопно-кислородной летописи, необходимо показать, что данные $\delta^{18}\text{O}$ действительно отражают среднее состояние современной воды Каспия, а значит, могут дать необходимую информацию об изменениях, происходивших в прошлом. Ранее нами были проведены работы по установлению влияния способа очищения и пробоподготовки на измеряемый изотопно-кислородный состав раковин остракод [Бердникова, Джавадова, 2022], а также по возможности проведения палеотемпературной реконструкции для Каспийского региона по $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ [Бердникова, 2021; Tkach et al., 2024]. Настоящая работа продолжает взятый нами курс на изотопно-кислородные исследования Каспийского региона, начатые С.А. Горбаренко [1972], С.Д. Николаевым [1995] и В.И. Ферронским [Ферронский и др., 1999] с коллегами, имеющие целью проследить влияние изменений в водном балансе Каспия на изотопный состав его воды и проследить общие принципы, применяемые к изотопным реконструкциям, на примере Каспийского моря.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу работы положено изучение коллекции остракод Е.А. Гофман, которая была передана в распоряжение НИЛ новейших отложений и палеогеографии плейстоцена (географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова). Микрофауна для этой коллекции была отобрана с помощью дночерпателя из верхней 5-сантиметровой толщи осадка со дна Каспийского моря в 1961–1963 гг. Составление коллекции было завершено к маю 1964 г. По материалам исследований опубликован отчет [Гофман, 1964], содержащий описания изученных видов остракод и условий их обитания. Однако работа с исходными материалами не была полностью завершена, о чем писала сама Е.А. Гофман [Гофман, 1964, с. 5]. Аналогов данной коллекции, содержащей раковины и створки остракод со всей акватории Каспийского моря, на сегодняшний день создано не было. Согласно данным Н.В. Козиной [2015], максимальное время накопления 5-сантиметрового слоя осадков в Каспии может достигать 180 лет (в зависимости от местоположения точки отбора проб). Этот период в настоящем исследовании принимается за современный.

Микрофаунистический анализ Е.А. Гофман проводила на 100 г сухого осадка. В случаях, когда навеска по какой-либо причине отличалась, производился перерасчет на 100 г. К сожалению, не весь исходный материал, с которым она работала, вошел в коллекцию и имелся в нашем распоряжении. Пробоподготовка образцов была реализована в соответствии с общепринятыми в настоящее вре-

мя этапами, согласно которым после взвешивания образца осуществляется его промывка на ситах. Полученный осадок полностью высушивается, а затем из сухого образца проводится отбор фауны остракод. После завершения подготовительных операций экземпляры остракод, хранившиеся в закрытых емкостях – аналогах камер Кранца (Krantz-Cells), были изучены для определения их видовой принадлежности с помощью бинокля.

Изотопные измерения проводились в Приморском центре локального элементного и изотопного анализа ДВГИ ДВО РАН (Владивосток, Россия) на масс-спектрометре Finnigan MAT 252 (ThermoFinnigan, Bremen, Germany) под управлением программы Finnigan Isotope Data acquisition (ISODAT) с использованием международных стандартов NBS-18 ($\delta^{13}\text{C}$ VPDB = $-5,01\%$, $\delta^{18}\text{O}$ VPDB = $-23,0\%$), NBS-19 ($\delta^{13}\text{C}$ VPDB = $+1,95\%$, $\delta^{18}\text{O}$ VPDB = $-2,2\%$) и лабораторного стандарта Coral-1 ($\delta^{13}\text{C}$ VPDB = $-0,28\%$, $\delta^{18}\text{O}$ VPDB = $-3,69\%$) [Velivetskaya et al., 2009], полученного из арагонита современного коралла *Porites lutea* (Новая Каледония), калиброванного по международным стандартам NBS-18, NBS-19 и CO-8 при использовании традиционной техники выделения CO_2 в фосфорной кислоте при 25°C и измерении на двойной системе напуска масс-спектрометра MAT 252. В указанной лаборатории результаты $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ для международных и лабораторного стандартов имели одинаково хорошую воспроизводимость $\leq \pm 0,05\%$. Для измерения применялась технология, описанная в работе сотрудников центра [Velivetskaya et al., 2009], соединяющая в себе классические принципы выделения CO_2 из карбонатов в вакуумных условиях и современную технику измерения малого количества газа в постоянном (непрерывном) потоке гелия (continuous-flow isotope ratio mass spectrometry (CF-IRMS)), подразумевающая ряд технических модификаций, направленных на улучшение воспроизводимости результатов анализа микрограммовых количеств карбоната. Возможность метода проводить высокоточные изотопные измерения позволяет выявить индивидуальные нюансы в записях $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ остракод. Для подготовки проб использована автоматизированная система GasBench II (ThermoFinnigan, Bremen, Germany).

Для измерения $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ использовались раковины шести наиболее часто встречающихся в изученных пробах видов остракод: *Euxinocythere virgata* и *Tyrrhenocythere amnicola donetziensis*, живущих на мелководье, и более глубоководных видов – *Candona schweyeri*, *Paracyprideis* sp., *Bakunella dorsoarcuata* и *Camptocyprina* sp. Также была изучена смесь указанных видов.

Таблица 1

Физико-географические характеристики Каспийского моря в точках отбора проб

Номер пробы	Широта, град.	Долгота, град.	Глубина моря, м	$S_{\text{ср}}, \text{‰}$	$S_{\text{лет}}, \text{‰}$	$S_{\text{зим}}, \text{‰}$	$T_{\text{ср}}, \text{°C}$	$T_{\text{лет}}, \text{°C}$	$T_{\text{зим}}, \text{°C}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{w}}, \text{‰ SMOW}$
B44	43,470	50,768	100	13	12,5	13,5	8	23	4	-1,64
B45	43,409	50,636	150	13	12,5	13,5	7	10	4	-1,64
B46	43,114	48,161	33	12	12	12	13,5	23	4	-1,7
B47	43,100	51,131	25	13,5	13,5	13,5	12	19	5	-1,79
B48	42,979	51,266	70	13,25	13	13,5	12	19	5	-1,62
B49	42,956	50,979	50	13,25	13	13,5	12,5	20	5	-1,7
B50	42,794	50,711	150	13	13	13	7	8	6	-1,64
B51	42,526	51,315	148	13	13	13	7	8	6	-1,64
B52	42,508	52,001	30	13,5	13,5	13,5	11,5			-1,79
B53	42,367	51,491	119	13	13	13	7	8	6	-1,64
B54	42,259	48,660	203	12,5			9			-1,59
B55	41,970	52,342	28	13,25	13,5	13,5	12	19	5	-1,79
B56	41,684	52,061	75	13	13	13	11	16	6	-1,62
B57	41,627	49,998	780	12,5	12,5	12,5	4,5	4,5	4,5	-1,42
B58	41,235	49,994	127	12,5	12,5	12,5	10	14	6	-1,64
B59	41,082	50,068	300	12,5	12,5	12,5	5,5	6	5	-1,52
B60	40,870	49,595	25	12,5	12,5	12,5	14,5	23	6	-1,79
B61	40,851	50,806	100	12,5	12,5	12,5	14,5	21	8	-1,64
B62	40,736	49,829	25	12,25	12,5	12	14,5	4	6	-1,79
B63	40,650	49,605	8,8	12,25			15,5			-1,71
B64	40,168	49,528	13,8	12,25			15,5			-1,66
B65	39,929	49,523	16,2	12,25			15,5			-1,64
B66	39,927	49,740	14,2	12,25			15,5			-1,66
B67	39,893	49,455	15	12,25			15,5			-1,66
B68	39,787	49,614	12,4	12,25			15,5			-1,66
B69	39,706	49,614	12	12,25	12,5	12	15,5	24	7	-1,66
B70	39,640	49,428	10,6	12,25			15,5			-1,71
B71	39,591	49,500	16	12,25			15,5			-1,64
B72	39,471	49,359	11,8	12,5			15,5			-1,71
B73	39,344	50,248	690	12,25			4,5			-1,45
B74	39,305	51,747	150	13,25	13	13,5	11	11	11	-1,61
B75	39,061	50,753	750	12,5	12,5	12,5	4,5	4,5	4,5	-1,47
B76	38,053	52,645	25	13,25	13	13,5	18	25	11	-1,84

В настоящий момент среди исследователей стабильных изотопов кислорода в остракодах нет единства мнений о согласованности значений $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ в створках ювенильных и взрослых особей. Так, например, [Mazzini, 2005] обнаружил между ними значимые расхождения, а [Bornemann et al., 2012] отмечают, что изменчивость $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ увеличивалась, когда в анализ включалась молодь. В то же время работы других исследователей [Didie, Bauch, 2002] свидетельствуют об отсутствии существенных различий между результатами измерения $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ раковин раз-

ных возрастных стадий. В более поздней работе [Gemery et al., 2022] обнаружено, что среди некоторых арктических видов (*Normanicythere leioderma* и *Paracyprideis pseudopunctillata*) средняя разница смещения между молодыми и взрослыми особями составляет 0,2 и 0,1‰ соответственно, т. е. находится в пределах погрешности измерения. Для других видов она увеличивается до 0,6‰. Исследования неморских остракод показывают, что разница $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ у ювенильных и взрослых особей одного и того же вида может быть связана с отличиями в процессе

кальцификации [Xia et al., 1997b; Keatings et al., 2002] и в скорости метаболизма [Xia et al., 1997a]. Поскольку для каспийских видов остракод таких исследований проведено не было, раковины ювенильных особей необходимо было исключить из анализа для достоверности интерпретации данных. Изучение изменений $\delta^{18}\text{O}$ в раковинах остракод в зависимости от возрастной стадии является задачей будущих исследований. В настоящей работе изучены только раковины взрослых остракод, не несущие следов переотложения или каких-либо деформаций.

Для выяснения закономерностей состава стабильных изотопов раковин современных остракод крайне важно иметь представление об условиях, в которых они жили и в которых в процессе линьки или отмирания организмов откладывались их створки. В современных пробах возможно изучить эффект витального изотопного смещения в раковинах остракод благодаря тому, что известна температура и $\delta^{18}\text{O}_w$ в точках отбора этих проб, а также измерены величины $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$. Важно было использовать информацию, хронологически соответствующую времени отбора образцов, для этих целей мы использовали искомые показатели, измеренные параллельно отбору проб в 1960-х гг. и опубликованные в ряде работ (табл. 1) [Фурман, 1961; Гофман, 1964]. К сожалению, мы не располагаем данными об $\delta^{18}\text{O}_w$ на момент отбора проб, поэтому используем наиболее близкие во времени данные об изотопном составе воды Каспийского моря, опубликованные С.А. Горбаренко [1972] (см. табл. 1), которые дают достаточно подробную картину распределения $\delta^{18}\text{O}_w$. Более 60 измерений $\delta^{18}\text{O}$ поверхностных и придонных вод хорошо соответствуют меньшему количеству данных, полученных позже другими исследователями [Froehlich et al., 1999], поэтому мы полагаем, что показатель $\delta^{18}\text{O}_w$ не претерпел существенных изменений за период времени около 10 лет, который разделяет момент отбора проб в коллекцию Е.А. Гофман и измерения $\delta^{18}\text{O}_w$. Поскольку точки измерения $\delta^{18}\text{O}_w$ не идентичны точкам отбора проб на микрофаунистические исследования, каждому из участков отбора проб мы присвоили значение $\delta^{18}\text{O}_w$, придерживаясь следующих принципов: 1) значение $\delta^{18}\text{O}_w$ было получено не далее чем в 40 км от соответствующей точки проб; 2) значение $\delta^{18}\text{O}_w$ было получено на той же глубине, что и соответствующая точка отбора проб; 3) значение $\delta^{18}\text{O}_w$ было получено в том же геоморфологическом положении, что и соответствующая точка отбора проб.

Среди всех сохранившихся в коллекции Е.А. Гофман проб указанным критериям удовлетворяли 33 точки отбора, которые были рассмотрены в рамках настоящей работы для выяснения величин

ны витального изотопного смещения каспийских остракод. Их местоположение представлено на рис. 1 (см. также табл. 1). Всего изотопный состав остракод измерен в 71 пробе.

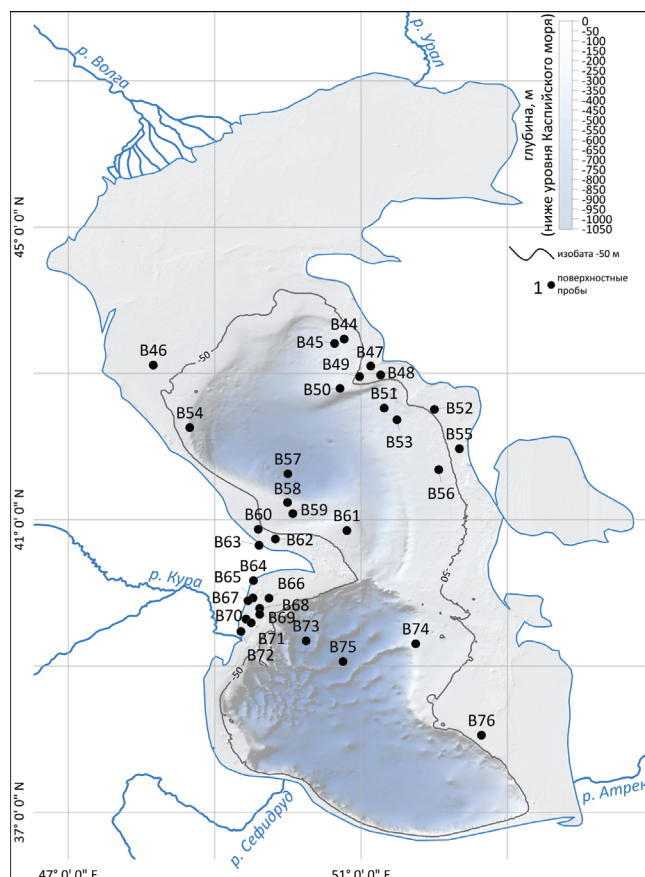


Рис. 1. Местоположение изученных точек отбора проб

Fig. 1. Location of the studied sampling sites

Поскольку $\delta^{18}\text{O}_w$ измеряется относительно Венского стандарта SMOW (VSMOW – Vienna Standard Mean Ocean Water, стандарт средней океанической воды), для дальнейших расчетов необходимо было перейти от значений $\delta^{18}\text{O}_w$ VSMOW к значениям относительно Венского стандарта PDB. Для этого использовано уравнение [Hut, 1987]:

$$\delta^{18}\text{O}_w \text{ VPDB} = 0,99973 \cdot \delta^{18}\text{O}_w \text{ VSMOW} - 0,27. \quad (1)$$

Витальное изотопное смещение представляет собой разницу между $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ и средним ожидаемым значением $\delta^{18}\text{O}$ равновесного кальцита ($\delta^{18}\text{O}_{\text{ожидаемая}}$), т. е. $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{ожидаемая}}$. Среднее ожидаемое значение $\delta^{18}\text{O}$ равновесного кальцита (образовавшегося в изотопном равновесии с водой) можно определить по уравнению [O'Neil et al., 1969]:

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{ожидаемая}} \text{ VPDB} = [21,9 - 3,16 \cdot (31,061 + T)^{0,5}] + \delta^{18}\text{O}_w. \quad (2)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерения $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ представлены в табл. 2. В случае, когда измерение по одному образцу проводилось неоднократно, строка, содержащая дополнительную информацию о номере, виде и местоположении точки, а также глубине моря, дублирована, и приведены данные по второму измерению или измерению по другому виду остракод.

Средние значения $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ по каждому виду составили $-1,42\text{‰}$ ($\pm 0,75$) для *Euxinocythere virgata*, $-1,37\text{‰}$ ($\pm 1,42$) для *Tyrrhenocythere amnicola donetziensis*, $+1,65\text{‰}$ ($\pm 1,01$) для *Candona schweyerei*,

$+1,29\text{‰}$ ($\pm 0,44$) для *Paracyprideis* sp., $+2,25\text{‰}$ ($\pm 0,66$) для *Bakunella dorsoarcuata* и $+2,83\text{‰}$ ($\pm 0,66$) для *Camptocypria* sp. (рис. 2А). Полученные данные измерений позволили рассчитать витальное изотопное смещение (рис. 2Б). Результаты подтвердили, что изученные остракоды несут следы метаболических эффектов – положительное смещение составляет около 1‰. Это хорошо согласуется с данными, установленными другими исследователями, которые в среднем варьируют от +2 до +0,5‰ [Xia et al., 1997a, 1997b; Grafenstein von et al., 1999; Didie, Bauch, 2002; Simstich et al., 2004; Gemery et al., 2022].

Таблица 2

Результаты измерения стабильных изотопов кислорода и углерода, в том числе с введенной поправкой на витальное изотопное смещение, установленное в работе

Номер пробы	Остракоды	Номер измерения	$\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$, ‰ VPDB	$\delta^{13}\text{C}_{\text{ost}}$, ‰ VPDB	$\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$, ‰ VPDB (с поправкой на витальное изотопное смещение)
B44	<i>Paracyprideis</i> sp.	1	3,07	-0,31	0,34
B45	<i>B. dorsoarcuata</i>	1	2,73	1,90	0,96
B45	<i>Camptocypria</i> sp.	1	2,88	1,19	0,15
B45	<i>Camptocypria</i> sp.	2	2,80	-0,49	0,07
B46	<i>T. amnicola donetziensis</i>	1	1,35	-2,60	1,60
B46	<i>T. amnicola donetziensis</i>	2	0,54	-2,75	0,79
B47	<i>T. amnicola donetziensis</i>	1	0,44	-2,23	0,69
B47	<i>T. amnicola donetziensis</i>	2	0,74	-2,04	0,99
B48	<i>Camptocypria</i> sp.	1	3,52	0,28	0,79
B49	<i>Camptocypria</i> sp.	1	3,08	0,87	0,35
B49	<i>Camptocypria</i> sp.	2	2,70	1,07	-0,03
B50	<i>B. dorsoarcuata</i>	1	2,73	1,05	0,96
B50	<i>B. dorsoarcuata</i>	2	2,59	-0,32	0,82
B50	<i>Camptocypria</i> sp.	1	3,18	0,17	0,45
B51	<i>B. dorsoarcuata</i>	1	2,74	1,39	0,97
B51	<i>B. dorsoarcuata</i>	2	2,36	-0,39	0,59
B52	<i>Camptocypria</i> sp.	1	2,70	0,37	-0,03
B52	<i>Camptocypria</i> sp.,	2	2,95	-0,26	0,22
B52	<i>T. amnicola donetziensis</i>	1	-0,44	-1,83	-0,19
B52	<i>T. amnicola donetziensis</i>	2	1,06	-3,02	1,31
B53	<i>Camptocypria</i> sp.	1	2,81	0,81	0,08
B54	<i>Camptocypria</i> sp.	1	1,43	1,67	-1,30
B54	<i>Camptocypria</i> sp.	2	1,44	1,56	-1,29
B55	<i>T. amnicola donetziensis</i>	1	-0,07	-2,34	0,18
B55	<i>T. amnicola donetziensis</i>	2	0,74	-3,86	0,99
B56	<i>C. shweieri</i>	1	2,61	1,09	-0,20
B56	<i>C. shweieri</i>	2	2,84	1,52	0,03
B56	<i>Paracyprideis</i> sp.	1	0,66	-4,03	-0,89

Продолжение таблицы 2

Номер пробы	Остракоды	Номер измерения	$\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}} \text{‰ VPDB}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{ost}} \text{‰ VPDB}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}} \text{‰ VPDB}$ (с поправкой на витальное изотопное смещение)
B56	<i>Paracyprideis sp.</i>	2	1,88	-2,46	0,33
B57	Смесь видов	1	2,35	-2,86	1,32
B57	Смесь видов	2	2,87	-3,08	1,84
B58	<i>Camptocypria sp.</i>	1	3,42	-0,30	0,69
B58	<i>Camptocypria sp.</i>	2	3,67	0,07	0,94
B59	<i>Paracyprideis sp.</i>	1	1,19	0,05	-0,36
B60	<i>E. virgata</i>	1	0,07	-2,04	0,18
B60	<i>E. virgata</i>	2	-0,49	-2,17	-0,38
B61	<i>Paracyprideis sp.</i>	1	1,43	-2,81	-0,12
B61	<i>Paracyprideis sp.</i>	2	1,29	-2,63	-0,26
B62	<i>C. shweiry</i>	1	0,65	1,80	-2,16
B63	<i>T. amnicola donetziensis</i>	1	-2,55	-1,92	-2,30
B63	<i>T. amnicola donetziensis</i>	2	-2,15	-1,36	-1,90
B64	<i>T. amnicola donetziensis</i>	1	-2,60	-1,45	-2,35
B65	<i>E. virgata</i>	1	-0,97	-4,20	-0,86
B65	<i>E. virgata</i>	2	-1,33	-2,89	-1,22
B65	<i>T. amnicola donetziensis</i>	1	-2,75	-0,53	-2,50
B66	<i>E. virgata</i>	1	-1,86	-2,46	-1,75
B66	<i>E. virgata</i>	2	-1,55	-2,56	-1,44
B66	<i>T. amnicola donetziensis</i>	1	-2,21	-1,15	-1,96
B66	<i>T. amnicola donetziensis</i>	2	-1,59	-1,79	-1,34
B67	<i>E. virgata</i>	1	-2,04	-2,11	-1,93
B67	<i>E. virgata</i>	2	-2,28	-2,11	-2,17
B68	<i>T. amnicola donetziensis</i>	1	-2,26	-1,63	-2,01
B68	<i>T. amnicola donetziensis</i>	1	-2,14	-1,66	-1,89
B68	<i>T. amnicola donetziensis</i>	2	-2,73	-2,16	-2,48
B69	<i>T. amnicola donetziensis</i>	1	-2,05	-2,64	-1,80
B69	<i>T. amnicola donetziensis</i>	2	-1,77	-2,18	-1,52
B70	<i>E. virgata</i>	1	-1,92	-1,96	-1,81
B70	<i>E. virgata</i>	2	-1,78	-2,74	-1,67
B70	<i>T. amnicola donetziensis</i>	1	-3,15	-2,13	-2,90
B70	<i>T. amnicola donetziensis</i>	1	-1,75	-1,93	-1,50
B70	<i>T. amnicola donetziensis</i>	2	-2,14	-1,04	-1,89
B70	<i>T. amnicola donetziensis</i>	2	-1,79	-2,67	-1,54
B71	<i>T. amnicola donetziensis</i>	1	-2,33	-1,48	-2,08
B72	<i>T. amnicola donetziensis</i>	1	-2,73	-1,17	-2,48
B73	Смесь видов	1	3,00	-0,37	1,97
B73	Смесь видов	2	3,07	0,47	2,04
B74	<i>B. dorsoarcuata</i>	1	1,40	1,32	-0,37
B74	<i>B. dorsoarcuata</i>	2	1,23	1,08	-0,54
B75	Смесь видов	1	1,92	0,05	0,89
B76	<i>C. shweiry</i>	1	0,85	0,39	-1,96
B76	<i>C. shweiry</i>	2	1,32	2,05	-1,49

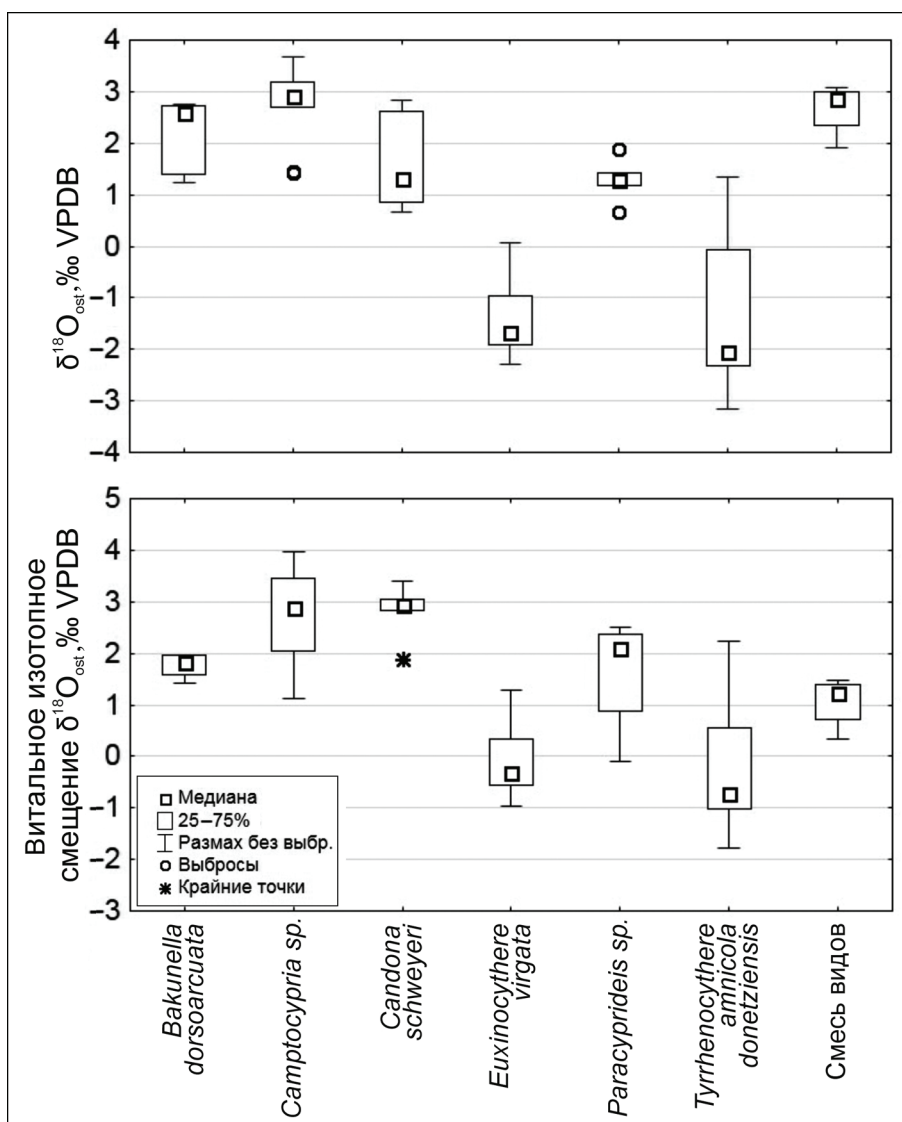


Рис. 2. Результаты измерения $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ и расчетные витальные смещения для изученных видов

Fig. 2. Results of $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ measurements and calculated vital offsets for the studied species

Согласно литературным данным, значения $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$, как правило, отражают средние летние свойства воды (главным образом температуру) – периода, на который приходится достижение организмами зрелости и пик их продуктивности [Hogne, 1983; Gemery et al., 2022]. Однако проведенная нами работа, напротив, свидетельствует о существовании более тесной связи $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ с зимними температурами: средняя разница ($\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{ожидаемая}}$) оказалась наименьшей при расчетах $\delta^{18}\text{O}_{\text{ожидаемая}}$ по средним температурам воды зимних месяцев и составила +0,98‰, в то время как для летних месяцев средняя разница составила +3,16‰. Среднее изотопное смещение, рассчитанное по среднегодовым температурам воды Каспийского моря (для поля, по которому имеются данные о $\delta^{18}\text{O}_{\text{w}}$), близко к таковому для зимних месяцев и составляет +0,99‰.

Важно отметить, что для точек отбора проб, расположенных на больших глубинах, где сезонные перепады температуры невелики, изотопное смещение также постоянно – в среднем около +1‰, в то время как на мелководье, где вода летом прогревается до +20...25°C, а зимой температура опускается в среднем до +4°C, разница вычисленного изотопного смещения для летних и зимних месяцев может достигать 4,5‰. Эти выводы согласуются с наблюдениями других исследователей [Erlenkeuser, Grafenstein von, 1999; Simstich et al., 2004], которые заметили, что более высокая гидрологическая изменчивость на малых глубинах вызывает более заметные отклонения значений $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ от равновесия.

Для *B. dorsoarcurata*, изотопное смещение которой составляет в среднем +1,77‰, стандартное отклонение составило всего 0,22‰. Наибольшее

утяжеление изотопного состава в связи с жизненными эффектами зарегистрировано для *C. schweyeri* (+2,81‰), однако стандартное отклонение для вида составило всего 0,57‰ (см. рис. 2). Этот факт позволяет утверждать, что, несмотря на высокий показатель смещения, такой результат стабильно получается для большинства изученных остракод этого вида, а значит, с точки зрения палеогеографических реконструкций вид хорошо подходит для изотопно-кислородных измерений и изучения наряду с *B. dorsoarcuata*.

Для *Camptocypria* sp. зарегистрировано высокое изотопное смещение (2,73‰), стандартное отклонение также выше и составляет 0,95‰. Аналогичная картина наблюдается и для *Paracyprideis* sp. Несмотря на относительно невысокое смещение (+1,55‰), разброс значений велик (стандартное отклонение достигает 1,12‰ – выше оно только для *T. amnicola donetziensis* (1,14‰).

Пожалуй, одним из важнейших наблюдений стало изотопное смещение по пробам, представляющим собой смесь изученных видов. Оно оказалось эквивалентно среднему изотопному смещению, рассчитанному по среднегодовым и зимним температурам воды Каспия, и составило +1‰ ($\pm 0,5$). Для сравнения, этот показатель составляет –2,25‰ в раковинах моллюсков *Cardium edule* и *Didacna trigonoides* и –3,27‰ в карбонатных илах [Ферронский и др., 1999]. Можно заключить, что использованием в одном измерении раковин нескольких видов, можно добиться сглаживания сигнала, вызванного жизненными эффектами остракод. Значит, в случае, когда невозможно отобрать один и тот же вид для исследования, например, при работе с материалами бурения, допустимо отбирать для анализа стабильных изотопов разные виды остракод, желательно близкородственные.

Интересно отметить, что у изученных мелководных видов *E. virgata* и *T. amnicola donetziensis* витальные эффекты приводят к формированию изотопно более легкого состава кислорода, т. е. величина изотопного смещения характеризуется не просто наименьшими, но отрицательными значениями (–0,11 и –0,25‰ соответственно). Наибольшее стандартное отклонение метаболических эффектов также зарегистрировано для *T. amnicola donetziensis* (1,14‰), довольно велико оно и для *E. virgata* (0,7‰). Такая закономерность легко объяснима местоположением исследуемых образцов, многие из которых были отобраны вблизи впадения Куры, в то время как оставшиеся были удалены от подобных источников пресной изотопно легкой воды. Более того, глубина моря в точках отбора данных проб не превышала 33 м, между тем известно, что у бентосных и бо-

лее глубоководных остракод, как правило, происходит смещение в сторону утяжеления изотопного состава [Xia et al., 1997a; Grafenstein von et al., 1999; Simstich et al., 2004], в то время как за счет высокой гидрологической изменчивости на мелководье изотопно-кислородный состав остракод подвержен большему изменению. Так, например, различия солености (равно как и температуры) в придонном слое в глубоководной части моря гораздо более сглажены, чем на мелководье. Чтобы исключить (или по меньшей мере снизить) изотопный сигнал этой гидрологической изменчивости и точнее оценить витальные эффекты, некоторые исследователи [Simstich et al., 2004; Gemery et al., 2022] используют в своих работах только образцы, отобранные с глубины более 40–50 м.

Придерживаясь аналогичной стратегии, мы попытались исключить из рассмотрения все образцы, отобранные из зоны мелководья, на глубинах менее 50 м (см. табл. 1). Тогда в исследуемую выборку входит гораздо более ограниченное количество точек исследования, в частности полностью исключаются из рассмотрения виды *E. virgata* и *T. amnicola donetziensis*, не обитающие глубже 50 м. Для *B. dorsoarcuata* показатель изотопного смещения тем не менее не изменился, поскольку все пробы отобраны на глубинах порядка 150 м – это в первую очередь объясняется тем, что данный вид не живет на мелководье. Аналогичная ситуация наблюдалась для *Paracyprideis* sp. и смешанных проб, включающих разные виды остракод. Для *C. schweyeri* изотопное смещение оказалось чуть больше (+2,94‰), однако стандартное отклонение для вида составило всего 0,16‰, что существенно ниже такового по полной выборке. Для *Camptocypria* sp. зарегистрированное изотопное смещение снизилось до +2,45‰, в то время как разброс значений сохранился приблизительно на том же уровне – чуть меньше 1‰.

Таким образом, в настоящей работе установлено, что витальное изотопное смещение в изученных каспийских остракодах родоспецифично, т. е. оно зависит от родовой принадлежности остракод. Более того, продолжающиеся исследования по изучению нескольких видов рода *Camptocypria* позволяют нам предположить, что эти смещения видоспецифичны.

Отметим также, что по показателям $\delta^{13}\text{C}$ в кальците всех исследованных видов остракод прослеживается более существенное влияние метаболических эффектов. Разница между изотопным составом углерода раковин не только специфична, но и непостоянная для каждого отдельно взятого вида, поэтому требуется отдельное полноценное изучение изотопов углерода, непредусмотренное

данной работой. Связь изменения $\delta^{13}\text{C}$ и глубины моря также не очевидна. Принято считать, что по мере увеличения глубины значения $\delta^{13}\text{C}$ падают до глубины 1 км [Николаев, 1995], что объясняется активным потреблением легкого изотопа углерода живыми организмами, наиболее развитыми в верхнем фотическом слое. Однако по мере отмирания организмов и их опускания на дно моря происходит разложение и поступление легкого изотопа углерода в нижние слои, где деструкция и окисление органического вещества приводят к усиленному поглощению кислорода. Отсюда вытекает четкая корреляция между показателями $\delta^{13}\text{C}$, количеством растворенного O_2 и $\delta^{18}\text{O}$. Изотопный состав углерода карбонатов, вообще, в основном контролируется составом растворенного неорганического углерода (DIC) воды, в которой происходит формирование раковины. Изотопный состав DIC, в свою очередь, является сложной функцией изотопного состава приходящих в бассейн вод, изотопного обмена с атмосферным CO_2 , скорости фотосинтеза, а также скорости и типа органического (бактериального) распада и др. Более детальный разбор закономерностей формирования изотопно-углеродного состава и применение этих выводов для палеогеографических реконструкций является предметом будущих работ.

ВЫВОДЫ

Одним из важнейших факторов, определяющих $\delta^{18}\text{O}$ каспийских остракод, является изотопное смещение, связанное с их жизненным циклом (витальное, метаболически обусловленное). Его влияние на фракционирование изотопов кислорода родоспецифично и в среднем приводит к положительным отклонениям относительно ожидаемого равновесного формирования кальцита на величину около 1‰. Текущие исследования по изучению нескольких видов рода *Camptocypria* позволяют нам предположить, что эти смещения видоспецифичны. Установленное для шести наиболее часто встречающихся в современном Каспии видов остракод изотопное смещение позволит широкому кругу специалистов использовать его в работах, связанных с изучением $\delta^{18}\text{O}$. Одним из важнейших наблюдений стало изотопное смещение по смешанному комплексу остракод, которое оказалось эквивалентно среднему изотопному смещению и составило +1‰ ($\pm 0,5$). Можно заключить, что использованием в одном измерении раковин нескольких видов можно добиться сглаживания сигнала, вызванного жизненными эффектами остракод. Значит, в случае, когда невозможно отобрать один и тот же вид для исследования, например при работе с материалами бурения, допустимо отбирать для анализа стабильных изотопов смесь остракод, желательно близкородственных.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ № 24-77-00011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бердникова А.А. Проблемы изотопной палеотермометрии для Каспийского моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 6. С. 51–61.
- Бердникова А.А., Джавадова А. Методика подготовки остракод для изотопно-кислородного анализа в Каспийском регионе // Естественные и технические науки. 2022. Т. 11. № 17(174). С. 162–166. DOI: 10.25633/ETN.2022.11.15.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Серых И.В., Лебедев С.А. Климатические изменения гидрометеорологических параметров Каспийского моря (1980–2020) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 277–291. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291.
- Горбаренко С.А. Применение изотопного кислородного анализа для целей палеогеографического анализа: дис. ... канд. геогр. наук. М., 1972. 147 с.
- Гофман Е.А. Изучение экологии остракод и фораминифер солоноватоводных и пресноводных бассейнов. Каспийское море: Окончательный отчет. М.: ИГИРГИ, 1964. 351 с.
- Каспийское море: Гидрология и гидрохимия / отв. ред. С.С. Байдин, А.Н. Косарев. М.: Наука, 1986. 261 с.
- Квасов Д.Д. Позднечетвертичная история крупных озер и внутренних морей Восточной Европы. Л.: Наука, 1975. 278 с.
- Козина Н.В. Минеральный состав донных отложений и особенности современного осадконакопления в Каспийском море: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М., 2015. 245 с.
- Лебедев С.А., Костяной А.Г., Гинзбург А.И. Динамика Каспийского моря по данным инструментальных измерений, результатам моделирования и данным дистанционного зондирования // III Международная научно-практическая конференция «Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий», Майкоп: МГТУ, 2015. С. 146–179.
- Николаев С.Д. Изотопная палеогеография внутриконтинентальных морей. М.: ВНИРО, 1995. 127 с.
- Рычагов Г.И. Плейстоценовая история Каспийского моря. М.: Изд-во МГУ, 1997. 267 с.
- Свиточ А.А. Колебания уровня Каспийского моря в плейстоцене (классификация и систематическое описание) // Каспийское море. Палеогеография и геоморфология. М.: Наука. 1991. С. 5–100.

- Тужилкин В.С., Косарев А.Н., Трухчев Д.И., Иванова Д.П. Сезонные особенности общей циркуляции вод глубоководной части Каспийского моря // *Метеорология и гидрология*. 1997. № 1. С. 91–99.
- Ферронский В.И., Поляков В.А., Куприн П.Н. и др. Природа колебания уровня Каспийского моря (по результатам изучения донных осадков) // *Водные ресурсы*. 1999. Т. 26. № 6. С. 652–666.
- Фурман Т.И. К характеристике придонных вод среднего и южного Каспия // *Тр. Ин-та географии АН Аз. ССР*. 1961. Т. 10. С. 15–23.
- Янина Т.А. Неоплейстоцен Понто-Каспия: биостратиграфия, палеогеография, корреляция. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2012. 264 с.
- Bornemann A., Pirkenseer C.M., De Deckker P., Speijer R.P. Oxygen and carbon isotope fractionation of marine ostracod calcite from the eastern Mediterranean Sea, *Chem. Geol.*, 2012, vol. 310(311), p. 114–125, DOI: 10.1016/j.chemgeo.2012.03.028.
- Chivas A.R., De Deckker P., Shelley J.M.G. Magnesium, strontium, and barium partitioning in nonmarine ostracod shells and their use in paleoenvironmental reconstructions – a preliminary study, R.F. Maddocks (ed.), *Applications of Ostracoda*, Houston, University of Houston, 1983, p. 238–249.
- Decrouy L., Vennemann T.W., Ariztegui D. Controls on ostracod shell geochemistry, part 2, Carbon and oxygen isotope composition, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, vol. 75, p. 7380–7399, DOI: 10.1016/j.gca.2011.09.008.
- Decrouy L., Vennemann T.W. Potential influence of the chemical composition of water on the stable oxygen isotope composition of continental ostracods, *J. Paleolimnol.*, 2013, vol. 50, p. 577–582, DOI: 10.1007/s10933-013-9719-5.
- Devriendt L.S., McGregor H.V., Chivas A.R. Ostracod calcite records the $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratio of the bicarbonate and carbonate ions in water, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2017, vol. 214, p. 30–50, DOI: 10.1016/j.gca.2017.06.044.
- Didie C., Bauch H.A. Implications of upper Quaternary stable isotope records of marine ostracodes and benthic foraminifers for paleoecological and paleoceanographical investigations, J.A. Holmes, A.R. Chivas (eds.), *The Ostracoda: Applications in Quaternary Research Geophysical Monograph Series American Geophysical Union*, Washington DC, 2002, p. 279–299, DOI: 10.1029/131GM15.
- Epstein S., Buchsbaum R., Lowenstam H.A., Urey H.C. Revised carbonate-water isotopic temperature scale, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1953, vol. 64, p. 13–15, DOI: 10.1130/0016-7606(1953)64[1315:RCITS]2.0.CO;2.
- Erlennkeuser H., Grafenstein von U. Stable oxygen isotope ratios in benthic carbonate shells of Ostracoda, Foraminifera, and Bivalvia from surface sediments of the Laptev Sea, summer 1993 and 1994, H. Kassens et al. (eds.), *Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1999, p. 503–514, DOI: 10.1007/978-3-642-60134-7_39.
- Ferronsky V.I., Polyakov V.N., Kuprin A.P., Vlasova L.S. Hydrotroilite as a bioindicator of paleohydrological and paleoclimatic processes in the Caspian Basin, *Water Resources*, 2014, vol. 41(4), p. 473–487, DOI: 10.1134/S009780781404006X.
- Froehlich K., Rozanski K., Povinec P. et al. Isotope studies in the Caspian Sea, *Sci. Total Environ.*, 1999, vol. 237(238), p. 419–427, DOI: 10.1016/S0048-9697(99)00154-0.
- Gemery L., Cooper L.W., Magen C. et al. Stable oxygen isotopes in shallow marine ostracodes from the northern Bering and Chukchi Seas, *Mar. Micropaleontol.*, 2022, vol. 165, 101979, DOI: 10.1016/j.marmicro.2021.102001.
- Holmes J.A., De Deckker P. The chemical composition of ostracod shells, D.J. Horne et al. (eds.), *Ostracoda as Proxies for Quaternary Climate Change. Developments in Quaternary Sciences*, Washington DC, 2012, p. 131–143, DOI: 10.1016/B978-0-444-53636-5.00008-1.
- Horne D.J. Life-cycles of podocypid Ostracoda – a review (with particular reference to marine and brackish-water species), R. Maddocks (ed.), *Applications of Ostracoda*, Proceedings of the Eighth International Symposium on Ostracoda, University of Houston, Dept. of Geosciences, Houston, Texas, 1983, p. 581–590.
- Hut G. Consultants' group meeting on stable isotope reference samples for geochemical and hydrological investigations, 16–18.9.1985, *Report to the Director General*, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1987.
- Keatings K.W., Heaton T.H.E., Holmes J.A. Carbon and oxygen isotope fractionation in non-marine ostracods: results from a 'natural culture' environment, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2002, vol. 66, p. 1701–1711, DOI: 10.1016/S0016-7037(01)00894-8.
- Kim S.T., O'Neil J.R. Equilibrium and nonequilibrium oxygen isotope effects in synthetic carbonates, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1997, vol. 61, p. 3461–3475, DOI: 10.1016/S0016-7037(97)00169-5.
- Krijgsman W., Tesakov A., Yanina T. et al. Quaternary time scales for the Pontocaspian domain: interbasinal connectivity and faunal evolution, *Earth Sci. Rev.*, 2019, vol. 188, p. 1–40, DOI: 10.1016/j.earscirev.2018.10.013.
- Mazzini I. Taxonomy, biogeography and ecology of Quaternary benthic Ostracoda (Crustacea) from circumpolar deep water of the Emerald Basin (Southern Ocean) and the S Tasman rise (Tasman Sea), *Senckenberg. Marit.*, 2005, vol. 35(1), p. 1–119, DOI: 10.1007/BF03043180.
- O'Neil J.R., Clayton R.N., Mayeda T.K. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates, *J. Chem. Phys.*, 1969, vol. 51, p. 5547–5558, DOI: 10.1063/1.1671982.
- Grafenstein von U., Erlennkeuser H., Trimborn P. Oxygen and carbon isotopes in modern fresh-water ostracod valves: assessing vital offsets and autecological effects of interest for palaeoclimate studies, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 1999, vol. 148(1–3), p. 133–152, DOI: 10.1016/S0031-0182(98)00180-1.
- Simstich J., Stanovoy V., Bauch D. et al. Holocene variability of bottom water hydrography on the Kara Sea shelf (Siberia) depicted in multiple single-valve analyses of stable isotopes in ostracods, *Mar. Geology*, 2004, vol. 206(1–4), p. 147–164, DOI: 10.1016/j.margeo.2004.01.008.
- Tkach A.A., Tkach N.T., Zenina M.A. Stable oxygen isotopes in modern ostracods from the Caspian Sea, *J. Paleolimnol.*, 2024, vol. 72(2), p. 145–161, DOI: 10.1007/s10933-024-00321-3.
- Turpen J.B., Angell R.W. Aspects of molting and calcification in the ostracode *Heterocypris*, *Biol. Bull. Marine Biol. Laboratory*, 1971, vol. 140, p. 331–338, DOI: 10.2307/1540077.
- Urey H.C. The thermodynamic properties of isotopic substances, *J. Chem. Soc. (resumed)*, 1947, DOI: 10.1039/jr9470000562.
- Velivetskaya T.A., Ignatiev A.V., Gorbarenko S.A. Carbon and oxygen isotope microanalysis of carbonate, *Rapid Com-*

- mun. Mass Spectrom.*, 2009, vol. 23, p. 231–239, DOI: 10.1002/rcm.3989.
- Xia J., Engstrom D.R., Ito E. Geochemistry of ostracode calcite: part 1. an experimental determination of oxygen isotope fractionation, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1997a, vol. 61, p. 377–382, DOI: 10.1016/S0016-7037(96)00351-1.
- Xia J., Engstrom D.R., Ito E. Geochemistry of ostracode calcite, part 2, The effect of water chemistry and seasonal temperature variation on *Candona rawsoni*, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1997b, vol. 61, p. 383–391, DOI: 10.1016/S0016-7037(96)00354-7.
- Yanina T.A. The Ponto-Caspian region: Environmental consequences of climate change during the Late Pleistocene, *Quaternary International*, 2014, vol. 345, p. 88–99, DOI: 10.1016/j.quaint.2014.01.045.

Поступила в редакцию 22.08.2024

После доработки 10.09.2024

Принята к публикации 15.10.2024

VITAL ISOTOPIC $\delta^{18}\text{O}$ OFFSET IN OSTRACODS OF THE CASPIAN SEA REGION

A.A. Tkach¹, N.T. Tkach², M.A. Zenina³, T.A. Yanina⁴

^{1,4} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Recent Deposits and Pleistocene Palaeogeography

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Department of Oil and Gas Sedimentology and Marine Geology

³ P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Science, Laboratory of Paleooceanology

¹ Junior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: tkachaa@my.msu.ru

² Engineer; e-mail: tkachgeo@gmail.com

³ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: maria_zenina@mail.ru

⁴ Professor, Head of the Laboratory, D.Sc. in Geography; e-mail: paleo@inbox.ru

The paper examines the stable oxygen isotope values for six most abundant ostracod taxa in present-day Caspian Sea bottom sediments from 33 sampling sites. The oxygen isotopic composition of Caspian ostracod shells was found to reflect metabolic effects related to their life cycle. The average $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ value ($\pm$ standard deviation) for each species is as follows: $-0,11\text{‰}$ ($\pm 0,7$) for *Euxinocythere virgata*, $-0,25\text{‰}$ ($\pm 1,14$) for *Tyrrhenocythere amnicola donetziensis*, $+2,94\text{‰}$ ($\pm 0,16$) for *Candona schweyeri*, $+1,55\text{‰}$ ($\pm 1,12$) for *Paracyprideis* sp., $+1,77\text{‰}$ ($\pm 0,22$) for *Bakunella dorsoarcuata* and $+2,45\text{‰}$ ($\pm 0,95$) for *Camptocypria* sp. The results obtained confirmed that Caspian ostracods do not secrete their carapace in equilibrium with the surrounding water. Rather, the studied species showed a positive vital offset – the observed effect averaged about 1‰ ($\pm 0,5$). The desired isotopic shift for the mixed ostracod assemblage turned out to be equivalent to the average isotopic shift for the studied sample and amounted to $+1\text{‰}$ ($\pm 0,5$). The work demonstrates that ostracod metabolic processes cause shifts in the expected fractionation of oxygen isotopes between CaCO_3 and water. The resulting isotope offsets must be taken into account in paleogeographic studies for correct interpretation of paleoclimatic changes in the Caspian Sea region using the stable oxygen isotope record.

Keywords: $\delta^{18}\text{O}$, stable isotope geochemistry, oxygen isotope analysis, metabolic effects

Acknowledgements. The research was financially supported by the Russian Science Foundation (project 24-77-00011).

REFERENCES

- Berdnikova A.A. Problemy izotopnoi paleotermometrii dlya Kaspiiskogo morya [Isotope palaeothermometry problems for the Caspian Sea], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2021, no. 6, p. 51–61. (In Russian)
- Berdnikova A.A., Dzhavadova A. Metodika podgotovki ostrakod dlya izotopno-kislородного analiza v Kaspiiskom regione [Stable oxygen analysis pre-treatment technique for ostracods in the Caspian region], *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2022, vol. 11, no. 17(174), p. 162–166, DOI: 10.25633/ETN.2022.11.15. (In Russian)
- Bornemann A., Pirkenseer C.M., De Deckker P., Speijer R.P. Oxygen and carbon isotope fractionation of marine ostracod calcite from the eastern Mediterranean Sea, *Chem. Geol.*, 2012, vol. 310(311), p. 114–125, DOI: 10.1016/j.chemgeo.2012.03.028.
- Chivas A.R., De Deckker P., Shelley J.M.G. Magnesium, strontium and barium partitioning in non-marine ostracod shells and their use in paleoenvironmental reconstructions – a preliminary study, *Applications of Ostracoda*, R.F. Maddocks (ed.), Houston, University of Houston, 1983, p. 238–249.
- Decrouy L., Vennemann T.W. Potential influence of the chemical composition of water on the stable oxygen isotope composition of continental ostracods, *J. Paleolim-*

- mol.*, 2013, vol. 50, p. 577–582, DOI: 10.1007/s10933-013-9719-5.
- Decrouy L., Vennemann T.W., Ariztegui D. Controls on ostracod shell geochemistry, part 2, Carbon and oxygen isotope composition, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, vol. 75, p. 7380–7399, DOI: 10.1016/j.gca.2011.09.008.
- Devriendt L.S., McGregor H.V., Chivas A.R. Ostracod calcite records the $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratio of the bicarbonate and carbonate ions in water, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2017, vol. 214, p. 30–50, DOI: 10.1016/j.gca.2017.06.044.
- Didie C., Bauch H.A. Implications of upper Quaternary stable isotope records of marine ostracodes and benthic foraminifers for paleoecological and paleoceanographical investigations, *The Ostracoda: Applications in Quaternary Research Geophysical Monograph Series American Geophysical Union*, J.A. Holmes, A.R. Chivas (eds.), Washington DC, 2002, p. 279–299, DOI: 10.1029/131GM15.
- Epstein S., Buchsbaum R., Lowenstam H.A., Urey H.C. Revised carbonate-water isotopic temperature scale, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1953, vol. 64, p. 13–15, DOI: 10.1130/0016-7606(1953)64[1315:RCITS]2.0.CO;2.
- Erlenkeuser H., Grafenstein von U. Stable oxygen isotope ratios in benthic carbonate shells of Ostracoda, Foraminifera, and Bivalvia from surface sediments of the Laptev Sea, summer 1993 and 1994, *Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic*, H. Kassens et al. (ed.), Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1999, p. 503–514, DOI: 10.1007/978-3-642-60134-7_39.
- Ferronskii V.I., Polyakov V.A., Kuprin P.N., Lobov A.L. Priroda kolebaniya urovnya Kaspiiskogo morya (po rezul'tatam izucheniya donnykh osadkov) [Nature of the Caspian Sea Level Fluctuations (Based on the Results of Bottom Sediment Studies)], *Vodnye resursy*, 1999, vol. 26, no. 6, p. 652–666. (In Russian)
- Ferronskii V.I., Polyakov V.N., Kuprin A.P., Vlasova L.S. Hydrotrillite as a bioindicator of paleohydrological and paleoclimatic processes in the Caspian Basin, *Water Resources*, 2014, vol. 41(4), p. 473–487, DOI: 10.1134/S009780781404006X.
- Froehlich K., Rozanski K., Povinec P. et al. Isotope studies in the Caspian Sea, *Sci. Total Environ.*, 1999, vol. 237(238), p. 419–427, DOI: 10.1016/S0048-9697(99)00154-0.
- Furman T.I. [On the Characteristics of Bottom Waters of the Middle and Southern Caspian Sea], *Trudy In-ta geografii AN Az. SSR* [Proc. of the Institute of Geography of the Academy of Sciences of the Azerbaijan SSR], 1961, vol. 1, p. 15–23. (In Russian)
- Gemery L., Cooper L.W., Magen C. et al. Stable oxygen isotopes in shallow marine ostracodes from the northern Bering and Chukchi Seas, *Mar. Micropaleontol.*, 2022, vol. 165, 101979, DOI: 10.1016/j.marmicro.2021.102001.
- Ginzburg A.I., Kostyanov A.G., Serykh I.V., Lebedev S.A. Klimaticheskie izmeneniya gidrometeorologicheskikh parametrov Kaspiiskogo morya (1980–2020) [Climate-induced changes in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea (1980–2020)], *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, vol. 18, no. 5, p. 277–291, DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291. (In Russian)
- Gofman E.A. *Izucheniye ekologiy ostrakod i foraminifer solonovatovodnykh i presnovodnykh basseynov. Kaspiiskoe more: Okonchatel'nyi otchet* [Study of ecology of ostracods and foraminifers from brackish and fresh water bodies. The Caspian Sea: Final Report], Moscow, Institute of Geology and Development of Fossil Fuels Publ., 1964, 351 p. (In Russian)
- Gorbarenko S.A. *Primeneniye izotopnogo kislorodnogo analiza dlya tselei paleogeograficheskogo analiza* [Application of the oxygen isotope analysis for paleogeographical studies], Ph.D. Thesis in Geography, Moscow, 1972, 147 p. (In Russian)
- Holmes J.A., De Deckker P. The chemical composition of ostracod shells, *Ostracoda as Proxies for Quaternary Climate Change. Developments in Quaternary Sciences*, D.J. Horne et al. (eds.), Washington DC, 2012, p. 131–143, DOI: 10.1016/B978-0-444-53636-5.00008-1.
- Horne D.J. Life-cycles of podocypid Ostracoda – a review (with particular reference to marine and brackish-water species), *Applications of Ostracoda*, Proceedings of the Eighth International Symposium on Ostracoda, R. Madocks (ed.), University of Houston, Dept. of Geosciences, Houston, Texas, 1983, p. 581–590.
- Hut G. Consultants' group meeting on stable isotope reference samples for geochemical and hydrological investigations, 16–18.9.1985, *Report to the Director General*, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1987.
- Kaspiiskoe more: Gidrologiya i gidrokimiya* [The Caspian Sea: Hydrology and hydrochemistry], S.S. Baidin, A.N. Kosarev (eds.), Moscow, Nauka Publ., 1986, 261 p. (In Russian)
- Keatings K.W., Heaton T.H.E., Holmes J.A. Carbon and oxygen isotope fractionation in non-marine ostracods: results from a 'natural culture' environment, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2002, vol. 66, p. 1701–1711, DOI: 10.1016/S0016-7037(01)00894-8.
- Kim S.T., O'Neil J.R. Equilibrium and nonequilibrium oxygen isotope effects in synthetic carbonates, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1997, vol. 61, p. 3461–3475, DOI: 10.1016/S0016-7037(97)00169-5.
- Kozina N.V. *Mineral'nyi sostav donnykh otlozhenii i osobennosti sovremennogo osadkonakopleniya v Kaspiiskom more* [Mineral composition of bottom sediments and particular features of present-day sedimentation in the Caspian Sea], Ph.D. Thesis in Geology, Moscow, 2015, 245 p. (In Russian)
- Krijgsman W., Tesakov A., Yanina T. et al. Quaternary time scales for the Pontocaspian domain: interbasinal connectivity and faunal evolution, *Earth Sci. Rev.*, 2019, vol. 188, p. 1–40, DOI: 10.1016/j.earscirev.2018.10.013.
- Kvasov D.D. *Pozdnechetvertichnaya istoriya krupnykh ozer i vnutrennikh morei Vostochnoi Evropy* [Late Quaternary history of large lakes and inland seas of Eastern Europe], Leningrad, Nauka Publ., 1975, 278 p. (In Russian)
- Lebedev S.A., Kostyanov A.G., Ginzburg A.I. [Dynamics of the Caspian Sea based on instrumental measurements, modeling results and remote sensing data], *III Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Prikladnye aspekty geologii, geofiziki i geoekologii s ispol'zovaniem sovremennykh informatsionnykh tekhnologii"* [III International Scientific and Practical Conference "Applied Aspects of Geology, Geophysics and Geoecology Using Modern Information Technologies"], 2015, p. 146–179. (In Russian)
- Mazzini I. Taxonomy, biogeography and ecology of Quaternary benthic Ostracoda (Crustacea) from circumpolar deep water of the Emerald Basin (Southern Ocean) and the S Tasman rise (Tasman Sea), *Senckenberg. Marit.*, 2005, vol. 35(1), p. 1–119, DOI: 10.1007/BF03043180.

- Nikolaev S.D. *Izotopnaya paleogeografiya vnutrikontinental'nykh morei* [Isotope paleogeography of inland seas.], Moscow, Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanology Publ., 1995, 127 p. (In Russian)
- O'Neil J.R., Clayton R.N., Mayeda T.K. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates, *J. Chem. Phys.*, 1969, vol. 51, p. 5547–5558, DOI: 10.1063/1.1671982.
- Grafenstein von U., Erlernkeuser H., Trimborn P. Oxygen and carbon isotopes in modern fresh-water ostracod valves: assessing vital offsets and autecological effects of interest for palaeoclimate studies, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 1999, vol. 148(1–3), p. 133–152, DOI: 10.1016/S0031-0182(98)00180-1.
- Rychagov G.I. *Pleistotsenovaya istoriya Kaspiiskogo morya* [Pleistocene history of the Caspian Sea], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1997, 267 p. (In Russian)
- Simstich J., Stanovoy V., Bauch D. et al. Holocene variability of bottom water hydrography on the Kara Sea shelf (Siberia) depicted in multiple single-valve analyses of stable isotopes in ostracods, *Mar. Geology*, 2004, vol. 206(1–4), p. 147–164, DOI: 10.1016/j.margeo.2004.01.008.
- Svitoch A.A. [Fluctuations in the Caspian Sea level in the Pleistocene (classification and systematic description)], *Kaspiiskoe more. Paleogeografiya i geomorfologiya* [Caspian Sea. Paleogeography and geomorphology], Moscow, Nauka Publ., 1991, 5–100 p. (In Russian)
- Tkach A.A., Tkach N.T., Zenina M.A. Stable oxygen isotopes in modern ostracods from the Caspian Sea, *J. Paleolimnol.*, 2024, vol. 72(2), p. 145–161, DOI: 10.1007/s10933-024-00321-3.
- Turpen J.B., Angell R.W. Aspects of molting and calcification in the ostracode *Heterocypris*, *Biol. Bull. Marine Biol. Laboratory*, 1971, vol. 140, p. 331–338, DOI: 10.2307/1540077.
- Tuzhilkin V.S., Kosarev A.N., Trukhchev D.I., Ivanova D.P. Sezonnye osobennosti obshchei tsirkulyatsii vod glubokovodnoi chasti Kaspiiskogo morya [Seasonal Features of General Circulation of Waters in the Deep-Water Part of the Caspian Sea], *Meteorologiya i gidrologiya*, 1997, no. 1, p. 91–99 (In Russian)
- Urey H.C. The thermodynamic properties of isotopic substances, *J. Chem. Soc. (resumed)*, 1947, DOI: 10.1039/jr9470000562.
- Velivetskaya T.A., Ignatiev A.V., Gorbarenko S.A. Carbon and oxygen isotope microanalysis of carbonate, *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, 2009, vol. 23, p. 231–239, DOI: 10.1002/rcm.3989.
- Xia J., Engstrom D.R., Ito E. Geochemistry of ostracode calcite: part 1, An experimental determination of oxygen isotope fractionation, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1997a, vol. 61, p. 377–382, DOI: 10.1016/S0016-7037(96)00351-1.
- Xia J., Engstrom D.R., Ito E. Geochemistry of ostracode calcite, part 2, The effect of water chemistry and seasonal temperature variation on *Candona rawsoni*, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1997b, vol. 61, p. 383–391, DOI: 10.1016/S0016-7037(96)00354-7.
- Yanina T.A. *Neopleistotsen Ponto-Kaspiya: biostratigrafiya, paleogeografiya, korrelyatsiya* [Neopleistocene of the Ponto-Caspian basin: biostratigraphy, paleogeography, correlation], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2012, 264 p. (In Russian)
- Yanina T.A. The Ponto-Caspian region: Environmental consequences of climate change during the Late Pleistocene, *Quaternary International*, 2014, vol. 345, p. 88–99, DOI: 10.1016/j.quaint.2014.01.045.

Received 22.08.2024

Revised 10.09.2024

Accepted 15.10.2024

ДИНАМИКА ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 556.512

СВЯЗЬ МЕЖДУ ОСАДКАМИ, РЕЧНЫМ СТОКОМ И ИСПАРЯЕМОСТЬЮ
НА ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ И ЕЕ ИЗМЕНЧИВОСТЬВ.Ю. Григорьев¹, Н.Л. Фролова², А.А. Сазонов³, О.М. Пахомова⁴, С.П. Поздняков⁵, Ван Пин⁶¹⁻⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
кафедра гидрологии суши^{1,3} Институт водных проблем Российской академии наук⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра гидрогеологии⁶ Институт географических наук и исследований природных ресурсов, Китайская академия наук¹ Науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: vadim308g@mail.ru² Проф., д-р геогр. наук; e-mail: frolova_nl@mail.ru³ Ст. преподаватель, канд. геогр. наук; e-mail: sazonov.lesha@gmail.com⁴ Науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: olpah@mail.ru⁵ Проф., д-р геол.-минерал. наук; e-mail: sppozd@mail.ru⁶ Проф., канд. геол.-минерал. наук; e-mail: wangping@igsnr.ac.cn

Для 225 водосборов, расположенных на европейской части России (ЕЧР) севернее 48° с. ш. и не имеющих в своих границах крупных водохранилищ, было рассмотрено изменение годовых сумм осадков, испарения, речного стока и испаряемости за 1946–1979 и 1980–2021 гг. В целом на ЕЧР второй период отличается большими величинами всех составляющих водного баланса. Для северной части ЕЧР (главным образом бассейны арктических рек, а также бассейны рек верхней и средней Волги, Балтийского моря) был выявлен незначительный рост слоя стока, на южной половине ЕЧР преобладало снижение (реки бассейнов Дона, Урала, нижней Волги). Наиболее заметен был рост стока в средней полосе ЕЧР. При этом его рост для большинства водосборов опережал рост осадков – медианная величина коэффициента стока среди 225 водосборов выросла с 0,37 до 0,40. Через модифицированное уравнение Будыко для каждого водосбора была получена зависимость коэффициента стока от степени аридности климата, выражаемая через параметр ω , определяющий долю осадков, расходуемую на испарение при заданной величине индекса сухости. Для северной части ЕЧР зависимость не претерпела изменений, в центральной части трансформация осадков в сток стала эффективней, а в южной части, напротив, менее эффективной. Пространственное распределение параметра ω показало тесную, с коэффициентом детерминации более 0,76, связь степени синхронности наступления максимумов испаряемости и осадков, площади водосбора, занятой лесом и оголенной почвой (территорией, не занятой растительным покровом), температуры воздуха в январе – феврале и долей твердых осадков в годовой сумме. Однако применение полученной зависимости для оценки изменения ω показало неудовлетворительные результаты. Вероятно параметры, определяющие изменчивость ω в пространстве, не определяют его изменчивость во времени. На основе оценки параметра ω за 1980–2021 гг. и климатических сценариев изменения слоя осадков и испаряемости была рассчитана величина изменения стока в XXI в. Ожидается, что сток большинства рек ЕЧР в XXI в. вырастет вне зависимости от сценария изменения климата. В среднем для 76% водосборов направленность изменения речного стока за 2020–2100 гг. будет совпадать с таковой за 1946–2021 гг. Прогнозная величина изменений будет также близка к наблюдаемой за 1946–2021 гг.

Ключевые слова: европейская часть России, водный баланс, годовой сток, формула Будыко, климатические изменения

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.5

ВВЕДЕНИЕ

Годовой сток рек (R) является наиболее точной оценкой возобновляемых водных ресурсов территории. Одним из регионов, где его изменения за последние десятилетия были наиболее заметными,

является ЕЧР [Фролова и др., 2022]. Наблюдаемое изменение климата в целом для ЕЧР привело к росту водных ресурсов за счет роста количества осадков. Однако, этот рост был выявлен главным образом для северной половины ЕЧР, не являющейся

вододефицитным районом. Для ряда рек юга ЕЧР, главным образом бассейна Дона, преобладала тенденция к снижению годового стока. Наибольшие различия были выявлены для объемов стока до и после 1978 и 1985 гг. Однако зачастую изменения не носили монотонный характер. Так, максимум стока в бассейне Волги наблюдался в 1990-х гг.

Результаты гидрологического моделирования показывают, что тенденция к росту годового стока рек может смениться снижением уже при росте глобальной температуры воздуха на 1,5 и 2°C относительно доиндустриального уровня [Калугин, 2023]. Так, сток Волги и Северной Двины может уменьшиться на 10–11%, а Дона – на 21–24%. Из крупных речных бассейнов рост R прогнозируется лишь для бассейна Печоры – на 5–7%. Использование гидрологических моделей для оценки текущих и будущих изменений годового стока на ЕЧР имеет ряд ограничений: отсутствие в открытом доступе рядов суточных наблюдений за расходами воды, низкая плотность сети метеостанций, относительно низкая детальность и точность баз данных по свойствам почвы, растительного покрова и рельефа. Эти факторы снижают как пространственный охват, так и доступный временной диапазон для калибровки и валидации моделей.

Одним из методов исследования изменения годового стока рек и факторов, его определяющих, является уравнение Будыко и связанные с ним методы, получившие заметное развитие в последние годы благодаря созданию глобальных баз данных о климате и свойствах подстилающей поверхности [Gan et al., 2021]. Упрощенное представление процесса формирования стока в виде эмпирической зависимости позволяет существенно сократить требования по детальности исходной информации, что дает возможность проводить оценки изменения стока на уровне малых и средних водосборов для районов, не обеспеченных достаточной густотой сети метеорологических наблюдений и сведениями о свойствах подстилающей поверхности.

В этой работе мы предполагаем, что средне-многолетние величины осадков (P) и потенциального испарения (PET) в рамках метода уравнения Будыко могут достоверно воспроизводить прошлые и будущие изменения годового стока рек и испарения (E). Основными задачами являются: 1) выявление изменения составляющих водного баланса рек ЕЧР за два исторических периода 1946–1979 и 1980–2021 гг.; 2) оценка возможности экстраполяции параметра в уравнении Будыко, оцененного по одному периоду, на другой период; 3) оценка изменения речного стока рек ЕЧР в XXI в. при различных сценариях изменения климата.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Использовались данные о годовом стоке рек на 225 постах (рис. 1) в пределах ЕЧР за 1946–2021 гг., расположенных северней 48° с. ш. и не зарегулированных крупными водохранилищами. Средняя продолжительность наблюдений составила 73,6 года. Площадь водосборов изменялась от 2000 до 348 000 км². Средняя и медианная площади составили 22,4 тыс. км² и 6725 км² соответственно. Минимальный коэффициент вариации годового стока оказался равен 0,1, а максимальный – 1,14.

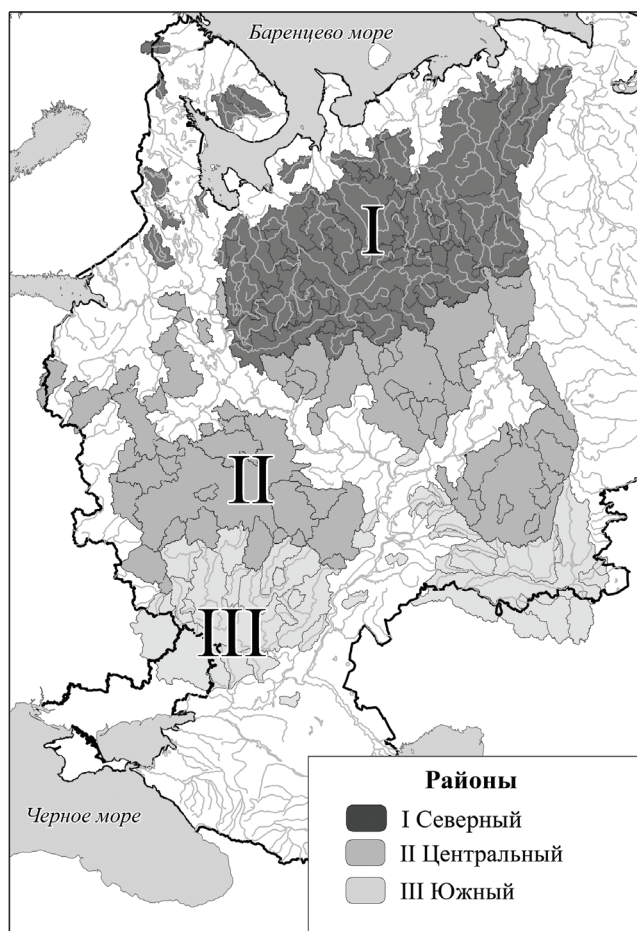


Рис. 1. Район исследований

Fig. 1. Studied area

Для расчета PET за 1946–2021 гг. использовались данные реанализа ERA5 [Григорьев и др., 2022] по минимальной (t_n) и максимальной (t_x) суточным температурам воздуха. Данные о t_n и t_x использовались для расчета величин потенциального испарения согласно формуле [Hargreaves, Samani, 1982]:

$$PET = aH_0(t_{\text{mean}} + 17,8)(t_x - t_n)^{0,5}, \quad (1)$$

где PET – величина потенциального испарения, мм/сут; t_{mean} – средняя температура воздуха за сутки, H_0 – радиация на внешней границе атмосферы, вы-

раженная через теплоту парообразования, мм/сут., a – коэффициент, в среднем равный 0,0023. Данные ERA5 имеют систематическую ошибку, а коэффициент a в формуле (1) также может несколько отличаться от 0,0023. Кроме того, пространственное разрешение данных ERA5 составляет 0,25°, т. е. около 600 км² или порядка трех узлов сетки на водосбор минимальной площади, рассматриваемой в работе. По этим причинам рассчитанные по данным ERA5 величины PET могут иметь существенную систематическую ошибку. Для устранения систематической ошибки в рядах *осадков и температуры воздуха* (взяты из ERA5) использовались данные WorldClim 2 [Fick, Hijmans, 2017]. WorldClim 2 предоставляет усредненные за 1970–2000 гг. среднемесячные величины в узлах в 30" сетки. WorldClim 2 был получен на основе данных наземных наблюдений, однако при их интерполяции использовались дистанционные данные. Для расчета систематической ошибки ERA5 в каждом из узлов 30" сетки ее данные были усреднены по времени и деагрегированы в пространстве до разрешения WorldClim 2. Систематическая ошибка ERA5 для осадков рассчитывалась как

$$P_{\Delta}^i = P_{ERA5}^i - P_{WorldClim}^i, \quad (2)$$

где $P_{WorldClim}^i$ – месячная норма осадков по данным WorldClim 2, P_{ERA5}^i – месячная норма осадков по данным ERA5 за i -й месяц. Аналогичным образом расчет производился для t_n , t_x и PET , с той разностью, что для PET в качестве истинных значений выступали данные Global-AI_PET_v3 [Zomer et al., 2022], рассчитанные с помощью уравнения Пенмана – Монтиса на основе данных WorldClim 2.

Для прогноза изменения R в XXI в. использовались величины P , t_n и t_x , полученные из сценариев CMIP 6 с устраненной систематической ошибкой на основе данных WorldClim 2 [CMIP 6..., 2023]. Рассчитанные величины PET корректировались по данным Global-AI_PET_v3 согласно (2). Использовались данные для четырех базовых периодов (2021–2040, 2041–2060, 2061–2080, 2081–2100), четырех климатических моделей (GFDL-ESM4, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6) и четырех сценариев развития (SSPs (Shared Socioeconomic Pathways): 1-й – 2.6, 2-й – 4.5, 3-й – 7.0 и 4-й – 8.5). При дальнейшей работе результаты расчета по четырем климатическим моделям усреднялись. Выбранные модели показывают наименьшую величину ошибки для ЕЧР и использовались в ряде исследований [Калугин, 2023; Kalugin, 2019].

В качестве источника информации о площади лесов, недревесной растительности и открытой почвы использовались спутниковые данные [Vegetation

Continuous Fields..., 2022]. В качестве цифровой модели рельефа использовалось Hydrography 90 m [Amatulli et al., 2022].

Метод Будыко заключается в представлении доли осадков, идущих на испарение и речной сток, как функции от осадков, потенциального испарения и параметра, учитывающего специфичную форму зависимости для конкретного водосбора [Bai et al., 2023]. Мы использовали не оригинальное уравнение Будыко, не имеющее параметров, а его модификацию:

$$R_i = P_i \left[1 + \left(\frac{PET_i}{P_i} \right)^{\omega_i} \right]^{\frac{1}{\omega_i}} - PET_i, \quad (3)$$

где ω – эмпирический параметр, i – индекс периода. Параметр ω определялся путем подбора (калибровки) по известным величинам P , PET и R для каждого водосбора по данным за 1980–2021 гг. (ω_2) и 1946–1979 гг. (ω_1).

Для того чтобы оценить вклад изменения среднесезонных величин P и PET в изменение R , по формуле (3) была рассчитана величина $R_2^{P, PET}$ – величина стока, которая наблюдалась бы при среднесезонных величинах второго периода (P_2 и PET_2), но всех прочих факторах, интегрально описываемых параметром ω , первого периода:

$$R_2^{P, PET} = P_2 \left[1 + \left(\frac{PET_2}{P_2} \right)^{\omega_1} \right]^{\frac{1}{\omega_1}} - PET_2. \quad (4)$$

Вклад изменения ω в изменение R рассчитывался как

$$\Delta R_{\omega, \%} = 100 \cdot \left(\frac{|R_2 - R_2^{P, PET}|}{|R_2 - R_2^{P, PET}| + |R_2^{P, PET} - R_1|} \right), \quad (5)$$

где числитель – вклад изменения ω в изменение R ($R_2 - R_1$), второе слагаемое в знаменателе – вклад изменения PET и P в изменение R .

Значение ω может меняться во времени в результате изменения особенностей внутригодового распределения осадков и потенциального испарения, растительного покрова и типа землепользования [Григорьев и др., 2020]. Для оценки ω при отсутствии данных наблюдений за R были получены зависимости между ω и рядом параметров водосбора:

1) модифицированным коэффициентом сезонности климата SAI , равным

$$SAI = \left(\delta_P^2 - 2\delta_P\delta_{PET}DI \cos\left(\frac{\pi}{6}(S_P - S_{PET})\right) + (\delta_{PET}DI)^2 \right)^{1/2}, \quad (6)$$

где δ_p , δ_{PET} , S_p и S_{PET} находятся как коэффициенты уравнений;

$$P(t) = \bar{P} \cdot \left[1 + \delta_p \sin \left(\frac{\pi}{6} (t - S_p) \right) \right], \quad (7)$$

$$PET(t) = \overline{PET} \cdot \left[1 + \delta_{PET} \sin \left(\frac{\pi}{6} (t - S_{PET}) \right) \right], \quad (8)$$

где $P(t)$ и $PET(t)$ – среднегодовое сезонное значение P и PET , $\bar{P}$ и $\overline{PET}$ – среднегодовые величины P и PET , δ_p и δ_{PET} – параметры, отражающие сезонную амплитуду колебаний, S_p и S_{PET} – параметры сдвига, отражающие время наступления максимумов и минимумов P и PET относительно границ года, DI – индекс сухости, равный $PET/\bar{P}$;

2) топографическим индексом увлажненности (CTI):

$$CTI = \ln \frac{a}{\operatorname{tg} b}, \quad (9)$$

где a – площадь площадки (ячейки раstra), $\operatorname{tg} b$ – тангенс угла наклона площадки. Для водосбора CTI рассчитывался как среднее между всеми ячейками раstra в его пределах;

3) долей площади водосбора, занятой лесами ($A_{лес}$), недревесной растительностью ($A_{куст}$) и оголенной почвой ($A_{огол}$);

4) средней температурой воздуха за январь – февраль T_{I-II} ;

5) долей твердых осадков в годовой сумме осадков $P_{тв}$.

Для получения зависимости между ω и вышеперечисленными параметрами водосборов (SAI , CTI , $A_{лес}$, $A_{куст}$, $A_{огол}$, T_{I-II} , $P_{тв}$) использовались различные методы, такие как обычная множественная линейная регрессия (OLSR), регрессия частично наименьших квадратов (PLSR), дерево решений (DT), дерево решений с предварительным выделением главных компонент (DT_PCA), случайный лес (RF), градиентный бустинг (GB) [James et al., 2023; Жерон, 2020]. При этом для OLSR рассматривались все возможные комбинации переменных, таким образом, для OLSR составлялось $2^{7+1} - 1 = 127$ уравнений. Для PLSR рассматривалось семь уравнений (использовалось до семи главных компонент). Оценка параметров производилась по данным за 1980–2021 гг. Для оценки точности использовалась кросс-валидация. Модель обучалась на 90% данных, а оценка точности выполнялась по оставшимся 10%. Эта процедура повторялась 10 раз, после чего полученные оценки ошибок усреднялись. Отклонение от полученной зависимости для каждого водосбора имеют как систематическую, так и случайную составляющие. Поскольку случайная ошибка в среднем равна 0, систематическая составляющая может быть оценена как величина

ошибки за 1980–2021 гг. Эта величина вносилась как поправка при расчете ω за 1946–1979 гг. В качестве базового периода для расчета ω был принят 1980–2021 гг., а не 1946–1979 гг. как при расчете изменения водного баланса. Это связано с большей продолжительностью второго периода и с тем, что используемые данные о растительном покрове относятся к периоду после 1979 г.

В качестве параметров точности использовались абсолютная систематическая ошибка ($bias$), относительная систематическая ошибка ($ubias$, %), абсолютная случайная ошибка (std), относительная случайная ошибка ($ustd$, %), равные соответственно

$$bias = \overline{\omega_{расч}} - \overline{\omega_{ист}}, \quad (10)$$

$$ubias = 100\% \cdot \left(\overline{\omega_{расч}} - \overline{\omega_{ист}} \right) / \overline{\omega_{ист}}, \quad (11)$$

$$std = \sqrt{\left(\overline{\omega_{расч}} - \overline{\omega_{ист}} \right)^2}, \quad (12)$$

$$ustd = 100\% \cdot \sqrt{\left(\left(\overline{\omega_{расч}} - \overline{\omega_{ист}} \right) / \overline{\omega_{ист}} \right)^2}, \quad (13)$$

где верхняя черта обозначает оператор осреднения, $\omega_{расч}$ – ω – рассчитана по статистической модели, $\omega_{ист}$ – рассчитана обратным пересчетом через P , PET и R . Испарение (E) определялось по уравнению водного баланса за многолетний период как разность между P и R .

Значимость изменений речного стока, осадков и испаряемости выполнялась с помощью критерия Стьюдента. Для испарения, в силу отсутствия временного ряда по нему, значимость изменений не оценивалась.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение водного баланса рек ЕЧР. По данным измерений период 1980–2021 гг. на ЕЧР отличается большей водностью по сравнению с 1946–1979 гг. При этом для рек северной части ЕЧР рост стока практически повсеместный, в то время как для южной половины (Дон, Урал, Днепр) присутствуют области как пониженного, так и повышенного стока (табл. 1).

Сток рек Кольского полуострова вырос на 10–20%, однако в силу его существенной зарегулированности озерами и водохранилищами для этого региона выводы о статистической значимости изменений требуют дальнейшего уточнения. В замыкающих створах Северной Двины и Онеги изменения годового стока практически не произошло. В бассейне Северной Двины размах изменения R составил от –2% в бассейне р. Ваги до +25% в бассейне р. Лузы.

Таблица 1

Среднемноголетние (1946–1979) величины осадков (P), испарения (E), потенциального испарения (PET), речного стока (R) на ряде водосборов ЕЧР, а также их изменение за 1980–2021 гг.

Бассейн	Река – пост	Площадь, км ²	P		E		PET		R	
			Сред- нее, мм	Изме- нение, %	Сред- нее, мм	Изме- нение, %	Сред- нее, мм	Изме- нение, %	Сред- нее, мм	Изме- нение, %
Кольский п-ов	Поной –Каневка	10 200	462	7,1	125	–1,9	480	3,2	337	10,5
	Варзуга –Варзуга	7940	436	10,0	128	–10,5	501	3,3	308	18,5
	Чирко-Кемь –Юшкозеро	8220	532	11,5	235	2,2	593	4,2	297	18,8
Онега	Онега –Череповская	29 500	597	4,1	305	3,5	629	5,2	292	4,4
Северная Двина	Луза –Красавино	16 300	565	7,5	321	–6,0	701	4,3	244	25,1
	Северная Двина – Усть-Пинега	348 000	563	5,3	274	8,2	627	4,6	289	2,5
	Вага –Филяевская	13 200	602	3,2	332	7,3	630	5,6	269	–2,0
Между Северной Двиной и Печорой	Сояна-Сояна	5570	473	6,2	162	18,4	539	3,5	310	–0,1
	Мезень – Малонисогорская	56 400	573	2,0	205	10,0	579	4,1	368	–2,4
	Пеза –Игумново	12 000	527	2,4	203	–6,9	553	3,9	324	8,0
	Пеша –Волоковская	2780	488	6,0	98	–22,1	512	3,7	389	13,1
Печора	Ижма – Усть-Ухта	15 000	599	6,2	285	–0,5	591	3,9	313	12,2
	Печора – Усть-Цильма	248 000	564	5,3	123	7,4	542	4,8	441	4,7
Балтийское море	Сороть – Осинкино	3170	616	7,7	425	–4,7	720	5,3	191	35,3
	Великая –Пятоново	20 000	577	8,6	377	2,4	731	5,4	199	20,4
	Оять – Акулова-Гора	4830	685	4,9	361	–3,0	651	5,1	338	9,0
Верхняя Волга	Кема – Левково	4160	587	5,5	384	–6,7	645	5,4	205	27,5
	Волга – Старица	21 100	590	9,9	370	2,2	703	5,6	220	22,8
	Унжа-Кологрив	11 500	570	5,0	305	6,0	663	5,9	265	3,9
Ока	Выша – 10-й Октябрь	2190	482	6,0	437	–15,5	851	4,9	89	59,5
	Ока – Горбатов	244 000	521	7,1	368	5,9	783	5,3	153	10,2
	Ока – Беляев	17 500	554	4,4	413	6,9	814	5,1	141	–2,9
Кама	Вятка – Вятские Поляны	124 000	526	8,8	303	1,5	751	4,0	224	18,7
	Белая – Бирск	121 000	509	4,4	296	4,1	806	3,6	214	4,7
	Чермасан – Новоюмраново	3570	449	1,8	392	–6,1	860	4,3	62	44,3
	Чусовая – Староуткинский	5450	534	5,0	374	8,8	730	3,7	160	–3,9
Средняя и нижняя Волга	Ветлуга – Ветлужский	27 500	554	6,6	325	1,2	716	5,4	229	14,3
	Самара – Елшанка	22 800	371	5,9	302	7,2	1041	4,6	70	0,2
	Большой Кинель – Тимашево	12 000	456	4,7	357	3,7	953	4,5	98	8,4
	Большой Караман – Советское	3470	363	7,2	344	9,7	1159	3,1	19	–37,9
Дон	Красивая Меча – Ефремов	3240	508	4,7	389	–5,9	924	4,7	137	21,7
	Дон – Беляевский	204 000	459	5,7	375	8,0	946	4,9	84	–4,9
	Есауловский Аксай – Водянский	2110	313	10,4	289	13,6	1183	4,3	28	–41,1
Урал	Жарлы – Адамовка	2490	285	7,1	237	4,2	1009	2,8	48	21,4
	Урал – Кушум	190 000	323	5,0	272	5,7	1080	3,6	51	5,8
	Орь – Истемес	13 000	245	13,0	228	15,6	1211	2,4	17	–20,3
Черное море	Днепр – Дорогобуж	6390	587	9,5	377	2,3	721	5,4	210	22,4
	Десна – Брянск	13 700	567	8,1	387	12,7	762	5,1	180	–1,7
	Сейм – Рыльск	18 100	571	2,5	445	8,1	865	4,5	126	–22,2

Примечание. Курсивом выделено изменение, статистически значимое по критерию Стьюдента на 5%-ном уровне. Для E оценка значимости не выполнялась.

Изменение стока согласуется с изменением слоя осадков и потенциального испарения по направлению (водосборы с большим ростом P и меньшим ростом PET отличаются наибольшим ростом R), однако размах изменений слоев осадков и стока значительно отличается. Величина изменения стока рек арктического побережья близка к 0% к западу от р. Мезени и порядка 10–15% к востоку. Сток р. Печоры вырос в среднем на 5%.

Наибольшее увеличение R было выявлено в средней полосе ЕЧР, на реках бассейна Балтийского моря, верхней Волги и Вятки, где оно составило 20–30%. Этот же район отличается значимым ростом слоя осадков. Для бассейнов рек Оки и Белой также был выявлен рост стока, в среднем на 5–10%, со значимой пространственной изменчивостью. Для района средней и нижней

Волги, а также Дона в целом характерно снижение R , на отдельных водосборах достигающее 30–40%, связанное в первую очередь со снижением стока половодья [Варенцова и др., 2021]. Однако, из-за разнонаправленности изменений на малых и средних реках, уменьшение стока крупных рек не столь существенно. Так, сток р. Дон у х. Беляевского уменьшился лишь на 5%. Сток многих рек бассейнов Днепра и Урала претерпел существенные изменения, превышающие 20%. При этом в среднем для этих территорий величина речного стока не изменилась.

В целом рост R в относительном выражении превышал рост P , что выражается в росте коэффициента стока. Так, если его медианная величина за первый период составила 0,37, то за второй период она достигла 0,40 (рис. 2).

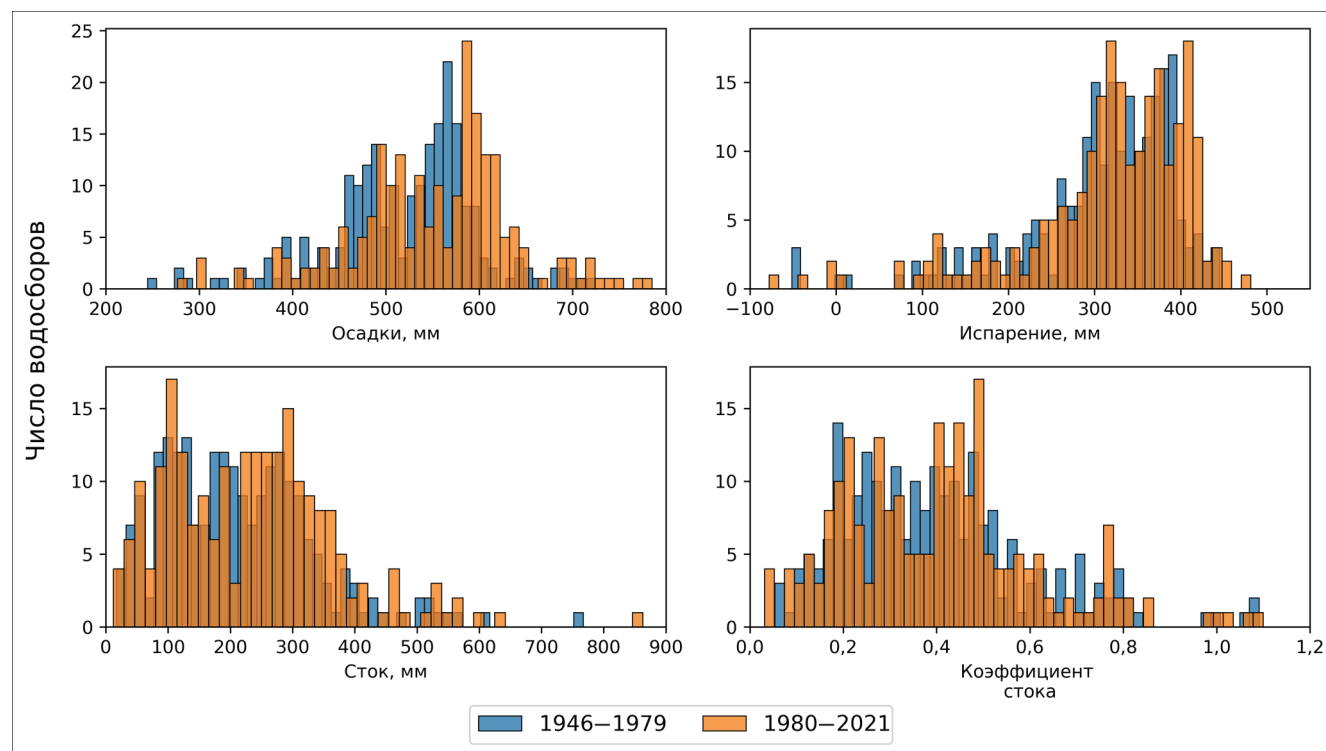


Рис. 2. Распределение числа водосборов на ЕЧР по величине слоя осадков, испарения, речного стока и коэффициента стока за 1946–1979 и 1980–2021 гг.

Fig. 2. Distribution of the catchments in the ER in terms of precipitation, evaporation, streamflow and runoff coefficient for 1946–1979 and 1980–2021

Медианная, рассчитанная по P , PET и R величина ω за второй период составила 1,80, уменьшившись с 1,84 за первый. Таким образом, рост стока за 1980–2021 гг. связан не только с ростом количества осадков, но и с уменьшением параметра ω . При этом на водосборах с наибольшим изменением R вклад ω в это изменение наибольший. Изменение ω по территории было неравномерным. Для рек бассейна Северного Ледовитого океана ω практи-

чески не изменилось, составив 1,48. Рост стока для этого региона связан главным образом с уменьшением индекса сухости $DI=PET/P$. Наиболее заметные изменения произошли для рек средней полосы ЕЧР – верхней Волги, Оки, Вятки, рек бассейна Балтийского моря и Днепра (рис. 3). Для этого региона заметно не только снижение индекса сухости, но и заметное уменьшение ω , в среднем с 1,81 до 1,76. Это выражается в заметном изменении слоя

стока, на 3,5% при неизменных P и PET . Для южной части ЕЧР (Дон, Урал, средняя и нижняя Волга) характерно увеличение индекса сухости и некоторый рост ω , в среднем с 2,12 до 2,14. Снижение ω в средней полосе ЕЧР и рост в южной могут быть связаны с различной глубиной промерзания почвы. Так, при глубине промерзания почвы менее 30 см, что характерно для южных районов ЕЧР, слой стока половиня становится мало зависим от величин запаса воды в снеге и в почве [Барабанов, Петелько, 2023].

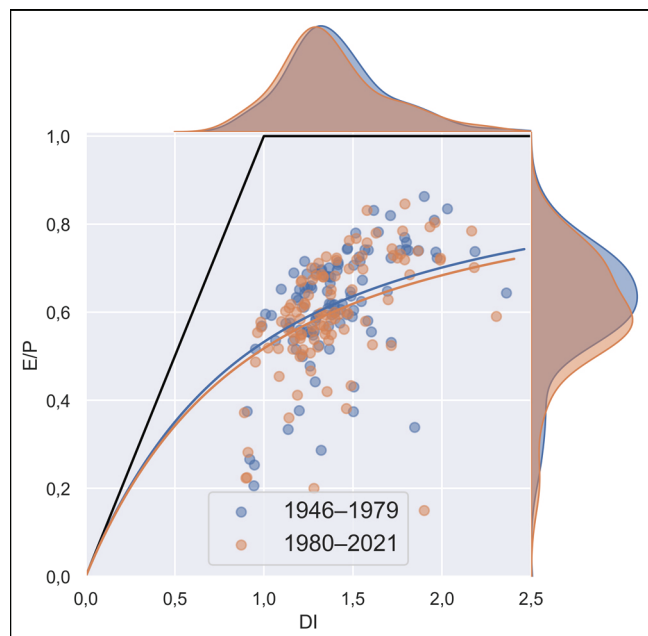


Рис. 3. Зависимость между отношением испарения (E) к осадкам (P) и индексом сухости (DI), обобщающая кривая $E/P = f(DI)$, а также их плотности распределения для бассейнов рек средней полосы ЕЧР за 1946–1979 и 1980–2021 гг.

Fig. 3. Relationship between evaporation (E) to precipitation (P) ratio and dryness index (DI), generalizing curve $E/P = f(DI)$, and their distribution densities for river basins of the middle zone of ER for 1946–1979 and 1980–2021

Однозначной связи между вкладом изменения параметра ω в величину изменение R выявлено не было, однако, чем больше изменение R , тем больший вклад в него вносит изменение ω (рис. 4). Максимальная величина изменения R , не сопровождаемая изменением ω , составляет порядка 13%. Дальнейший рост изменения R сопровождается практически линейным ростом ΔR_ω – при величине изменения R на более чем 40%, вклад изменения ω уже превышает 80%. Отметим, что используемая методика не учитывает возможность нестационарных систематических и случайных ошибок в рядах речного стока и, таким образом, изменения в величине ошибок включаются в изменения речного стока, связанные с ω .

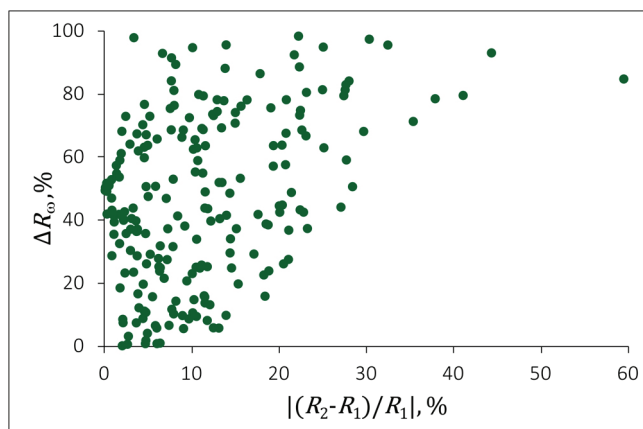


Рис. 4. Связь между вкладом изменения параметра ω (согласно (5)) и величиной изменения речного стока, выраженной в процентах и взятой по модулю $|(R_2 - R_1)/R_1|$

Fig. 4. Relationship between the contribution of the ω parameter change (according to (5)) and the magnitude of streamflow change, expressed as a percentage and taken modulo $|(R_2 - R_1)/R_1|$

Зависимость ω от особенностей бассейна.

Оценка точности с помощью кросс-валидации выявила четыре метода расчета ω с практически идентичными результатами – OLSR (рис. 5), PLSR, RF и GB (табл. 2). OLSR показала наименьшую величину систематической ошибки, но RF и GB показали несколько меньшую величину случайной ошибки. PLSR как по величине систематической, так и по величине случайной ошибки немного уступает OLSR. Остальные DT и DT_PCA показали заметно меньшую точность. При этом все шесть методов показывают существенно меньшую точность по сравнению с использованием параметров ω , рассчитанных путем калибровки за первый период.

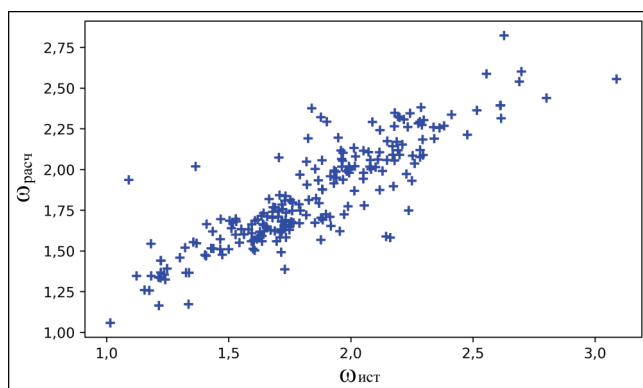


Рис. 5. Зависимость между рассчитанными с помощью OLSR ($\omega_{\text{расч}}$) и с помощью обратного пересчета ($\omega_{\text{ист}}$) величинами ω за 1980–2021 гг.

Fig. 5. The relationship between the OLSR-calculated and true values of ω for 1980–2021

Таблица 2

Оценка точности расчета параметра ω за 1946–1979 гг. различными методами

ω	$std(KB)$	Не скорректированные				Исправленная ω	
		$bias$	$bias, \%$	std	$std, \%$	std	$std, \%$
1980–2021	–	–0,009	–0,5	0,116	5,6	–	–
OLSR	0,178	–0,063	–2,6	0,180	9,8	0,124	6,2
PLSR	0,179	–0,068	–2,9	0,181	9,9	0,123	6,2
DT	0,198	–0,075	–3,5	0,206	11,2	0,194	10,7
DT_PCA	0,212	–0,076	–3,3	0,241	13,0	0,236	12,7
RF	0,179	–0,082	–3,8	0,168	9,0	0,131	6,7
GB	0,187	–0,073	–3,1	0,168	9,3	0,128	6,6

Примечание. OLSR – множественная линейная регрессия; PLSR – регрессия частично наименьших квадратов; DT – древо решений; DT_PCA – древо решений с предварительным выделением главных компонент; RF – случайный лес; GB – градиентный бустинг; 1980–2021 гг. – использование рассчитанных за 1980–2021 гг. значений ω ; KB – оценка, полученная с помощью кросс-валидации за 1980–2021 гг.; исправленная ω – ω с устраненной систематической ошибкой; $bias$ для скорректированной и нескорректированной оценок практически равны.

Корректировка результатов расчета по величинам систематической ошибки, полученным за 1980–2021 гг., существенно уменьшила ошибку расчета ω за второй период, при этом наибольший прирост точности был получен для OLSR и PLSR.

Полученное уравнение множественной линейной регрессии имеет вид:

$$\omega_{расч} = 3,28 + 0,62 \cdot SAI - 0,46 \cdot A_{лес} + 1,4 \cdot A_{огол} +$$
$$+ 45 \cdot 10^{-4} \cdot T_{I-II} - 7,14 \cdot P_{ТВ} . \tag{14}$$

Согласно (6) при росте разности в фазах колебаний PET и P , выражаемых через SAI , происходит рост потерь стока на испарение, что является типичным для мира в целом [Liu et al., 2018]. Отметим, однако, что полученная связь носит вероятностный характер. При наступлении максимумов P и PET в один и тот же сезон года испарение оказывается наибольшим, поскольку величина испарения одновременно не лимитирована количеством доступной влаги и тепла. Но поскольку районы с максимальными величинами SAI – это аридные районы, то большим величинам SAI соответствуют большие величины ω , что и было выявлено OLSR. Этим же, вероятно, объясняется положительная связь ω с площадью оголенной почвы и отрицательная – с площадью, занятой древесной растительностью, поскольку при прочих равных условиях испарение с территории, занятой лесом, как правило, выше и, соответственно, при $A_{лес}$ в (14) должен был бы стоять знак «+». Влияние климатических факторов, T_{I-II} и $P_{ТВ}$, на ω более закономерно. Рост зимних температур ведет к росту потерь талого стока на увлажнение почвы и заполнение бессточных понижений.

Рост доли твердых осадков в годовой сумме, напротив, ведет к росту доли талого стока, величина потерь на испарение которого, как правило, ниже, чем для дождевого. $P_{ТВ}$ и $A_{лес}$ являются главными факторами, определяющими изменчивость ω . Так, уравнение множественной регрессии, учитывающее эти две переменные, при кросс-валидации показывает ошибку в 0,2, что лишь на 11% больше, чем при использовании пяти переменных.

Сценарные изменения слоя годового стока. По данным о прогнозных величинах P , PET и ω (по итогу оценки точности различных методов использовались величины, полученные за 1980–2021 гг. с помощью калибровки) была рассчитана величина стока. Для большинства водосборов вне зависимости от сценария SSP и периода прогнозирования, прогнозируется рост R (табл. 3).

В большинстве случаев для северной половины ЕЧР SSP 245 показывает больший, по сравнению с SSP 370, рост на 2021–2040 гг., но меньший для более поздних сроков прогнозирования. Для южной половины ЕЧР рост согласно SSP 370 практически всегда превышает рост при реализации SSP 245. При обоих сценариях для рек севера ЕЧР прогнозируется рост величины речного стока в течение всего XXI в. Для рек средней полосы и юга ЕЧР монотонные изменения R не выявлены. Максимум R для отдельных водосборов может наблюдаться на любом из четырех сроков прогнозирования.

В среднем для всех сценариев и сроков прогноза на 76% водосборов величина будущих изменений по знаку совпадает с изменениями за 1946–2021 гг. При этом величина изменения в среднем в половине случаев будет меньше, чем за рассматриваемый период измерений. Наиболее выраженные изменения ха-

рактерны для конца столетия при сценарии SSP 585. При его реализации величина изменения слоя стока к 2100 г. превысит изменения за 1946–2021 гг. на 71% водосборов, для 79% из которых это изменение будет также совпадать по направлению. Наименее заметные изменения по сравнению с произошедшими за 1946–2021 гг. прогнозируются к середине XXI в. в сценарии SSP 245, при котором величина изменений будет превышена лишь на 36% водосборов.

Полученные результаты согласуются с предыдущими оценками для северной и центральной частей ЕЧР, но расходятся для южной. Так, в [Магрицкий и др., 2018] на основе схожей методики был получен сценарный прогноз уменьшения стока р. Урал к середине XXI в. на 10–20%. Различия могут быть связаны как с выбором данных – различные периоды осреднения и сценарные изменения климата (CMIP3 и CMIP6), так и с особенностями методики.

Таблица 3

Сценарные изменения величины речного стока при SSP 245 и SSP 370 для крупных речных бассейнов по отношению к 1980–2021 гг.

Река – пост	Изменение за 1946–2021 гг., %	SSP 245				SSP 370			
		2021–2040	2041–2060	2061–2080	2081–2100	2021–2040	2041–2060	2061–2080	2081–2100
Варзуга – Варзуга	18,5	5,2	7,5	8,2	8,2	2,2	4,6	10,3	16,7
Онега – Череповская	4,4	2,2	2,7	4,9	7,3	3,5	6,2	6,8	10,6
Северная Двина – Усть-Пинега	2,5	2,6	2,3	5,9	6,7	2,4	5,3	5,2	9,8
Мезень – Малонисогорская	–2,4	4,3	4,8	9,3	9,5	2,5	5,4	5,2	12,4
Печора – Усть-Цильма	4,7	9,0	11,4	18,5	18,7	6,4	11,1	14,0	22,0
Великая – Пятоново	20,4	–0,2	–0,6	0,1	2,7	4,0	5,4	6,8	10,6
Волга – Старица	22,8	2,7	2,0	3,0	7,0	3,8	7,4	6,9	9,9
Ока – Горбатов	10,2	9,2	6,7	9,5	11,8	11,2	13,8	11,4	13,4
Вятка – Вятские Поляны	18,7	5,4	3,9	8,4	9,8	4,6	7,6	7,1	12,2
Белая – Бирск	4,7	13,0	13,5	20,1	20,8	12,7	14,9	16,5	19,4
Самара – Елшанка	0,2	12,3	9,5	14,0	21,4	14,3	12,6	14,3	17,9
Большой Кинель – Тимашево	8,4	11,2	7,4	12,8	17,4	14,2	11,8	12,2	15,6
Большой Караман – Советское	–37,9	11,7	7,6	6,9	15,0	20,7	14,4	11,4	12,4
Дон – Беляевский	–4,9	12,3	6,9	9,4	12,3	16,1	15,4	12,3	11,8
Урал – Кушум	5,8	12,9	13,1	16,2	22,7	13,6	16,7	16,4	21,7
Десна – Брянск	–1,7	6,5	1,3	3,4	6,5	9,3	13,7	9,0	10,8
Сейм – Рыльск	–22,2	18,5	7,7	9,5	13,1	23,3	27,5	17,2	16,7

ВЫВОДЫ

В период с 1946 по 2021 г. произошел рост нормы осадков и потенциального испарения. Для большинства водосборов также был выявлен рост слоя стока. Для рек арктического бассейна изменение стока практически полностью определяется изменением годовых величин осадков и потенциального испарения. Рост стока в средней полосе России превысил рост, ожидаемый при наблюдаемом росте осадков и потенциального испарения. Для бассейнов рек юга ЕЧР ситуация обратная – на многих водосборах было выявлено сокращение слоя стока, не

объяснимое исключительно изменением годовых величин осадков и потенциального испарения.

Для параметра ω , определяющего долю осадков, расходуемую на испарение при заданной величине индекса сухости, была выявлена тесная связь с рядом физико-географических особенностей водосборов, прежде всего долей снега в годовой сумме осадков и площади водосбора, занятой древесной растительностью. При расчете по этой зависимости ω за предыдущий период (1946–1979) получены ошибки, которые носят систематический характер (см. табл. 2). Они связа-

ны с тем, что изменения ω во времени оказались не столь чувствительны к изменению доли снега в годовой сумме осадков, средней температуре воздуха за январь – февраль и коэффициенту сезонности климата, по сравнению с изменением в пространстве. Это может быть связано как с тем, что рассмотренные климатические параметры скоррелированы с рядом других физико-географических характеристик водосборов, не учтенных в данной работе и не меняющихся также быстро, как климат (свойства почвы, видовой состав растительного покрова, структура русловой сети и др.), так и с

не учетом иных факторов, таких как изменение интенсивности транспирации в результате изменения концентрации CO_2 в атмосфере.

Использование полученных зависимостей вместе со сценарными прогнозами изменения климата показало, что сток большинства рек ЕЧР в XXI в. вырастет вне зависимости от сценария изменения климата. В среднем на 76% водосборов направленность изменения речного стока за 2020–2100 гг. будет совпадать с таковой за 1946–2021 гг. Прогнозная величина изменений будет также близка к наблюдаемой за 1946–2021 гг.

Благодарность. Анализ изменений речного стока был проведен при финансовой поддержке РНФ (проект № 24-17-00102), методологические и методические вопросы были рассмотрены также при поддержке РНФ (проект № 24-17-00084).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барabanов А.Т., Петелько А.И. Факторы склонового весеннего стока на серых лесных почвах в центральной лесостепи // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2023. № 4. С. 18–27. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.2.
- Варенцова Н.А., Гречушников М.Г., Повалишников Е.С. и др. Влияние климатических и антропогенных факторов на весенний сток в бассейне Дона // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 5. С. 91–108.
- Григорьев В.Ю., Миллионщикова Т.Д., Сазонов А.А. и др. Оценка влияния изменения климатических параметров на сток рек бассейна Байкала во второй половине XX – начале XXI вв. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2020. № 5. С. 3–11.
- Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Киреева М.Б. и др. Пространственно-временная изменчивость ошибки воспроизведения слоя осадков реанализом ERA5 на территории России // Известия РАН. Серия географическая. 2022. Т. 86. № 3. С. 435–446.
- Жерон О. Прикладное машинное обучение с помощью Scikit-Learn, Keras и TensorFlow: концепции, инструменты и техники для создания интеллектуальных систем. 2-е изд. М.: Диалектика-Вильямс, 2020. 1040 с.
- Калугин А.С. Сток рек европейской части России при глобальном потеплении на 1,5 и 2 градуса // Водные ресурсы. 2023. Т. 50. № 4. С. 451–464.
- Магрицкий Д.В., Евстигнеев В.М., Юмина Н.М. и др. Изменения стока в бассейне р. Урал // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2018. № 1. С. 90–101.
- Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б. и др. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 3. С. 251–269. DOI: 10.31857/S032105962203004X.
- Amatulli G., Garcia M.J., Sethi T. et al. Hydrography 90 m: a new high-resolution global hydrographic dataset, *Earth Syst. Sci. Data*, 2022, vol. 14, p. 4525–4550, DOI: 10.5194/essd-14-4525-2022.
- James G., Witten D., Hastie T. et al. *An Introduction to Statistical Learning: with Applications in Python*, New York, Springer International Publ., 2023, 607 p.
- Bai B., Huang Q., Wang P. et al. Long-Term Variability of the Hydrological Regime and Its Response to Climate Warming in the Zhizdra River Basin of the Eastern European Plain, *Water*, 2023, vol. 15, p. 2678, DOI: 10.3390/w15152678.
- Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas, *International Journal of Climatology*, 2017, vol. 37, no. 12, p. 4302–4315, DOI: 10.1002/joc.5086.
- Gan G., Liu Y., Sun G. Understanding interactions among climate, water, and vegetation with the Budyko framework, *Earth-Science Reviews*, 2021, vol. 212, 103451, DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103451.
- Hargreaves G.H., Samani Z.A. Estimating potential evapotranspiration, *J. Irrig. Drain. Eng.*, 1982, vol. 108, p. 225–230.
- Liu J., Zhang Q., Singh V.P. et al. Hydrological effects of climate variability and vegetation dynamics on annual fluvial water balance in global large river basins, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2018, vol. 22, no. 7, p. 4047–4060, DOI: 10.5194/hess-22-4047-2018.
- Kalugin A.S. The Impact of Climate Change on Surface, Subsurface, and Groundwater Flow: A Case Study of the Oka River (European Russia), *Water Resources*, 2019, vol. 46 (suppl. 2), p. 31–39, DOI: 10.1134/S0097807819080104.
- Zomer R.J., Xu J., Trabucco A. Version 3 of the Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration Database, *Sci Data* 9, 2022, vol. 409, DOI: 10.1038/s41597-022-01493-1.
- Электронные ресурсы**
 CMIP6, CMIP6 downscaled future climate projections, URL: <https://worldclim.org/data/index.html> (дата обращения 10.04.2023).
 Vegetation Continuous Fields (VCF) Version 1 data product (VCF5KYR), NASA, URL: <https://lpdaac.usgs.gov/products/vcf5kyrv001/> (дата обращения 15.05.2022).

Поступила в редакцию 23.08.2024

После доработки 10.09.2024

Принята к публикации 15.10.2024

RELATIONSHIP BETWEEN PRECIPITATION, RIVER RUNOFF AND EVAPORATION OVER THE EUROPEAN RUSSIA AND ITS VARIABILITY

V.Yu. Grigoriev¹, N.L. Frolova², A.A. Sazonov³, O.M. Pakhomova⁴, S.P. Pozdnyakov⁵, Wang Ping⁶

¹⁻⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology

^{1,3} Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences

⁵ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Department of Hydrogeology

⁶ Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences

¹ Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: vadim308g@mail.ru

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

³ Senior Lecturer, Ph.D. in Geography; e-mail: sazonov.lesha@gmail.com

⁴ Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: olpah@mail.ru

⁵ Professor, D.Sc. in Geology; e-mail: sppozd@mail.ru

⁶ Professor, Ph.D. in Geology; e-mail: wangping@igsnrr.ac.cn

The changes in annual precipitation, evaporation, river runoff, and potential evapotranspiration for 1946–1979 and 1980–2021 were considered for 225 catchments located in European Russia (ER) north of 48°N and without large reservoirs within their boundaries. The ER is generally characterized by higher values of all water balance components in 1980–2021 compared to 1946–1979. A slight increase in river runoff was found for the northern part of the ER, within the Arctic rivers basins and the basins of the Upper and Middle Volga River and the Baltic Sea. A decrease prevailed in the southern part, within the basins of Don, Ural and the Lower Volga rivers. The most notable change was an increase in runoff in the central part of the region. At the same time, its increase for most catchments exceeded the increase in precipitation – the median coefficient of runoff for 225 basins increased from 0,38 to 0,40. The modified Budyko's equation made it possible to calculate the dependence of the runoff coefficient on the degree of climate aridity for each basin in terms of ω , which shows the part of precipitation spent on evaporation under a given value of the aridity index. The dependence did not change for the northern ER. The transformation of precipitation into runoff has become more effective in the central part, while in the southern part it became less effective. The spatial distribution of parameter ω showed close relationships (determination coefficient more than 0,76) between the degree of synchrony of the maximum potential evapotranspiration and precipitation events, the proportion of forest cover and bare soil in the catchment, air temperatures in January-February, and the fraction of solid precipitation relative to the annual total. However, applying the derived dependence to estimate changes in ω has led to unsatisfactory results, suggesting that the spatial parameters which determine ω values do not control its temporal variability. Based on the estimated ω value for the period of 1980–2021 and climatic scenarios of precipitation and evaporation changes the runoff change for the 21st century was calculated. It is expected that most of the rivers in the ER will increase their runoff in the 21st century regardless of climate change scenarios. On average, 76% of catchments will experience the same direction of river flow changes as in 1946–2021. The forecasted degree of changes will be close to observed during that period.

Keywords: European part of Russia, water balance, annual runoff, Budyko's formula, climate change

Acknowledgements. Analysis of river flow change was financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 24-17-00102); methodological issues were also considered with the support of the RSF (project no. 24-17-00084).

REFERENCES

- Barabanov A.T., Petelko A.I. Faktory sklonovogo vesenego stoka na tyazhelykh lesnykh pochvakh tsentral'noy lesostepi [Factors of slope spring runoff on gray forest soils in the central forest-steppe], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2023, no. 4, p. 18–27. (In Russian)
- Varentsova N.A., Grechushnikova M.G., Povalishnikova E.S. et al. Vliyaniye klimaticheskikh i antropogennykh faktorov na vesenney stok v basseynе Dona [Assessment of climatic and anthropogenic impact on spring runoff in the Don River basin], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2021, no. 5, p. 91–108. (In Russian)
- Grigoriev V.Yu., Millionshchikova T.D., Sazonov A.A., Chalov S.R. Otsenka vliyaniya izmeneniya klimaticheskikh parametrov na stok rek basseyna Baykala vo vtoroy polovine XX – nachale XXI vv. [Impact of changes in the main climatic parameters on river runoff in the Baikal Lake basin during the second half of the 20th and the early 21st century.], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2021, no. 5, p. 3–11. (In Russian)
- Grigoriev V.Yu., Frolova N.L., Kireyeva M.B., Stepanenko V.M. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' oshibki vosproizvedeniya sloya osadkov reanalizom ERA5 na territorii Rossii [Spatial and Temporal Variability of ERA5 Precipitation Accuracy over Russia], *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk, Seriya Geograficheskaya*, 2022, no. 86(3), p. 435–446. (In Russian)
- Jeroen O. *Applied Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques*

- for *Building Intelligent Systems*, 2nd ed., Moscow, Diagnostics-Williams Publ., 2020, 1040 p.
- Kalugin A.S. River runoff in the European Russia under global warming by 1.5 and 2 degrees Celsius, *Water Resources*, 2023, vol. 50, no. 4, p. 543-556.
- Magritsky D.V., Evstigneev V.M., Yumina N.M. et al. Izmeneniya stoka v bassejne r. Ural [Changes of runoff in the Ural River basin], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2018, no. 1, p. 90-101. (In Russian)
- Frolova N.L., Magritskiy D.V., Kireyeva M.B. et al. Streamflow of Russian Rivers under Current and Forecasted Climate Changes: A Review of Publications. 1. Assessment of Changes in the Water Regime of Russian Rivers by Observation Data, *Water Resources*, 2022, vol. 49, no. 3, p. 333-350.
- Amatulli G., Garcia M. J., Sethi T. et al. Hydrography 90 m: a new high-resolution global hydrographic dataset, *Earth Syst. Sci. Data*, 2022, vol. 14, p. 4525-4550, DOI: 10.5194/essd-14-4525-2022.
- James G., Witten D., Hastie T. et al. *An Introduction to Statistical Learning: with Applications in Python*, New York, Springer International Publishing, 2023, 607 p.
- Bai B., Huang Q., Wang P. et al. Long-Term Variability of the Hydrological Regime and Its Response to Climate Warming in the Zhizdra River Basin of the Eastern European Plain, *Water*, 2023, vol. 15, p. 2678, DOI: 10.3390/w15152678.
- Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas, *International Journal of Climatology*, 2017, vol. 37, no. 12, p. 4302-4315, DOI: 10.1002/joc.5086.
- Gan G., Liu Y., Sun G. Understanding interactions among climate, water, and vegetation with the Budyko framework, *Earth-Science Reviews*, 2021, vol. 212, 103451, DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103451.
- Hargreaves G.H., Samani Z.A. Estimating potential evapotranspiration, *J. Irrig. Drain. Eng.*, 1982, vol. 108, p. 225-230.
- Liu J., Zhang Q., Singh V.P. et al. Hydrological effects of climate variability and vegetation dynamics on annual fluvial water balance in global large river basins, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2018, vol. 22, no. 7, p. 4047-4060, DOI: 10.5194/hess-22-4047-2018.
- Kalugin A.S. The Impact of Climate Change on Surface, Subsurface, and Groundwater Flow: A Case Study of the Oka River (European Russia), *Water Resources*, 2019, vol. 46 (suppl. 2), p. 31-39, DOI: 10.1134/S0097807819080104.
- Zomer R.J., Xu J., Trabucco A. Version 3 of the Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration Database, *Sci Data* 9, 2022, vol. 409, DOI: 10.1038/s41597-022-01493-1.

Web sources

- CMIP 6, CMIP6 downscaled future climate projections, URL: <https://worldclim.org/data/index.html> (access date 10.04.2023).
- Vegetation Continuous Fields, Vegetation Continuous Fields (VCF) Version 1 data product (VCF5KYR), NASA, URL: <https://lpdaac.usgs.gov/products/vcf5kyrv001/> (access date 15.05.2022).

Received 23.08.2024
 Revised 10.09.2024
 Accepted 15.10.2024

ЛАНДШАФТНЫЕ ФАКТОРЫ ВАРЬИРОВАНИЯ ФИТОМАССЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ ОРЕНБУРГСКОГО ПРЕДУРАЛЬЯ

Н.В. Ильинова¹, А.В. Хорошев²

^{1,2} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии и ландшафтоведения*

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

² *Проф., д-р геогр. наук; e-mail: avkh1970@yandex.ru*

Предсказуемость и малое внутриполевое варьирование урожаев – фактор эффективности сельского хозяйства. Зависимость продуктивности от гидротермических условий может определяться пространственной структурой ландшафта. На примере степного агроландшафта в Оренбургской области анализировалось влияние площадных и качественных характеристик ландшафтного соседства на внутриполевую вариабельность зеленой фитомассы. Использованы вегетационные индексы NDVI для 92 полевых участков с обычной площадью 100 га по 42 космоснимкам Landsat за 30-летний период в среднем по 4–6 за сезон. В качестве зависимой переменной рассматривались NDVI полевых пикселей, в качестве независимых – площади эрозионных форм и живых лесополос и суммарный NDVI лесополос в окрестности радиусом 150 м. Виды культур, свойства лесополос и ложбин описывались при полевых исследованиях. Кластерный анализ применялся для распознавания видов культур по сходству годового хода NDVI с таковыми в годы полевых наблюдений. Мультирегрессионные уравнения составлялись для расчетов суммарного вклада трех факторов соседства во внутриполевое варьирование фитомассы и их вкладов по отдельности. Параметры уравнений сравнивались для июньских дат за три года с различной тепловлагообеспеченностью. Установлено, что внутриполевое варьирование зеленой фитомассы может быть более чем наполовину обусловлено факторами ландшафтного соседства с эрозионными формами и лесополосами. Поля классифицированы по степени стабильности влияния лесополос и ложбин при разных гидротермических условиях. Наиболее стабильное влияние на зеленую фитомассу культур оказывает соседство с эрозионными формами рельефа, наименьшее – состояние лесополос. Для 44% площади исследования зависимость зеленой фитомассы от ландшафтного соседства стабильна от года к году и статистически значима. Соседство с лесополосами и их состояние сильнее влияют на июньскую фитомассу в жаркие и сухие годы, а близость к эрозионным формам – в годы с обильным зимним и весенним увлажнением. С приближением к лесополосам фитомасса растет почти на всех полях. Площадь смежных живых лесонасаждений имеет большее значение, чем их состояние. Установлены пороговые значения соседств с эрозионными формами и живыми лесополосами, при достижении которых зеленая фитомасса на плакорах возрастает. Достоверное влияние факторов соседства на фитомассу проявляется вне зависимости от вида культур.

Ключевые слова: агроландшафт, NDVI, соседство, лесополоса, ложбина, гидротермические условия

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.6

ВВЕДЕНИЕ

При разработке моделей, описывающих связь урожайности сельскохозяйственных культур и внешних факторов, наиболее значимым фактором считается временная устойчивость видов зависимости. Для аграрного сектора важно определить, какие поля обеспечивают стабильный и предсказуемый урожай в течение многих лет, а на каких урожайность сильно зависит от гидротермических условий конкретного года и сезона.

Пространственные модели значительно улучшают точность прогноза урожайности [Blackmore et al., 2003]. С другой стороны, актуальна проблема равномерности условий роста культур в пределах полевого участка. Таким образом, определяют-

ся задачи, непосредственно связанные с областью ландшафтно-экологических исследований: на мезоуровне (примерно ранга местности) – выявление свойств ландшафтной структуры, определяющих различную стабильность урожайности на полевых участках; на микроуровне (примерно ранга урочища) – анализ причин внутриполевой изменчивости фитопродуктивного процесса.

Одним из центральных сюжетов ландшафтоведения всегда считалась взаимозависимость пространственных и временных характеристик. Ключевой вопрос можно сформулировать следующим образом: при каких свойствах пространственной структуры (составе, пропорциях, размещении, взаиморасположении, размерах, ориентации, латеральных связях) дости-

гаются те или иные характеристики временной изменчивости свойств (минимальной, максимальной, цикличной и др.). Применительно к сельскому хозяйству возможным направлением повышения продуктивности может быть «страховка» урожайности на случай резких гидротермических флуктуаций посредством оптимизации взаиморасположения и взаимодействий полевых участков с лесополосами, эрозионными формами и другими объектами как одной из задач адаптивно-ландшафтного земледелия [Кирюшин, 2018]. Необходимо установить, как изменение гидротермических условий влияет на чувствительность урожайности к соседним или внутренним объектам на полевых участках (например, ложбин и западин). Для этого требуется сравнить виды зависимости между урожайностью и пространственными характеристиками агроландшафта для гидротермически контрастных периодов в сезонном и многолетнем аспектах.

Исследования пространственно-временной организации фитопродукционного процесса в агроландшафтах проводятся в основном по двум направлениям. Во-первых, определяется зависимость урожайности по полемому участку в целом от климатических трендов [Eckert et al., 2015; Detsch et al., 2016] (мезоуровень). Во-вторых, изучается зависимость внутриполевого варьирования урожайности от пространственной неоднородности микрорельефа и почв, особенно в связи с разработкой технологий точного земледелия [Verhulst, Govaerts, 2010; Lyle et al., 2013; Гулянов, 2020] (микроуровень). Перспективно исследование влияния смежных природных и антропогенных объектов (в частности лесополос и форм рельефа) на внутриполевое варьирование [Манаенков и др., 2023].

Современные общедоступные дистанционные технологии дают возможность оценить степень варьирования фитомассы в пределах как полевых участков, так и лесополос. Наиболее применяемый метод – измерение нормализованных разностных вегетационных индексов (NDVI) в пикселях с линейным размером от нескольких метров до нескольких десятков метров. Ограничивающими факторами служат разрешение дистанционных материалов и финансовые возможности сельхозпроизводителей по их приобретению. Пространственное разрешение снимков MODIS (250 м), которые обеспечивают интервал съемки 16 суток, подходит только для исследований глобального и регионального масштабных уровней, но неадекватно для исследования внутриполевого варьирования и влияния лесополос. Также применяются снимки сверхвысокого разрешения и данные с квадрокоптеров [Mahajan, 2016], что требует больших финансовых затрат. Разрешение спутников LANDSAT (30 м) лучше по-

зволяет решать эти задачи, несмотря на недостаточность подходящих по качеству серий изображений за сопоставимые сроки.

Результаты дистанционных исследований продуктивности свидетельствуют о значимой положительной зависимости между значениями вегетационных индексов и урожайностью культур [Duan et al., 2017]. Современные технологии позволяют верифицировать значения индексов, полученных по космоснимкам, наземными радиометрами в детальном масштабе [Johansen, Tømmervik, 2014; Гулянов, 2019]. Основные требования к исследованиям пространственно-временных закономерностей функционирования агроландшафта таковы: наличие длинного временного ряда космоснимков; наличие достаточно большого количества (десятки) сравнимых, но не полностью идентичных, по размерам и ландшафтным условиям полевых участков; наличие информации о севооборотах и агротехнических мероприятиях. Выполнение последнего условия наиболее проблематично, в том числе из-за несохранности архивов или нежелания земледельцев предоставлять такую информацию. Тем не менее по различиям сезонного хода фитомассы можно если и не установить точно культуру, то классифицировать поля по этапам севооборота в данный год.

Многие авторы при оценке влияния факторов воздействия на растительность учитывают только внешний климатический фактор. Особенно это характерно при выявлении связей между растительностью и количеством выпавших осадков в аридных и семиаридных ландшафтах, где климатический фактор является наиболее преобладающим и жизненно необходимым для формирования растительных сообществ [Birtwistle et al., 2016]. В то же время обращается внимание на необходимость количественных оценок вкладов абиотических факторов (геологическое строение, рельеф, почва) и, особенно, их синергетических эффектов с гидротермическими [Глазунов и др., 2018].

С другой стороны, пространственное варьирование биопродуктивности и урожайности может определяться эмерджентными эффектами пространственной структуры, т. е. результатами взаимодействия между ландшафтными единицами. Для агроландшафтов Северного Казахстана установлено, что урожайность зерновых культур в степях зависит от количественного соотношения урочищ, способных рассеивать либо накапливать влагу, и от ландшафтных соседств [Хорошев и др., 2018; Kіryanov-Gref et al., 2024]. Методическая трудность сравнительного анализа вкладов факторов состоит в пространственной нестационарности, т. е. в изменчивости вкладов по территории. В связи с этим возникает задача сравнения видов зависимости

между территориальными единицами, например полевыми участками.

Даже при гомогенности фациальных условий внутри полевого участка позиционный фактор, т. е. расстояние до соседнего пространственного элемента (лесополосы, дороги, эрозионной формы, западины и др.) может служить самостоятельным фактором пространственной дифференциации (обратимой или необратимой) посредством меняющейся интенсивности потоков веществ и энергии. В сельском хозяйстве это создает трудности из-за неравномерных снеготаяния, прогревания и подсыхания почвы, времени начала вегетации, скорости прохождения вегетационных фаз, эффективности усвоения удобрений, обилия сорняков и др. [Киришин, 2018].

Целью данной работы была количественная оценка изменчивости тесноты связей между ландшафтными (т. е. связанными с пространственной гетерогенностью) факторами и внутривертевой вариативностью зеленой фитомассы на основании

значений NDVI. Под ландшафтными факторами в данном случае понималось соседство с отрицательными формами микрорельефа и лесополосами разного состояния. Решались задачи: оценить вклад факторов соседства в пространственную вариативность фитомассы полевых участков; установить меру изменчивости вкладов факторов соседства в зависимости от гидротермических флуктуаций; сравнить группы сельскохозяйственных культур по чувствительности внутривертевой вариативности фитомассы от факторов соседства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено на примере 92 полевых участков в Беляевском районе Оренбургской области вблизи пос. Буртинский на междуречье рек Урал и Илек (рис. 1). Территория расположена на Подуральском плато Восточно-Европейской равнины и относится к Урало-Илекской южно-степной провинции.

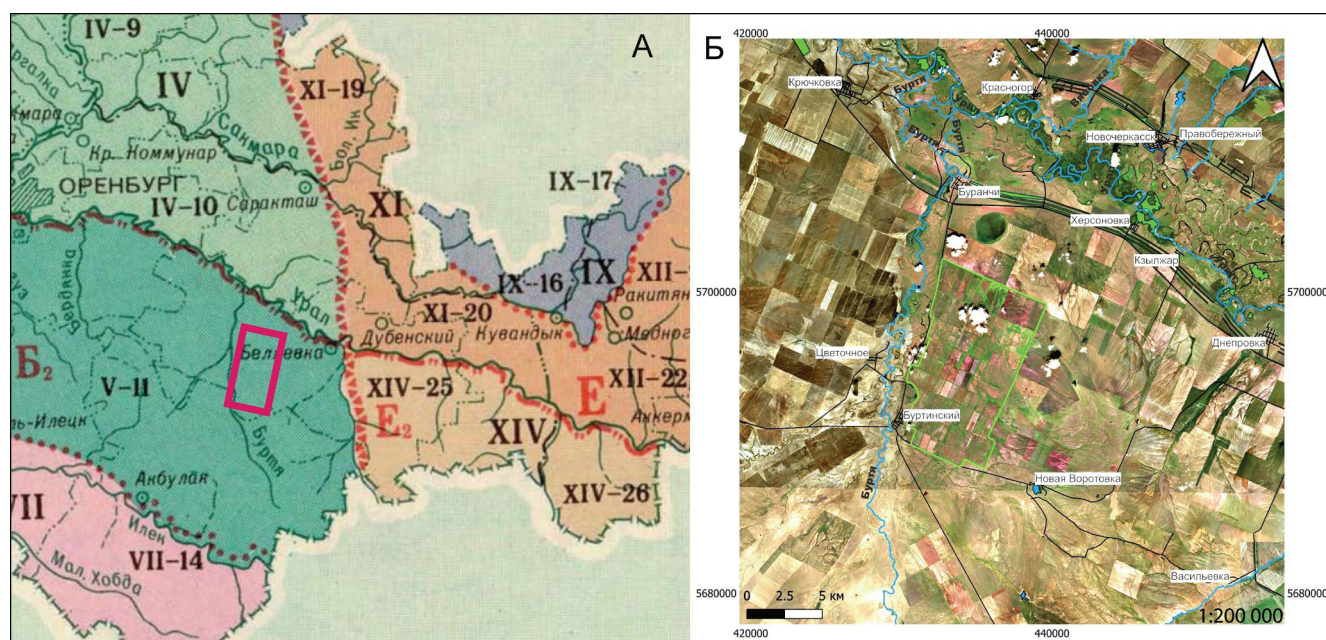


Рис. 1. Расположение полигона исследования: А – фрагмент ландшафтной карты Оренбургской области [Атлас..., 1993]; Б – границы полигона исследования на фоне космического снимка. *Источник:* Bing satellite

Fig. 1. Location of the study area: А – a fragment of a landscape map of the Orenburg region [Atlas..., 1993]; Б – the boundaries of the study area against the background of a satellite image. *Source:* Bing satellite

Территория имеет общий северо-западный уклон до 1° к реке Буртя в диапазоне высот 117–150 м. Литогенную основу на севере и в центральной части составляют эоплейстоценовые озерно-аллювиальные супеси и суглинки, плавно переходящие в восточной в плейстоценовый супесчано-суглинистый делювий. Распространено два вида малых эрозионных форм: ложбины (преобладают на полигоне) и промоины. Ложбины на полях перепа-

хиваются, их склоны пологие, крутизна составляет первые градусы ($2-5^\circ$), перепад высот – первые метры, ширина днища – 5–7 м (рис. 2). Промоины на полигоне представлены единично, характеризуются более крутыми склонами ($6-10^\circ$), не распахиваются, ширина днища составляет до 4 м, перепад высот от 2 до 4 м, местами встречается оглеение почв. Смытость почв на склонах ложбин индицируется более светлым пахотным горизонтом. Типичное

значение эрозионной расчлененности для полей составляет 15% от площади поля.

Годовая сумма осадков варьирует от 300 до 400 мм, в среднем – 319 мм (по данным метеостанции Беляевка в 20 км к востоку от полигона). Снежный покров устанавливается к ноябрю и держится в среднем 139 дней; средняя высота 23–31 см, запасы воды в снеге – от 70 до 87 мм [Климентьев, 2005]. Наиболее непостоянные осадки характерны для июля, их вариация достигает 80%.

Почвы представлены южными черноземами, карбонатными обычно с поверхности или в пахотном горизонте. В днищах некоторых крупных балок присутствуют следы оглеения. В ложбинах и понижениях встречается щебень коренных пород. Присутствуют признаки засоления, выражающиеся в широком распространении галофитных рас-

тительных сообществ (*Bassia scoparia*) преимущественно в восточной части полигона.

В исследование включена территория площадью 13 тыс. га, на которой размещены 92 полевых участка. Большинство полей имеет размеры 2000×500 м. Около 20% территории полигона исследования распахивается не ежегодно; среди них примерно половина используется под многолетние кормовые травы (преимущественно житняк), другая половина представляет собой зарастающие залежи. Поля разделены сетью полезащитных лесополос разной степени сохранности, возраст посадок составляет около 60 лет, средняя ширина – около 30 м. На пашнях применяется зернопаропропашной севооборот. Выращиваются зерновые (пшеница, ячмень, овес) и масличные (рыжик, подсолнечник) культуры. Залежи постепенно зарастают вязом мелколистным (*Ulmus parvifolia*).

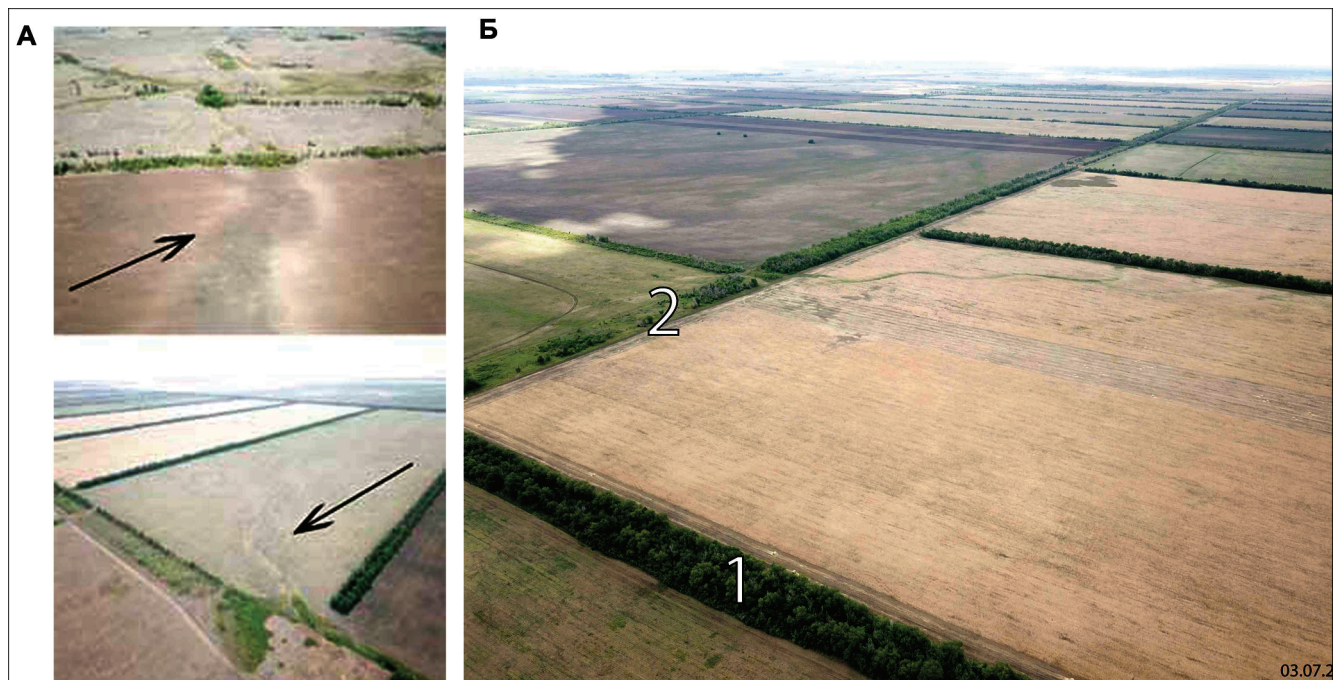


Рис. 2. Эрозионные формы и лесополосы на полевых участках: А – поля с распашкой и под многолетним житняком (стрелками показаны распахаваемые ложбины разной ширины); Б – лесополосы: 1 – живые (ширина 30 м); 2 – распадающиеся. Источник: фото с беспилотного летательного аппарата Mavic Pro

Fig. 2. Erosion landforms and forest belts in field areas: A – fields with plowing and under perennial grain crops; arrows indicate plowed hollows of different widths; Б – live (1, width 30 m) and decaying (2) forest belts. Source: Photo from the Mavic Pro UAV

Сеть лесополос, судя по измерениям на спилах деревьев, была заложена в 1960-х гг. Представлены вяз мелколистный, клен ясенелистный (*Acer negundo*), клен татарский (*Acer tatàricum*), тополь (*Populus canadensis*), яблоня, ясень, среди кустарников – лох серебристый (*Elaeagnus commutata*), боярышник (*Crataegus*), смородина (*Ribes*). Предположительно лесополосы проектировались как ажурные, однако впоследствии подверглись зарастанию, а в некоторых местах – распаду и отмиранию. Наиболее

благополучное состояние лесополос (т. е. качество) наблюдалось при пересечении ложбин. Средняя высота лесополос (H) составляет 10–14 м, для лесополос с участием тополя – 15–20 м.

В ходе предполевого этапа анализировались: цифровые модели рельефа ALOS (разрешение 30 м), SRTM (90 м); топографические карты (1 : 200 000); 42 космоснимка LANDSAT-5, 7, 8 за период с 1991 по 2021 г., в среднем по 4–6 снимков за сезон. Схема исследования отражена на рис. 3.



Рис. 3. Концептуальная схема исследования

Fig. 3. Conceptual diagram of the study

На полевом этапе (июнь 2021 и 2024 гг.) было выполнено 84 комплексных описания, включавших следующие показатели: географические координаты и абсолютная высота точки по GPS-навигатору; геолого-геоморфологические характеристики (принадлежность к мезоформе рельефа, экспозиция, крутизна, описание формы и характер поверхности, описание почвенных горизонтов (мощность почвенного покрова, гранулометрический состав, структура, влажность, реакция с HCl), видовой состав и проективное покрытие фитоценозов; в лесополосах – ярусы древостоя, их высота, средний диаметр, общая сомкнутость крон, подробно описывался подрост и подлесок. Осуществлена фото-съемка территории с квадрокоптера Mavic Pro.

Классификация космических изображений была выполнена в программе RStudio методом максимального правдоподобия на основе спектральных каналов 2, 3, 4 спутника LANDSAT-8 (снимок 04.08.2021), что позволило разделить живые лесополосы и безлесные участки (в том числе с погибшими лесополосами). В программах Rstudio и ArcGis 10.3 был рассчитан NDVI за 39 сроков с учетом атмосферной коррекции и облачности.

Эрозионные формы ввиду недоступности крупномасштабных топографических карт выделялись вручную по космическим снимкам, данным съемки

квадрокоптером с полевой верификацией по рельефу, видовому составу и покрытию травостоя.

На основе полученных растров NDVI, принадлежности пиксела к категориям лесополос или эрозионных форм вычислялась зональная статистика значений в определенной окрестности каждого пиксела. Поскольку влияние ажурных лесополос составляет около 10–15 высот деревьев [Черемисинов, Спахова, 2004], а средняя высота лесополос на территории полигона составляет 10–14 м, площадь и состояние лесополос оценивались в окрестности каждого пиксела радиусом 150 м. При этом учитывается, что некоторые участки лесополос погибли; они не участвовали в расчете площади. Предполагалось, что чем больше площадь живых лесопосадок и суммарное значение NDVI в пределах лесополосы, попавшей в заданную окрестность пиксела, тем больше зеленая фитомасса, тем лучше состояние лесополосы и тем большее влияние (позитивное или негативное) она может оказать на фитомассу полевого участка. Площадь эрозионных форм рассчитывалась в окрестности 150 м, что соответствует обычному расстоянию между ложбинами на полях с присутствием таковых. Считалось, что рост суммарной площади эрозионных форм в окрестности способствует большему накоплению снега и почвенной влаги, которая может путем диффузии рас-

пространяться в почвы плакорных поверхностей. Гипотеза заключалась в том, что рост влагозапасов способствует росту фитомассы сельскохозяйственных растений. С другой стороны, близость к эрозионным формам, даже при минимальных уклонах, во время весеннего снеготаяния может вызывать смыв почв, и тогда более вероятным становится снижение фитомассы. Расчет соседств с эрозионными формами производился в двух вариантах: только

для пикселей, находящихся за их пределами, и для всех пикселей поля. Эрозионная расчлененность полевого участка в целом рассчитывалась как доля площади эрозионных форм от общей площади.

Таким образом, было получено три растровых изображения, отображающих факторы ландшафтного соседства: 1) влияние эрозионных форм рельефа (рис. 4А); 2) влияние площади живых лесополос и их состояния (рис. 4Б).

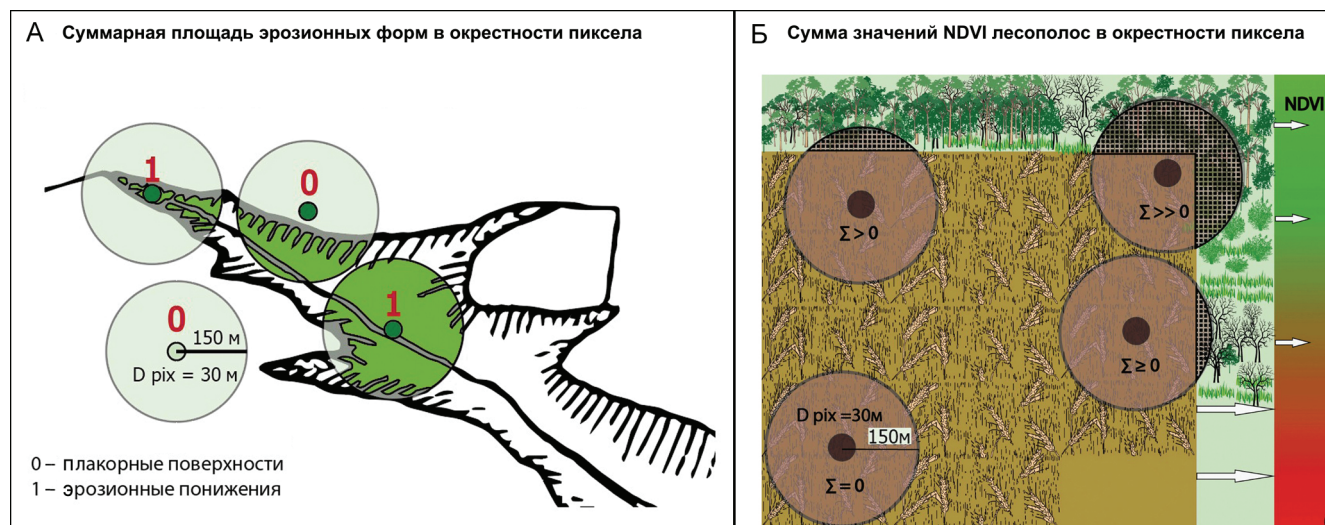


Рис. 4. Схема расчета характеристик ландшафтного соседства для значений NDVI в пикселях на полевых участках: А – по отношению к эрозионным формам рельефа; Б – по отношению к лесополосам

Fig. 4. Scheme for calculating the parameters of the landscape neighborhood for NDVI values in pixels at field sites: А – in relation to erosion landforms; Б – in relation to forest belts

Для оценки влияния гидротермических факторов на исследуемые связи были использованы данные метеостанции Беляевка: температуры и осадки месяца съемки и предыдущих весенних месяцев, а также сумма осадков за предшествующий период с устойчивыми отрицательными температурами (с ноября по март). Для сравнения вкладов трех факторов ландшафтного соседства на внутривероятную вариативность NDVI выбраны данные за июнь двух контрастных по температуре и влажности лет – жаркого и очень сухого 2010 г. и среднего по теплообеспеченности и влажности (но с зимой и весной влажнее обычного) 2017 г., а также тепло и сухого 2021 г. как периода полевой верификации. Повторная верификация состояния лесополос и землепользования проведена в июне 2024 г.

Для исследования суммарного вклада трех факторов соседства и их вкладов по отдельности составлялись интегральные мультирегрессионные уравнения. В качестве зависимой переменной выбирались значения NDVI за 25.06.2021, 27.06.2010 и 30.06.2017, а в качестве независимых: а) сумма площадей эрозионных форм в радиусе 150 м;

б) то же – живых лесополос в окрестности 150 м; в) сумма NDVI лесополос в окрестности 150 м. Показателем суммарного вклада трех факторов был коэффициент детерминации (КД, доля объясненной дисперсии NDVI), показателями относительных вкладов отдельных факторов – модули стандартизованных регрессионных коэффициентов β . Характер влияния факторов на NDVI (позитивный или негативный) определялся по знаку регрессионных коэффициентов и коэффициентов корреляции Спирмена (K_{sp}).

Поскольку данные о выращиваемых культурах и агротехнических мерах за 2010 и 2017 гг. были недоступны, для распознавания классов растительного покрова был применен метод кластерного анализа (k -средних) к данным 2021 г., обеспеченного полевыми наблюдениями за видами культур. Мы исходили из гипотезы, что годовой ход NDVI различается в зависимости от сельскохозяйственной культуры и времени прорастания и скашивания. Различия форм кривых NDVI посевов ранее уже использовались для идентификации посевов зерновых культур на спутниковых снимках [Письман и др.,

2014]. Предполагалось, что, зная культуры 2021 и 2024 гг., можно по сходству годового хода предполагать, какие культуры выращивались на данном поле в другие годы. NDVI за несколько сроков (5–6 с датами с мая по сентябрь) каждого года наблюдений были сгруппированы в шесть кластеров на основании сходства сезонного хода NDVI. Тип покрова для поля определялся по преобладающему по площади кластеру. Затем применялся дисперсионный анализ для выявления достоверности различий в чувствительности NDVI к факторам соседства при разных классах покрова. В качестве зависимой переменной были использованы коэффициенты детерминации интегрального мультирегрессионного уравнения.

Для всех расчетов использовалась программа Statistica 7.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для трех сроков (конец июня 2010, 2017 и 2021 гг.), контрастных по гидротермическим условиям, зеленая фитомасса внутри полевого участка достоверно связана положительной корреляцией с долей и качеством лесополос и долей эрозионных форм в окрестности пиксела. Суммарная площадь смежных

живых лесопосадок оказалась значимой для NDVI на наибольшем количестве полей в наиболее жарком и сухом июне 2010 г. (после наиболее малоснежной зимы), суммарная площадь эрозионных форм – в 2017 г. после самой снежной зимы и влажной весны (табл.). Доля лесных пикселей в окрестности 150 м оказалась более значимой для NDVI полей, чем состояние лесополос, в 2010 и 2021 гг. После снежной зимы и влажной весны 2017 г. вклад фактора состояния лесополос был наибольшим.

Совокупный вклад трех факторов соседства в варьирование фитомассы и его межгодовая изменчивость оценивались по КД интегрального мультирегрессионного уравнения, составленного для каждого полевого участка. Наибольшая доля полей со значимыми интегральными уравнениями соседства (обычно с КД более 0,3) была характерна для 2017 г. – среднего по температуре, но с наиболее снежной зимой и влажной весной; наименьшая – для теплого 2021 г. со средней влагообеспеченностью лета и зимы (см. табл.). Интегральный вклад факторов соседства во внутривидовое варьирование фитомассы практически не зависит от средней абсолютной высоты поля и состава четвертичных отложений.

Таблица

Доля полей с разными интервалами значений коэффициента детерминации и коэффициентов корреляции, описывающих зависимость NDVI от факторов ландшафтного соседства, %

Статистический показатель связи	27.06.2010	30.06.2017	25.06.2021
	Характеристика погоды		
	Жаркий экстремально сухой после малоснежной зимы	Средний по теплообеспеченности после многоснежной зимы и влажной весны	Жаркий сухой после нормативной по осадкам зимы и сухой весны
<i>Коэффициент детерминации интегрального уравнения зависимости NDVI от суммарной площади эрозионных форм и лесополос и суммарного NDVI лесополос в окрестности 150 м</i>			
Более 0,3, в т. ч. 0,5–0,6	19 3	22 7	16 0
<i>Коэффициент Спирмена для связи NDVI с площадью эрозионных форм в окрестности 150 м</i>			
Более 0,3, в т. ч. 0,5–0,6 в т. ч. более 0,6	17 3 0	32 10 4	21 3 1
<i>Коэффициент Спирмена для связи NDVI с площадью живых лесопосадок в окрестности 150 м</i>			
Более 0,3, в т. ч. 0,5–0,6 в т. ч. более 0,6	77 23 18	62 21 11	64 10 11

Сравнение вкладов факторов соседства в июне и июле показало постепенное снижение значимости соседства с эрозионными формами в жаркие годы: КД регрессионного уравнения в 2010 г. в июне составил 0,18, а в июле – 0,06 (не значим); в 2021 – 0,13 и

0,04 соответственно, в 2017 г. не менялся. Вклад факторов соседства с лесополосами постоянно достоверен, но в сухие годы уменьшился от июня к июлю (в 2010 г. КД составил 0,29 и 0,24 соответственно), а в более влажном 2017 г. не изменился (0,21 и 0,20).

Для всех 92 полевых участков по трем срокам прослеживалась сильная положительная зависимость (K_{sp} 0,61...0,67) между эрозионной расчлененностью и вкладом пространственной структуры в варьирование фитомассы (КД интегрального уравнения) (рис. 5). В то же время среди наиболее эрозионно-расчлененных полевых участков (с долей ложбин более 25%) выявлены группы с большим и малым вкладом факторов соседства.

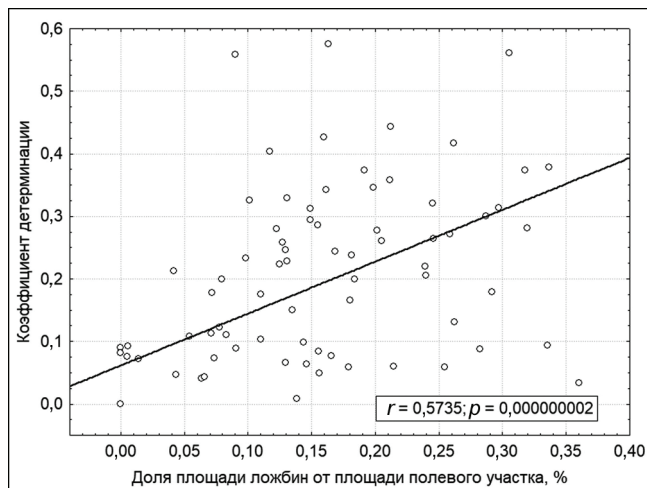


Рис. 5. Зависимость коэффициента детерминации интегрального мультирегрессионного уравнения вклада факторов соседства во внутриполевое варьирование NDVI от площадной доли эрозионных форм. Указаны коэффициент корреляции Пирсона (r) и уровень значимости (p)

Fig. 5. Dependence of the coefficient of determination of the integral multi-regression equation for the contribution of neighborhood factors to the intra-field variation of NDVI on the area fraction of erosion forms. The Pearson correlation coefficient (r) and significance level (p) are indicated.

Для группы полей с большим вкладом факторов соседства зависимость NDVI от соседства с ложбинами для всех трех сроков оказалась достоверно положительной с коэффициентом корреляции от 0,3 до 0,6 (рис. 6). Методом кусочно-линейной регрессии установлено, что если в окрестности любого пикселя поля радиусом 150 м более 15% территории приходится на эрозионные формы, то NDVI в летний период начинает заметно возрастать. В то же время в апреле сразу после снеготаяния закономерность противоположна, поскольку вегетация раньше начинается на межложбинном пространстве. В целом рост NDVI по мере роста эрозионной расчлененности в окрестности начинает ярко проявляться во второй половине июня, т. е. в период наиболее активного формирования зеленой массы сельскохозяйственных культур. В августе вид зависимости сильно варьирует в связи с этапами севооборота. В сентябре положи-

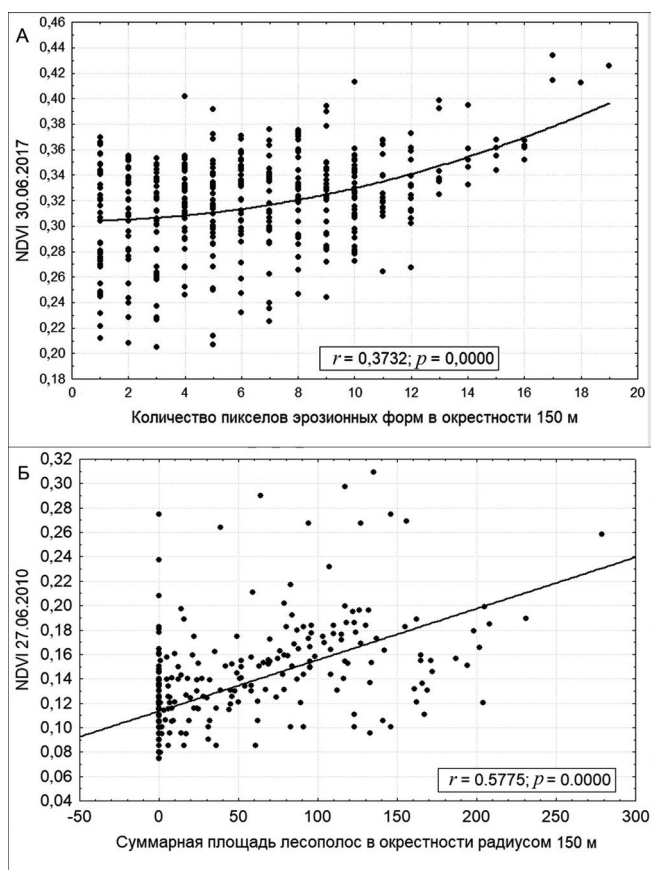


Рис. 6. Зависимость NDVI плакорных единиц на полевом участке № 7: А – от площади эрозионных форм в окрестности 150 м (1 пиксел – 900 м²) 30 июня 2017 г.; Б – от площади живых лесополос в окрестности 150 м 27 июня 2010 г. Из расчета исключены пиксели, в окрестностях которых радиусом 150 м отсутствуют эрозионные формы. Указаны коэффициент корреляции Пирсона (r) и уровень значимости (p)

Fig. 6. Dependence of NDVI of upland units at no. 7 field site: А – on the area of erosion forms within the distance of 150 m (1 pixel – 900 m²), June 30, 2017; Б – on the area of alive forest belts within the distance of 150 m, June 27, 2010. The calculation excludes pixels which have no erosion landforms within a radius of 150 m. The Pearson correlation coefficient (r) and significance level (p) are indicated

тельная зависимость может возникать в отдельные годы.

В другой группе полевых участков, несмотря на высокую эрозионную расчлененность, вклад ландшафтных, т. е. пространственных, факторов во внутриполевую вариабельность NDVI был наименьшим. Все эти участки почти ежегодно распахиваются, и агротехнические мероприятия нивелируют значение ландшафтного соседства. Однако и в этой группе в жарком сухом 2010 г. проявилась сильная зависимость зеленой фитомассы от состояния смежных лесополос.

Для количественного сопоставления вкладов каждого фактора соседства и его стабильности сравнивались стандартизованные регрессионные

коэффициенты интегрального уравнения. Если КД составлял более 0,25 (т. е., как правило, уравнение статистически значимо при $p < 0,05$), то фактор с максимальным по модулю коэффициентом β для этого поля наносился на карту (рис. 7). На 58 участках ландшафтное соседство так или иначе оказывало значимое влияние на внутриверхнее варьирование зеленой фитомассы (КД более 0,25). На остальных 34 участках внутриверхнее варьирование определя-

ется в основном технологическими причинами или неучтенной фациальной неоднородностью (например, засоленностью почв, микрорельефом и др.).

Значимость ландшафтного соседства оказалась неодинаковой в зависимости от гидротермических условий конкретного года. На 18 из 92 полей (20%) влияние факторов велико и устойчиво по всем трем срокам. Еще на 20 полях (22%) зависимость возникает периодически.

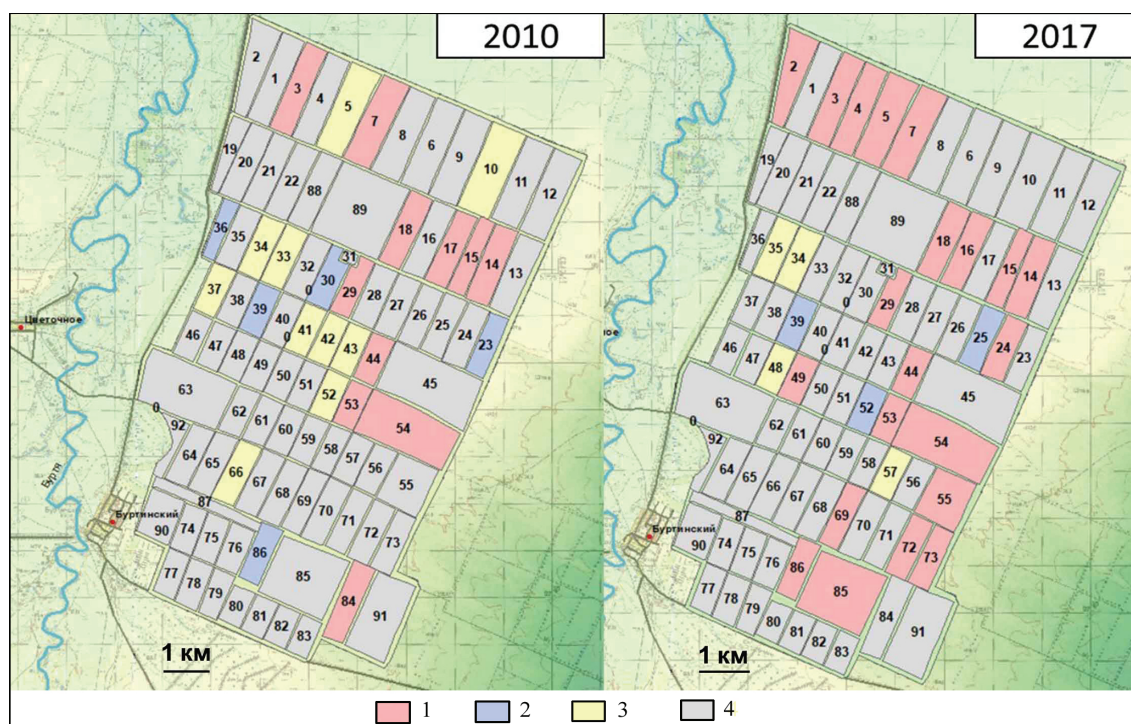


Рис. 7. Классификация полевых участков по относительным вкладам факторов ландшафтного соседства во внутриверхнее варьирование NDVI в июне 2010 и 2017 гг. Преобладающий вклад факторов: 1 – соседство с эрозийными формами; 2 – состояние лесополос; 3 – суммарная площадь лесополос в окрестности 150 м; 4 – значение факторов соседства недостаточно

Fig. 7. Classification of field sites according to the relative contributions of landscape neighborhood factors to intra-field variation of NDVI in June 2010 and 2017. The predominant contribution of factors: 1 – proximity to erosion landforms; 2 – state of forest belts; 3 – the total area of forest belts within the distance of 150 m; 4 – the value of neighborhood factors is unreliable

Для 9 полей с достоверным позитивным влиянием площади лесополос значения коэффициента корреляции достигают 0,4–0,5 (см. рис. 6Б). Данная группа полей представлена как посевами многолетних трав, так и ежегодно распаханых полями. Поэтому можно считать, что положительная связь фитомассы в июне с площадью смежных лесополос происходит независимо от выращиваемой культуры и не зависит от распространения поросли древесных пород на залежах. Состояние лесополос, окружающих эти поля, благополучное с минимальным участием сухостоя. Методом кусочно-линейной регрессии установлено, что при нахождении в окрест-

ности 150 м 0,45 га и более лесополос, зеленая фитомасса полевых пикселей существенно возрастает по сравнению с пикселями, удаленными от лесополос или соседствующими с погибшими насаждениями.

Методом кластерного анализа по годовому ходу NDVI распознаны классы растительного покрова за каждый из трех сроков: а) несколько видов культур с разными максимальными значениями и сроками уборки (пшеница, подсолнечник); б) угодья с многолетними кормовыми травами (скашиваемый в конце июня житняк); в) залежные участки со степными сообществами; г) зарастающие залежи с подростом вяза мелколистного, клена ясенелистного, то-

поля. Достоверные отличия интегрального вклада (КД) факторов соседства между классами покрова не обнаружены. При этом в сухом и жарком 2021 г. от эрозионной расчлененности и влияния лесополос в наибольшей степени зависела зеленая масса на полях с подсолнечником и пшеницей. В 2017 г. наиболее высокие значения вклада ландшафтных факторов наблюдались в классах залежей и многолетних кормовых трав.

На вклад позиционного фактора в формирование внутривополевого варьирования урожайности начали обращать пристальное внимание в течение последних десятилетий [Corwin, 2013]. Наше исследование показало значимость ландшафтных соседств и площадных соотношений элементов агроландшафта для устойчивости внутривоплевых контрастов зеленой фитомассы.

Пространственная структура природно-антропогенного агроландшафта наиболее сильно влияла на внутривополеное варьирование зеленой фитомассы во влажном 2017 г., который отличался повышенными июньскими влагозапасами в почве после снежной зимы и влажной весны. При этом основное значение имела близость плакорных участков полей к эрозионным формам рельефа. Поскольку во все сроки, кроме апрельских, преобладали положительные корреляции, можно утверждать, что возрастание фитомассы при близости эрозионных форм может возникать в результате увеличенного снегонакопления в ложбинах, его более длительного задержания в весенний период, роста влажности почвы и более близкого залегания грунтовых вод в засушливый летний период. Более редкое явление в июне – снижение NDVI с приближением плакорных пикселей к ложбинам (4–11% полей в зависимости от года с достоверными отрицательными корреляциями), что может объясняться смывом гумусового горизонта.

Ранее было установлено, что роль лесополос в формировании урожайности неоднозначна в зависимости от влажности конкретного года [Манаенков, 2023]. Наши данные подтверждают непостоянство зон влияния лесополос на внутривополеное варьирование фитомассы. Для жаркого и сухого 2010 г. обнаружено, что лесополосы играли роль в уменьшении испарения благодаря уменьшению скорости ветра. Однако более значимым фактором оказалась общая площадь лесополос, а не их качество. В более влажный 2017 г. воздействие лесополос на фитопродукционный процесс стало менее выраженным. Тем не менее в этот же год отмечено, что эрозионные формы рельефа способствовали сохранению зеленой массы. Это поддерживает гипотезу о том, что осадки в начальный период вегетации имеют большое значение для роста растений, где эрозионные формы способствуют сохранению влаги.

Значимость вклада состояния лесополос прослеживалась во все сроки наблюдений, но стабильно не повторялась ни для одного из полей. Следовательно, невозможно говорить о единой пространственной закономерности, описывающей повышенную чувствительность фитомассы к состоянию лесополос. Нестабильность влияния факторов соседства может быть объяснена влиянием не включенных в регрессионную модель факторов: внесения удобрений, агротехнических приемов и состояния почв (трофность, засоленность, смытость, мозаичность гранулометрического состава). Этим факторам обычно уделяется основное внимание в литературе по сельскохозяйственным наукам [Бадреев, 2008; Lyle et al., 2013; Епишева, 2020; Глазунов и др., 2018], однако при малом внимании к факторам соседства.

Лучше всего ландшафтные факторы объясняют изменчивость NDVI сельскохозяйственных полей в северной части полигона исследования. Данные участки расположены на террасах, ежегодно распахиваются и заняты однолетними культурами, что подтвердилось и в 2024 г. Наименее зависимыми от ландшафтного соседства оказались поля под многолетними кормовыми травами и залежами, расположенные в южной части полигона, частично приуроченные к денудационной равнине.

Попарные различия между классами растительного покрова по чувствительности к соседству за три июньских срока не выявлены. Поэтому правомерно утверждать, что ландшафтное соседство влияет на внутривополеное варьирование зеленой фитомассы независимо от того, какая именно культура выращивается на полевом участке в данный год. Однако в жаркие сухие годы наибольшая зависимость от ландшафтных факторов соседства характерна для полей с однолетними зерновыми и масличными культурами. Во влажные годы наибольшая значимость соседства характерна для полевых участков с наиболее близкими к естественным разнотравно-злаковыми сообществами на залежах или посевах многолетних кормовых злаков. Возможно, это свидетельствует об ослаблении значимости соседств по мере приближения восстановительной сукцессии к естественному функционированию степного ландшафта.

Проведенное исследование имеет ряд ограничений, связанных с дефицитом информации о севооборотах и агротехнических приемах. Так, был бы интересен ответ на вопрос, как ландшафтное соседство влияет на неравномерность сроков созревания культур внутри поля. Однако судить об этом на основании значений NDVI было бы некорректно. Фактически спутниковая съемка дает информацию только о времени скашивания, да и то не о точной дате, а о той дате, для которой спутник уже зафиксировал резкое уменьшение фи-

томассы по сравнению с предыдущим доступным снимком. Когда убирается урожай, то скашивание ведется одновременно на всем поле независимо от готовности отдельных его секторов. Перспективу решения вопроса мы видим в детальных наземных измерениях NDVI накануне уборки урожая средствами наземных радиометров. Подобный опыт уже имеется [Гулянов, 2019]. Кроме того, оценка значимости влагонакопления в эрозионных формах при недостатке топографических материалов могла бы быть уточнена в будущем построением цифровых моделей рельефа по снимкам с беспилотных летательных аппаратов.

ВЫВОДЫ

Внутриполевое варьирование зеленой фитомассы может быть более чем наполовину обусловлено факторами ландшафтного соседства с эрозионными формами и лесополосами. Наиболее стабильное влияние на зеленую фитомассу сельскохозяйственных культур оказывает фактор соседства с эрозионными формами рельефа, наименьшее – состояние лесополос.

Для 44% территории исследования зависимость зеленой фитомассы от ландшафтного соседства стабильна от года к году и высоко значима.

Ландшафтные факторы соседств с лесополосами и их состояние имеют более существенное влияние на июньскую фитомассу в жаркие и сухие годы, а близость к эрозионным формам – в годы с обильным зимним и весенним увлажнением.

Соседство сельскохозяйственных угодий с лесополосами почти всегда имеет положительное значение для фитомассы на полях. В большинстве случаев площадь смежных живых лесонасаждений имеет большее значение, чем их состояние. Это свидетельствует о важности сохранения любых типов конструкций лесополос на полигоне исследования.

Для групп полей достоверно установлено пороговое значение соседств с эрозионными формами, при достижении которого зеленая фитомасса на плакорных поверхностях возрастает (15% территории для окрестности в 150 м, т. е. 1,02 га), а также пороговое значение соседств с лесополосами (6% территории для окрестности в 150 м, т. е. 0,45 га).

Деление культур на группы однолетних, многолетних, а также анализ залежей не выявили достоверных попарных различий по вариабельности зеленой фитомассы, что свидетельствует о достоверном влиянии ландшафтных факторов, вне зависимости от типа выращиваемых культур.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 24-17-00045). Авторы выражают благодарность О.Г. Калмыковой за содействие в организации полевых исследований и консультации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бадреев Р.М. Влияние нормы высева, способов внесения и уровня азотного питания на урожайность и качество зерна многозерного и двузерного ячменя на черноземах южных Оренбургского Предуралья: дис. ... канд. с.-х. наук. Оренбург, 2008. 210 с.
- Глазунов Г.П., Гендугов В.М., Евдокимова М.В. и др. Выбор и проверка модели сезонной динамики показателей биомассы сельскохозяйственных культур с использованием вегетационных индексов // Материалы II Всероссийской научной конференции «Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве». СПб.: ФГБНУ АФИ, 2018. С. 75–84.
- Гулянов Ю.А. Мониторинг фитометрических параметров с использованием инновационных методов сканирования посевов // Таврический вестник аграрной науки. 2019. № 3(19). С. 64–76. DOI: 10.33952/2542-0720-2019-3-19-64-76.
- Епишева Ю.Ю. Структура урожая и урожайность зерновых культур на черноземах южных Оренбургской области // Роль агрономической науки в оптимизации технологий возделывания сельскохозяйственных культур. Ижевск, 2020. С. 136–139.
- Кирюшин В.И. Экологические основы проектирования сельскохозяйственных ландшафтов. СПб.: КВАДРО, 2018. 568 с.
- Климентьев А.И. Почвенно-географическое районирование Оренбургской области // Вопросы степеведения. Оренбург, 2005. С. 83–95.
- Манаенков А.С., Подгаецкая П.М., Попов В.С. Влияние ползащитных лесных полос на развитие яровой пшеницы в приопушечной зоне посевов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2023. № 4. С. 97–106. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.9.
- Письман Т.И., Ботвич И.Ю., Сидько А.Ф. Определение сезонной динамики урожайности агроценозов на основе спутниковой информации и математической модели // Известия РАН. Серия биологическая. 2014. № 2. С. 196–202. DOI: 10.7868/s0002332914020106.
- Хорошев А.В., Ткач К.А., Муртазина Д.У. Влияние ландшафтной структуры на урожайность зерновых культур в степной зоне Казахстана // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2018. № 3. С. 62–69.
- Черемисинов А.Ю., Снахова А.С. Агроресомелиорация. Воронеж: ВГАУ, 2014. 212 с.
- Birtwistle A.M., Laituri M., Bledsoe B. et al. Using NDVI to measure precipitation in semi-arid landscapes, Journal of Arid Environments, 2016, vol. 131, p. 15–24.
- Blackmore S., Godwin R.J., Fountas S. The analysis of spatial and temporal trends in yield map data over six years,

- Biosystems Engineering*, 2003, vol. 84, p. 455–466, DOI: 10.1016/S1537-5110(03)00038-2.
- Corwin D. Site-specific management and delineating management zones, *Precision Agriculture for Food Security and Environmental Protection*, M. Oliver (ed.), Earthscan, London, UK, 2013, p. 135–157.
- Detsch F., Otte I., Appelhans T. et al. Seasonal and long-term vegetation dynamics from 1-km GIMMS-based NDVI time series at Mt. Kilimanjaro, Tanzania, *Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 178, p. 70–83, DOI: 10.1016/j.rse.2016.03.007.
- Duan T., Chapman S.C., Guo Y. et al. Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle, *Field Crops Research*, 2017, vol. 210, p. 71–80, DOI: 10.1016/j.fcr.2017.05.025.
- Eckert S., Hüsler F., Liniger H. et al. Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia, *Journal of Arid Environments*, 2015, vol. 113, p. 16–28, DOI: 10.1016/j.jaridenv.2014.09.001.
- Johansen B., Tømmervik H. The relationship between phytomass, NDVI and vegetation communities on Svalbard, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, vol. 27, p. 20–30, DOI: 10.1016/j.jag.2013.07.001.
- Kiryanov-Gref F.K., Khoroshev A.V., Anatskaya K.A. Factors of intra-field phytomass variability in steppe agricultural landscapes of Kazakhstan, *Bulletin of the Karaganda University, "Biology. Medicine. Geography" Series*, 2024, vol. 29, iss. 1(113), p. 150–158, DOI: 10.31489/2024BMG1/150-158.
- Lyle G., Lewis M., Ostendorf B. Testing the temporal ability of LANDSAT imagery and precision agriculture technology to provide high resolution historical estimates of wheat yield at the farm scale, *Remote Sensing*, 2013, vol. 5, p. 1549–1567, DOI: 10.3390/rs5041549.
- Mahajan U., Bundel B.R. Drones for normalized difference vegetation index (NDVI), to estimate crop health for precision agriculture: A cheaper alternative for spatial satellite sensors, *Proceedings of the International Conference on Innovative Research in Agriculture, Food Science, Forestry, Horticulture, Aquaculture, Animal Sciences, Biodiversity, Ecological Sciences and Climate Change (AFHABEC-2016)*, Delhi, India, 2016, vol. 22, p. 31.
- Verhulst N., Govaerts B. The normalized difference vegetation index (NDVI) Green Seeker TM handheld sensor: Toward the integrated evaluation of crop management, part A, *Concepts and case studies*, Mexico, D.F., 2010, DOI: 10.1016/j.funeco.2023.101233.

Поступила в редакцию 23.08.2024

После доработки 25.09.2024

Принята к публикации 15.10.2024

LANDSCAPE DRIVERS OF PHYTOMASS VARIATION ON AGRICULTURAL LANDS IN THE ORENBURG CIS-URALS

N.V. Ilinova¹, A.V. Khoroshev²

^{1,2} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Science

¹ Post-graduate student; e-mail: ilinova_nv@mail.ru

² Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: avkh1970@yandex.ru

Predictability and low intra-field variability of yields are the key interest of agriculture. The dependence of productivity on hydrothermal conditions could be determined by the spatial structure of landscape. We used the example of a steppe agricultural landscape in the Orenburg region to study the influence of the areal and qualitative characteristics of the landscape neighborhood on the intra-field variability of phytomass. We used vegetation indices (NDVI) for 92 field sites with a typical area of 100 hectares based on 42 Landsat satellite images over a 30-year period, with an average of 4–6 images per season. The NDVI of field pixels was considered as a dependent variable, while the areas of erosion landforms and live forest belts as well as the total NDVI of forest belts within the distance of 150 m were independent ones. Types of crops and the properties of forest belts and hollows were described during field studies. Cluster analysis was used to recognize crop classes based on the similarity of the annual NDVI variations to those during the years of field observations. Multiple regression equations were compiled to calculate the total contribution of three neighborhood factors to the intra-field variation in phytomass, as well as their individual contributions. We compared the parameters of the equations for June dates with different heat and moisture supply over three years. We found that the intra-field variation in green phytomass could be for more than a half determined by proximity to erosion forms and forest belts. The fields were classified according to the stability of the influence of forest belts and hollows under different hydrothermal conditions. The most stable influence on the green phytomass of crops is correlated with a proximity to erosion landforms, the least – with the state of forest belts. The dependence of green phytomass on landscape neighborhood was stable from year to year and highly significant for 44% of the study area. The proximity to forest belts and their state more strongly influence the June phytomass during hot and dry years, and proximity to erosion forms during years with abundant winter and spring precipitation. The closer to forest belts, the greater is phytomass in almost all fields. The area of adjacent live forest stands is more

important than their state. Threshold values have been established for neighborhoods with erosion landforms and live forest belts, which control the green phytomass increase within the interfluves. A significant influence of neighborhood factors on phytomass is manifested regardless of the crop type.

Keywords: agricultural landscape, NDVI, neighborhood, forest belt, hollow, hydrothermal conditions

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project 24-17-00045). The authors express their gratitude to O.G. Kalmykova for her assistance in the organization of field work and for consultations.

REFERENCES

- Badreev R.M. Vliyanie normy vyseva, sposobov vneseniya i urovnya azotnogo pitaniya na urozhaynost' i kachestvo zerna mnogorjadnogo i dvurjadnogo jachmenja na chernozemah juzhnyh orenburgskogo Predural'ja [The influence of seeding rate, application methods and nitrogen nutrition level on the yield and grain quality of multi-row and two-row barley on southern chernozems of the Orenburg Cis-Urals], Ph.D. Thesis, Orenburg, 2008, 210 p. (In Russian)
- Birtwistle A.M., Laituri M., Bledsoe B. et al. Using NDVI to measure precipitation in semi-arid landscapes, *Journal of Arid Environments*, 2016, vol. 131, p. 15–24.
- Blackmore S., Godwin R.J., Fountas S. The analysis of spatial and temporal trends in yield map data over six years, *Biosystems Engineering*, 2003, vol. 84, p. 455–466, DOI: 10.1016/S1537-5110(03)00038-2.
- Cheremisinov A.Yu., Spakhova A.S. *Agrolesomeliatsiya* [Agroforestry], Voronezh, VGU Publ., 2014, 212 p. (In Russian)
- Corwin D. Site-specific management and delineating management zones, *Precision Agriculture for Food Security and Environmental Protection*, M. Oliver (ed.), Earthscan, London, UK, 2013, p. 135–157.
- Detsch F., Otte I., Appelhans T. et al. Seasonal and long-term vegetation dynamics from 1-km GIMMS-based NDVI time series at Mt. Kilimanjaro, Tanzania, *Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 178, p. 70–83, DOI: 10.1016/j.rse.2016.03.007.
- Duan T., Chapman S.C., Guo Y. et al. Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle, *Field Crops Research*, 2017, vol. 210, p. 71–80, DOI: 10.1016/j.fcr.2017.05.025.
- Eckert S., Hüsler F., Liniger H. et al. Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia, *Journal of Arid Environments*, 2015, vol. 113, p. 16–28, DOI: 10.1016/j.jaridenv.2014.09.001.
- Episheva Yu.Yu. Struktura urozhaya i urozhaynost' zernovykh kul'tur na chernozemakh yuzhnykh Orenburgskoy oblasti [Structure of crop yield and productivity of grain crops on southern chernozem of the Orenburg region], *Rol' agronomicheskoy nauki v optimizatsii tekhnologiy vozdeystviya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [The role of agronomy in optimization of the crop cultivation technologies], Izhevsk, 2020, p. 136–139. (In Russian)
- Glazunov G.P., Gendugov V.M., Evdokimova M.V. et al. [Selection and testing of a model of seasonal dynamics of crop biomass using the vegetation indices], *Materialy II Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii "Primenenie sredstv distantsionnogo zondirovaniya Zemli v sel'skom khozyaystve"* [Materials of the II All-Russian Scientific Conference "Application of Earth Remote Sensing in Agriculture"], Sankt-Peterburg, FGBNU AFI Publ., 2018, p. 75–84. (In Russian)
- Gulyanov Yu.A. Monitoring fitometricheskikh parametrov s ispol'zovaniem innovatsionnykh metodov skanirovaniya posevov [Monitoring of phytometric parameters using innovative methods of scanning crops], *Tavricheskiy vestnik agrarnoy nauki*, 2019, vol. 3, no. 19, p. 64–76, DOI: 10.33952/2542-0720-2019-3-19-64-76. (In Russian)
- Johansen B., Tømmervik H. The relationship between phytomass, NDVI and vegetation communities on Svalbard, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, vol. 27, p. 20–30, DOI: 10.1016/j.jag.2013.07.001.
- Khoroshev A.V., Tkach K.A., Murtazina D.U. Vliyanie landshaftnoy struktury na urozhaynost' zernovykh kul'tur v stepnoy zone Kazakhstana [The influence of landscape structure on the yield of grain crops in the steppe zone of Kazakhstan], *Vestnik Moskovskogo Universiteta, Ser. 5, Geogr.*, 2018, vol. 73, no. 3, p. 62–69. (In Russian)
- Kiryanov-Gref F.K., Khoroshev A.V., Anatskaya K.A. Factors of intra-field phytomass variability in steppe agricultural landscapes of Kazakhstan, *Bulletin of the Karaganda University, "Biology. Medicine. Geography" Series*, 2024, vol. 29, iss. 1(113), p. 150–158, DOI: 10.31489/2024BMG1/150-158.
- Kiryushin V.I. *Ekologicheskie osnovy proektirovaniya sel'skokhozyaystvennykh landshaftov* [Ecological principles of designing agricultural landscapes.], Sankt-Peterburg, KVADRO Publ., 2018, 568 p. (In Russian)
- Kliment'ev A.I. [Soil-geographical zoning of the Orenburg region], *Voprosy stepevedeniya* [Issues in steppe studies], Orenburg, 2005, p. 83–95. (In Russian)
- Lyle G., Lewis M., Ostendorf B. Testing the temporal ability of LANDSAT imagery and precision agriculture technology to provide high resolution historical estimates of wheat yield at the farm scale, *Remote Sensing*, 2013, vol. 5, p. 1549–1567, DOI: 10.3390/rs5041549.
- Mahajan U., Bundel B.R. Drones for normalized difference vegetation index (NDVI), to estimate crop health for precision agriculture: A cheaper alternative for spatial satellite sensors, *Proceedings of the International Conference on Innovative Research in Agriculture, Food Science, Forestry, Horticulture, Aquaculture, Animal Sciences, Biodiversity, Ecological Sciences and Climate Change (AFHABEC-2016)*, Delhi, India, 2016, vol. 22, p. 31.
- Manaenkov A.S., Podgaetskaya P.M., Popov V.S. Vliyanie polezashchitnykh lesnykh polos na razvitie yarovoy pshenitsy v priopushchnoy zone posevov [The influence of forest belts on the development of spring wheat in the edge zone of crops], *Lomonosov Geography Journal*, 2023, vol. 78, no. 4, p. 97–106, DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.9. (In Russian)

Pis'man T.I., Botvich I.Yu., Sid'ko A.F. Opredelenie sezonnoy dinamiki urozhaynosti agrotsenozov na osnove sputnikovoy informatsii i matematicheskoy modeli [Determination of the seasonal dynamics of the yield of agrocenoses based on satellite information and a mathematical model], *Izv. Akad. Nauk, Ser. Biol.*, 2014, no. 2, p. 196–202, DOI: 10.7868/s0002332914020106. (In Russian)

Verhulst N., Govaerts B. *The normalized difference vegetation index (NDVI) Green Seeker TM handheld sensor: Toward the integrated evaluation of crop management, Part A, Concepts and case studies*, Mexico, D.F., 2010, DOI: 10.1016/j.funeco.2023.101233.

Received 23.08.2024

Revised 25.09.2024

Accepted 15.10.2024

ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ ВОДНОГО РЕЖИМА МАЛЫХ РЕК БАССЕЙНА ВОЛГИ ЗА ПЕРИОД ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

И.А. Жуков¹, Д.Н. Айбулатов²

^{1,2} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши*

¹ *Аспирант; e-mail: les-96@yandex.ru*

² *Науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: gidroden@mail.ru*

В настоящее время основные исследования качественных и количественных гидрологических характеристик и динамики их изменений ведутся на средних и больших реках. Изученность же гидрологических характеристик малых рек России крайне мала. Учитывая прогрессирующее ухудшение экологического состояния рек, влияющее в первую очередь на внутригодовое распределение стока воды именно на малых реках, изучение процессов формирования стока, его изменчивости и внутригодовых изменений становится важнейшей задачей гидрологии. В статье на основе репрезентативных гидрологических постов на малых реках изучаемой территории рассмотрены изменения показателей внутригодового распределения стока малых рек в бассейне Волги. Произведен анализ водного режима малых рек до и после начала глобальных гидрологических изменений. Выявлены пространственно-временные тенденции в изменении внутригодового распределения стока воды малых рек бассейна Волги. В работе впервые представлено картирование тенденций изменения качественных и количественных гидрологических характеристик стока воды малых рек.

Ключевые слова: речной сток, фазы водного режима, внутригодовое распределение стока

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.7

ВВЕДЕНИЕ

Предметом исследований являются изменения в характеристиках многолетнего и внутригодового распределения стока воды малых рек на объекте исследования – бассейне Волги.

Река Волга – крупнейшая по длине река европейской территории России. Исследуемая часть бассейна с юга ограничена нижним бьефом Куйбышевского водохранилища.

Цель исследования – выявить тенденции изменений стока воды малых рек бассейна Волги и его генетических составляющих, установить сроки начала глобальных гидрологических изменений, а также сравнить полученные результаты с аналогичными данными на средних и больших реках для определения схожести динамики и закономерностей гидрологических изменений стока воды и его генетических составляющих у малых и больших рек.

Актуальность данных исследований связана со слабой изученностью водного режима и внутригодового распределения стока малых рек – самых распространённых рек на территории России.

Согласно нормативной документации (ГОСТ 19179-73 и СП 529.1325800.2023), а также монографии [Алексеевский и др., 1998] в исследовании принято определение малой реки, как реки, бассейн которой имеет площадь не более 2000 км² и гидрологиче-

ский режим которой под влиянием местных факторов может быть несвойствен для рек этой зоны.

Основная доля речной сети приходится на малые реки, количество которых составляет 98% общего числа рек, а длина – 71% суммарной длины всех водотоков страны.

Средняя густота речной сети территории 0,43 км/км², наибольшая – 0,75 км/км² в верховьях Ветлуги, наименьшая – 0,20 км/км² в Мещерской низменности. Средняя густота речной сети составляет 0,42 км/км² [Георгиевский, 2015]. Реки исследуемой территории относятся к рекам с восточно-европейским типом водного режима (по классификации Б.Д. Зайкова).

Средняя величина суммы годовых осадков за период с 1970 по 2020 г. для исследуемой территории имеет явный восходящий тренд, зафиксированный на всех метеостанциях от самой северной (г. Вытегра – таежная зона) до самой южной (г. Ульяновск – лесостепная зона). Годовая сумма в основном прирастает увеличением жидких осадков, а не твердых [Третий оценочный..., 2022]. Максимальный прирост осадков отмечен в июне, а также в апреле, августе и ноябре.

По данным всех привлечённых в настоящее исследование метеорологических станций в период с 1932 по 2018 г. наблюдается повышение температуры воздуха. Средняя многолетняя температура

увеличилась с $4,1^{\circ}\text{C}$ в 1953 г. до $5,4^{\circ}\text{C}$ к 2018 г., т. е. более чем на 1°C . Причина потепления связана с природными циклами, а также с увеличением хозяйственной деятельности человека.

Выявленные тенденции изменения количества осадков по сравнению с температурными изменениями имеют более низкую статистическую значимость и менее устойчивы [Третий оценочный..., 2022].

Изучение гидрологического режима для средних и больших рек в настоящее время выполнено для всех рек Волжского, Окского и Камского бассейнов. В настоящем исследовании средняя река, согласно действующей нормативной документации (СП 529.1325800.2023), принята как река, имеющая площадь бассейна от 2000 до 50 000 км². К большим рекам относятся реки, протекающие в пределах нескольких географических зон и имеющие площадь бассейна более 50 000 км². Полученные пространственные и временные тенденции изменений стока воды по фазам водного режима освещены в трудах Н.Л. Фроловой [Фролова и др., 2022], М.В. Болгова [Болгов и др., 2014], Н.И. Алексеевского [Алексеевский и др., 2013], В.Ю. Георгиевского [Георгиевский, 2015] и других авторов. Для всего Волжского бассейна выполнено картирование качественных и количественных гидрологических характеристик.

Изучение гидрологических характеристик малых рек на исследуемой территории с середины 1950-х гг., помимо сети гидрологических постов, производилось на стоковых станциях. По результатам наблюдений, внутригодовой режим малых рек в разное время исследовался в работах В.С. Дыгало, Г.Е. Ландберга, а средних рек – в работах В.Ю. Георгиевского [Георгиевский, 2015]. Региональные обобщения гидрологических характеристик выполнены Н.И. Коронкевичем [Коронкевич и др., 2014].

Однако проведенные исследования выполнялись в основном применительно к одному локальному водосбору. Картирование качественных и количественных гидрологических характеристик для малых рек не производилось.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Речной сток в различных районах может отличаться не только числовым значением параметров, но и составом действующих факторов и характером происходящих при этом процессов. Внутригодовое распределение речного стока может в той или иной степени видоизменяться под влиянием вновь возникающих, ранее не существовавших факторов. Ряд факторов стока, таких как уклон и шероховатость поверхности, протяженность путей склонового стекания, величина заболоченности и леси-

стости бассейна, наличие карстовых процессов и разгрузки грунтовых вод, угол и азимут падения водоупорных горизонтов, носит локальный характер [Алексеевский и др., 2013].

В настоящее время подавляющая часть исследований речного стока проводится на средних и больших реках, обходя вниманием гидрологические процессы, происходящие на малых реках, поэтому необходимо изучить особенности гидрологического режима малых рек и сравнить полученную динамику изменений с аналогичной динамикой по средним и большим рекам. Для этого необходимо получить данные о ежедневных расходах воды с гидрологических постов на малых реках, построить динамические карты и выявить закономерности изменений речного стока малых рек и его генетических составляющих.

Методика выбора гидрологических постов для исследования заключалась в следующем: гидрологические посты, привлекаемые для исследования, должны равномерно располагаться по исследуемой территории, иметь максимальные ряды гидрологических наблюдений в бассейнах соседних средних рек. При наличии в бассейне реки нескольких постов (4–6) на малых реках выбирается один пост с наиболее длинным рядом наблюдений, который наиболее полно характеризует условия формирования речного стока в районе. Посты выбирались на тех реках, в бассейнах которых отсутствуют пруды, минимально влияние болот на речной сток, отсутствуют водохранилища, нет карста, не ведется добыча полезных ископаемых, не производится рубка леса. В исследуемых бассейнах должно отсутствовать антропогенное воздействие на речной сток. Следуя этой методике, выбраны ряды ежедневных расходов воды для 57 гидрологических постов за период с 1932 по 2018 г. [Гидрологический ежегодник, 2018] (рис. 1). Площадь бассейнов рек, привлеченных для исследования, варьирует от 10 до 1990 км².

Для оценки влияния климатических факторов на формирование стока малых рек к исследованию привлечены данные о величине ежедневной суммы осадков и среднесуточной температуры воздуха.

На исследуемой территории действует 178 метеорологических станций. Ряды метеорологических наблюдений на всех станциях являются достаточными, их продолжительность составляет для температуры воздуха и осадков более 50 лет.

Для исследования гидрологического режима для каждого задействованного поста определена ближайшая метеорологическая станция (находящаяся на расстоянии до 100 км от центра тяжести речного бассейна). Всего в исследовании задействованы данные с 48 метеорологических станций.

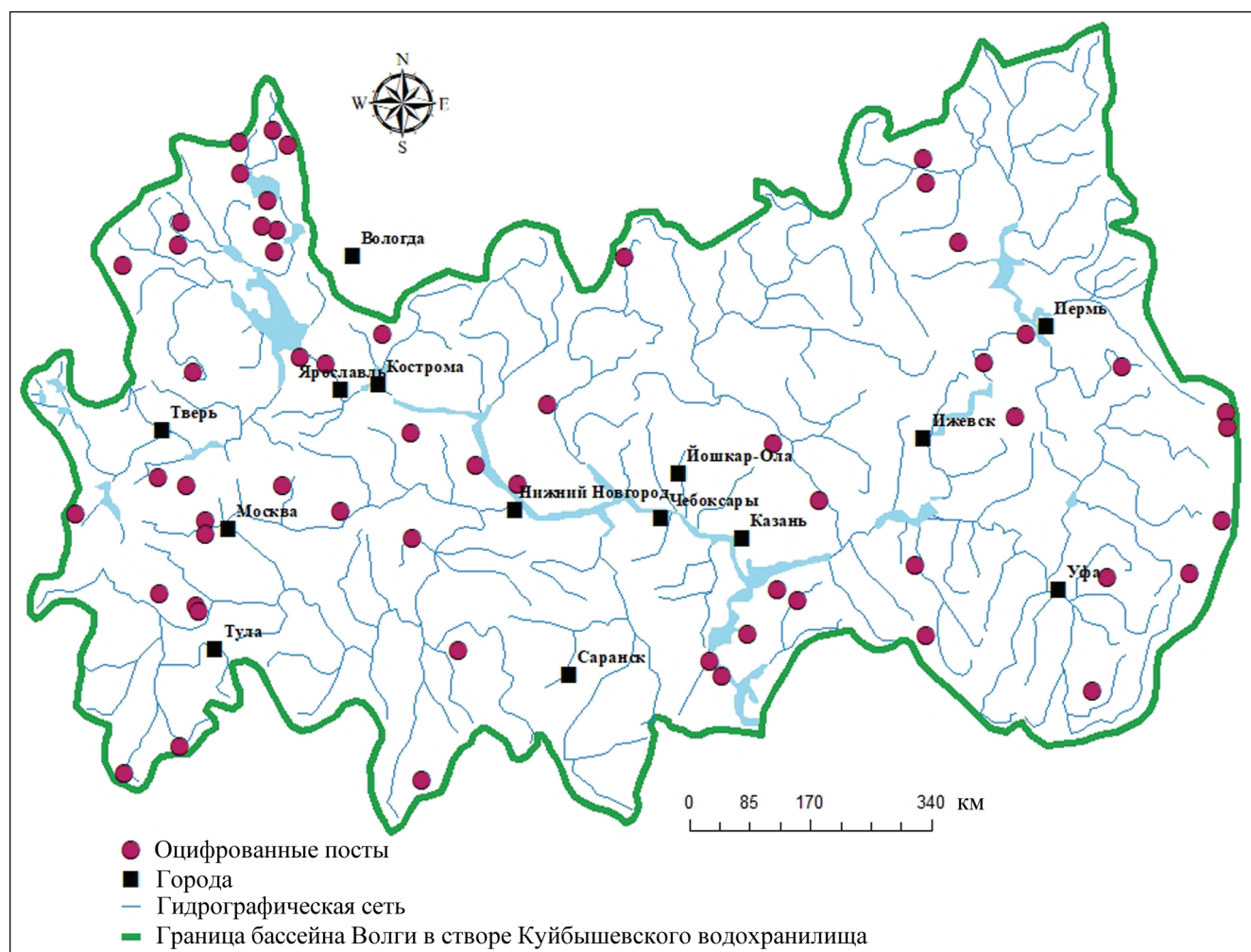


Рис. 1. Регион исследований с гидрологическими постами, по которым проводилась оценка изменений стока

Fig. 1. The study region with hydrological posts, for which runoff changes were assessed

Исследование проводилось с помощью метода расчленения гидрографа по Б.И. Куделину. Для анализа водного режима рек и их источников питания проводили расчленение гидрографа на генетические составляющие годового стока воды [Куделин, 1966].

По ежедневным наблюдениям за расходами воды на малых реках исследуемой территории и данным с ближайших к ним метеостанций выполнено расчленение гидрографов с помощью специальной программы GrWat 3.0.M, основанной на методе Б.И. Куделина [Куделин, 1966].

Работа алгоритма заключается в автоматическом отделении весеннего половодья, подземного стока, дождевых и оттепельных паводков в зависимости от особенностей водного режима и изменения 49 гидрологических характеристик каждой отдельной реки [Kireeva и др., 2022].

Программный комплекс GrWat, учитывая особенности каждой реки, позволяет выделить на гидрографе подземную составляющую, снеговое питание реки, а также дождевое питание рек в разные фазы водного режима.

Все посты, привлеченные для исследования, имеют продолжительность наблюдений с 1970 г. С этого периода для всех исследуемых гидрологических постов отсутствуют пропуски в данных и не осуществлялся их перенос. Для гидрологических постов с короткими значениями рядов наблюдений проводилось восстановление расходов по имеющимся по ним данным об уровнях воды. Данные о ежедневных расходах воды до 1970 г. в исследовании не использовались.

Исследования выполнялись только для многолетней динамики изменений гидрологических характеристик речного стока малых рек во все фазы водного режима, изменения количественных характеристик стока (параметры распределения стока, годовой модуль стока, слой стока половодья, расходы воды заданной обеспеченности и др.) рассмотрены в других исследованиях [Жуков и др., 2022, 2024].

Получена многолетняя динамика изменений 49 гидрологических характеристик речного стока (динамика годового стока, даты начала фаз водно-

го режима, изменение объема весеннего половодья и др.) для 57 задействованных постов для каждой фазы водного режима и годового стока.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Подробно проанализировано распределение по исследуемой территории характеристик, описывающих изменения стока воды во все фазы водного режима. В настоящем исследовании выполнено сравнение динамики изменений годового стока воды и его генетических составляющих за 1987–2018 гг. по сравнению с 1970–1986 гг.

Такие периоды для сравнения изменений генетических составляющих стока воды малых рек выбраны потому, что на исследуемых постах на основе анализа построенных разностно-интегральных кривых время начала гидрологических изменений фиксируется до 1986 г. Таким образом, в исследовании установлено, насколько существенны изменения водного режима малых рек и его генетических составляющих после начала гидрологических изменений.

Изменения объема годового стока воды на исследуемой территории произошли равномерно – в 95% рассмотренных бассейнов он увеличился (рис. 2А, табл. 1). В результате исследований установлено, что с продвижением с севера на юг количество бассейнов, в которых наблюдается уменьшение объема годового стока воды или отсутствие его изменений, увеличивается. Выявлено, что с продвижением с запада на восток доля роста объема годового стока воды уменьшается. Причиной почти повсеместного увеличения годового объема стока воды является увеличение годовой суммы осадков на всей исследуемой территории (до 15%) [Третий оценочный..., 2022].

Объем половодья изменялся на исследуемой территории неравномерно (см. рис. 2Б, табл. 1). В результате установлено, что в направлении с севера на юг увеличение объема половодья сменяется его уменьшением. Уменьшение объема половодья объясняется увеличением температуры воздуха во время зимней межени, уменьшением глубины промерзания почвы, объема влагозапасов в снеговом покрове перед началом половодья [Третий оценочный..., 2022].

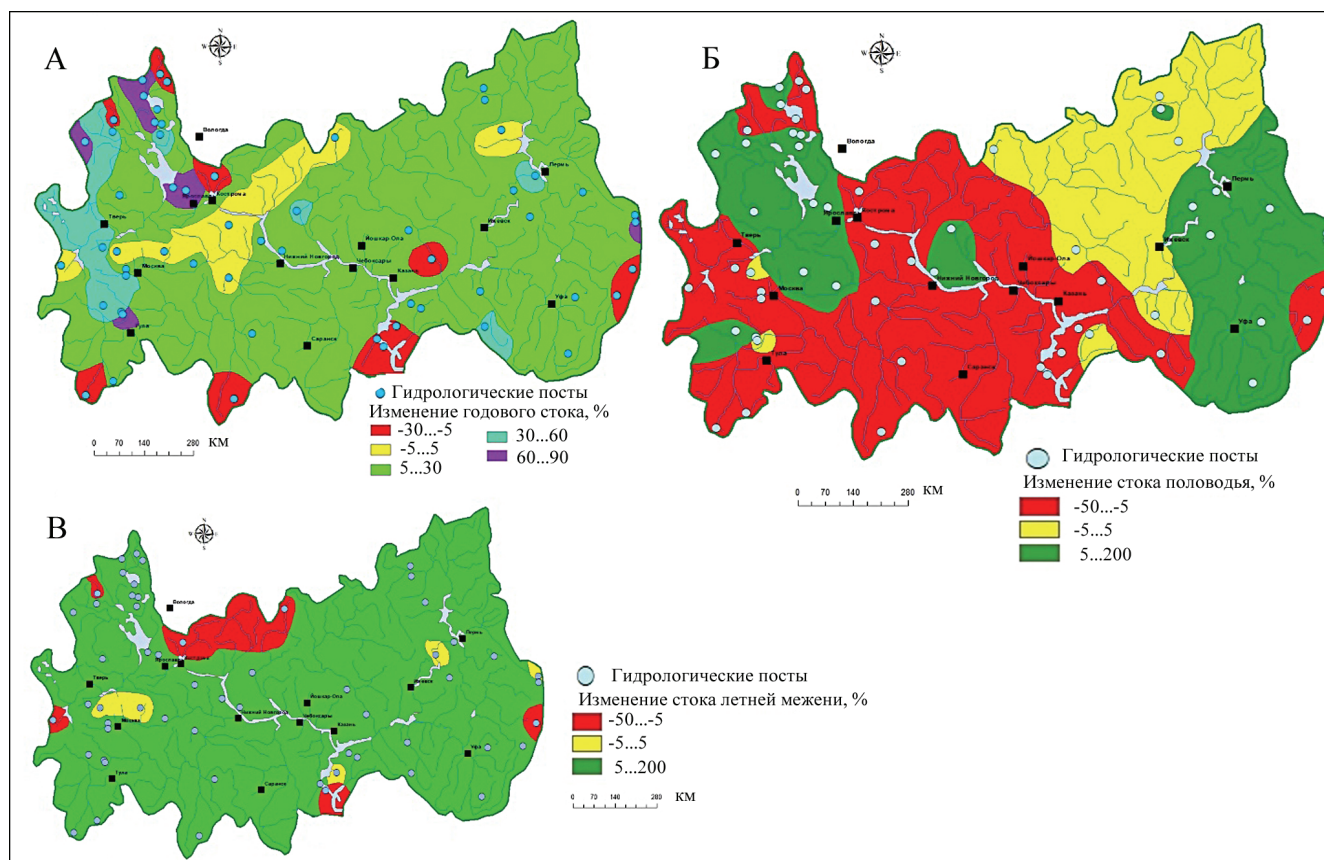


Рис. 2. Изменение водного стока малых рек в 1987–2018 гг. по сравнению с 1970–1986 гг.:

А – годового; Б – половодья; В – летнего межени

Fig. 2. Changes in water runoff of small rivers in 1987–2018 compared to 1970–1986:

A – annual; B – flood; V – summer low-water

Таблица 1

Тенденции изменения стока воды по фазам водного режима, число исследуемых рек

Фазы водного режима	Сток уменьшается	Сток не изменяется	Сток увеличивается
Годовой сток	12	6	39
Сток половодья	24	8	25
Сток паводков	12	8	37
Сток зимней межени	23	1	32
Сток летней межени	6	5	46

Почти во всех исследуемых бассейнах фиксируется увеличение объема дождевого стока (см. табл. 1). Установлено, что в направлении с севера на юг количество бассейнов, в которых наблюдается уменьшение объема дождевого стока или отсутствие его изменений, сокращается, что объясняется увеличением интенсивности и количества дождевых паводков за время летне-осенней межени на исследуемой территории [Третий оценочный..., 2022].

Почти во всех исследуемых бассейнах фиксируется увеличение объема стока летней межени (см. рис. 2В, табл. 1). Установлено, что с продвижением с севера на юг количество бассейнов, в которых наблюдается уменьшение объема летней межени или отсутствие его изменений, сокращается. Причиной увеличения летнего стока служит уменьшение продолжительности половодья, вследствие чего большая часть воды уходит в подземное питание, а летне-осенний меженный сток увеличивается [Третий оценочный..., 2022].

Изменения объема стока зимней межени (без учета зимних паводков) на исследуемой территории произошли разнонаправлено (см. табл. 1), с продвижением с севера на юг уменьшение объема стока зимней межени сменяется его увеличением. Повышение стока зимней межени связано с увеличением количества и продолжительности зимних оттепелей (из-за возрастающего тренда изменения среднесуточных температур воздуха в холодный период года) [Третий оценочный..., 2022] и увеличением в связи с этим доли питания грунтовыми водами.

После завершения анализа количественных и качественных гидрологических характеристик стока воды малых рек проведено их сравнение с аналогичными тенденциями для средних и больших рек.

Результаты анализа пространственного распределения 27 характеристик генетических составляющих стока воды малых рек, полученные тенденции, качественные и количественные характеристики изменения водного режима малых рек сопоставлены с аналогичными данными по средним и большим рекам (табл. 2).

В таблице представлены величины изменений гидрологических характеристик стока воды по фа-

зам водного режима за период с 1987 по 2018 г., по сравнению с периодом до 1986 г. Таким образом, установлено, насколько сильно изменилось внутригодовое распределение стока воды малых рек, а также объем стока воды малых рек в каждую фазу водного режима с началом выявленных гидрологических изменений. И проведено сравнение полученных величин с соответствующими для средних и больших рек.

Установлено, что тренды изменения качественных и количественных гидрологических характеристик в бассейне Волги для малых, средних и больших рек идентичны. Однако интенсивность изменений характеристик у малых рек на 15–35% (в зависимости от фазы водного режима) больше, чем у аналогичных характеристик средних и больших рек.

Построение и анализ разностно-интегральных кривых. Для исследования сроков фиксации начала изменений водного режима малых рек построены разностно-интегральные кривые для ряда среднегодовых расходов воды на исследуемых постах, а также для минимальных расходов зимней и летне-осенней межени, для максимальных расходов половодья и паводков.

В бассейне Оки при продвижении от истока к устью начало гидрологических изменений для минимального летнего стока отмечается во все более поздние сроки. В бассейне Камы смещение сроков наступления гидрологических изменений на более поздние происходит с запада на восток. В бассейне Волги смещение переломного года в сторону более ранних сроков происходит с севера на юг.

В результате совместного анализа количественных гидрологических характеристик для малых и больших рек, а также динамики их изменений установлено, что тренды изменения количественных гидрологических характеристик в разные фазы водного режима в бассейне Волги для малых, средних и больших рек идентичны. Однако, сроки фиксации начала гидрологических изменений характеристик у малых рек на 2–5 лет (в зависимости от фазы водного режима) наступают раньше, чем у аналогичных характеристик средних и больших рек (рис. 3).

Таблица 2

**Величины изменения гидрологических характеристик за период с 1987 по 2018 г.
по сравнению с периодом до 1986 г.**

Характеристика	Малые реки	Большие реки
Начало половодья, дни	–1	–2
Окончание половодья, дни	–8	–5
Количество дней с паводками в зимней межени, дни	–18	–9
Количество дней с паводками в летне-осенней межени, дни	–2	–4
Количество дождевых паводков, шт	9	5
Количество оттепельных паводков, шт	5	3
Максимальный расход дождевых паводков, %	5,06	2,87
Максимальный расход оттепельных паводков, %	28,5	18,7
Минимальный 30-суточный расход за зиму, %	67	52,7
Минимальный 30-суточный расход за лето, %	54,9	34,7
Минимальный месячный расход за зиму, %	69,9	49,1
Минимальный месячный расход за лето, %	104	67,9
Объем годового стока, %	13,4	8,95
Объем грунтового стока зимой, %	62,9	54,9
Объем грунтового стока летом, %	76,7	61,4
Объем грунтового стока, %	67	37,7
Объем дождевого стока вместе с объемом грунтовой составляющей стока, %	37,9	22,7
Объем оттепельного стока без грунтовой составляющей, %	41,6	28,5
Объем оттепельного стока вместе с объемом грунтовой составляющей стока, %	34,6	17,5
Объем половодья без грунтовой составляющей, %	–8,99	–5,98
Объем половодья вместе с наложенными дождевыми паводками и грунтовым стоком, %	–9,11	–6,43
Объем половодья вместе с объемом грунтовой составляющей стока, %	–12,8	–9,21
Объем стока зимней межени, %	50,8	28,5
Объем стока летней межени, %	49,7	35,2
Продолжительность зимней межени, %	–5,93	–4,87
Продолжительность летне-осенней межени, %	8,79	6,82
Продолжительность половодья, %	–8,61	–7,58

Общие закономерности изменения речного стока малых рек. Изменения стока воды малых рек и его составляющих на исследуемой территории являются одним из значимых последствий изменения климата, начавшегося в 1970–1980-е гг. Существенное повышение среднегодовой температуры наблюдается со второй половины 1970-х гг. и составляет в бассейне Волги $\sim 1,55^\circ\text{C}$ [Третий оценочный..., 2022]. Изменения в последние десятилетия отразились на величинах годового, сезонного и минимального стока рек на преобладающей части исследуемой территории, что подтвердилось результатами исследования.

Значительно повысился годовой сток по сравнению с нормой предшествующих многолетних наблюдений. В последние 20–25 лет для большинства рек исследуемой территории фиксируется увеличение водности. В результате исследования установлено, что за 1981–2018 гг. увеличение речного стока малых рек исследуемой территории составило 32% (рис. 4).

В динамике весеннего стока отчетливо проявляется все возрастающий тренд на уменьшение его объема. Однако, для бассейна Камы характерно увеличение весеннего стока. Для рек северо-западной части исследуемой территории

отмечен тренд на увеличение максимальных расходов весеннего половодья (Ветлуга) или его отсутствие (Молога). Тенденция к уменьшению максимальных расходов прослеживается на реках лесостепной и степной зон. Максимальные расходы уменьшились здесь более чем в 2 раза. Превышение весенних максимальных расходов воды над средними меженными сокращается с 10–15 до 3–5 раз.

Увеличение температуры воздуха привело к росту числа и продолжительности оттепелей, сокращению длительности зимнего сезона и увеличению объема стока в зимний меженный период [Третий оценочный..., 2022]. Наиболее существенное увеличение минимального стока (более 50–70%) происходит в верхнем течении Оки и Волги. В нижнем течении Волги минимальный сток увеличивается на чуть меньшие значения 20–40% [Жуков и др., 2024].

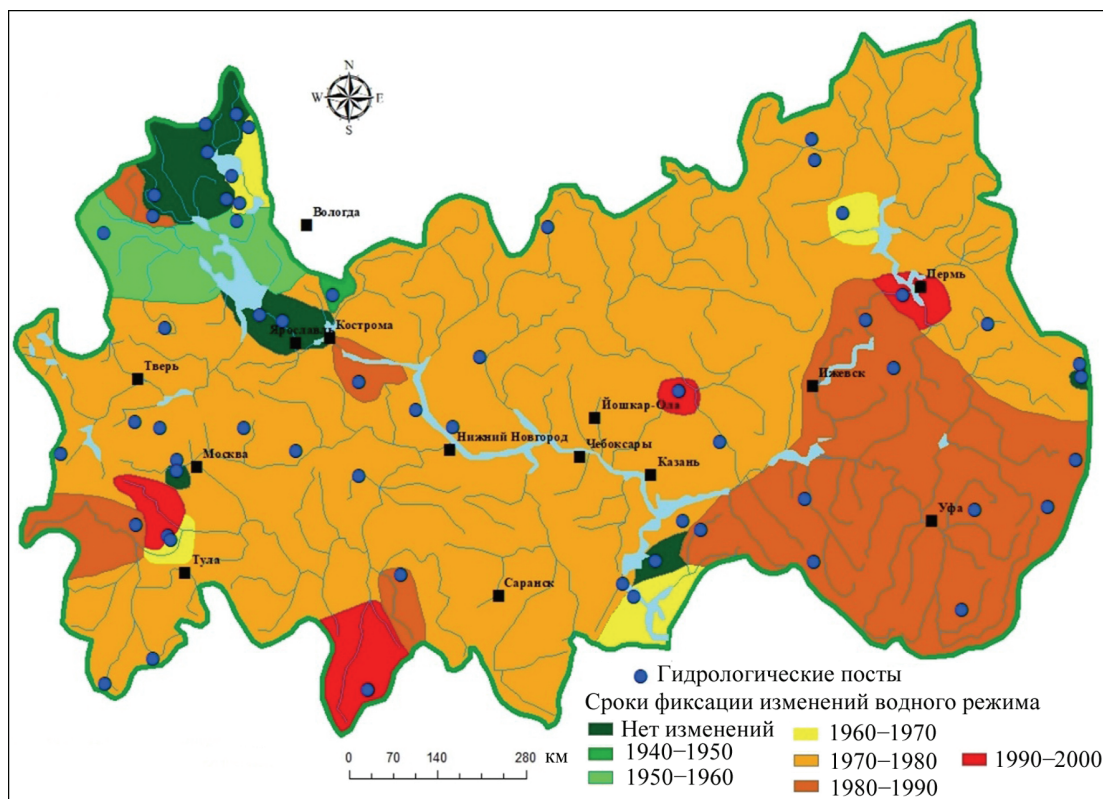


Рис. 3. Сроки начала гидрологических изменений водного режима малых рек

Fig. 3. Timing of the onset of hydrological changes in the water regime of small rivers

ВЫВОДЫ

В результате исследований установлено, что у малых рек бассейна Волги фиксируется повышение годового стока воды (до 35%) по сравнению с нормой предшествующих многолетних наблюдений. У большинства рек выявлено значительное увеличение водности. Динамика межгодовых колебаний и внутригодового распределения стока воды малых рек полностью совпадают с аналогичными данными по средним и большим рекам.

На малых реках бассейна Волги изменения максимальных расходов весеннего половодья не наблюдается или отмечен тренд его уменьшения. Максимальные расходы воды уменьшились более чем в 2 раза. Превышение весенних максимальных расходов воды над средними меженными сокращается с 10–15 до 3–5 раз.

В большинстве исследуемых речных бассейнах зафиксировано увеличение продолжительности и интенсивности паводков. Максимальный расход летних паводков увеличился до 80%. Объем паводочного стока за год увеличился на 40–50%. Увеличение зимних паводков выросло на 25–30%.

В результате исследований выявлена закономерность: чем южнее, тем существеннее изменился речной сток во все фазы водного режима. Тренды изменения качественных и количественных гидрологических характеристик в бассейне Волги для малых, средних и больших рек идентичны. Однако, интенсивность изменений характеристик у малых рек на 15–35% (в зависимости от фазы водного режима) больше, чем у аналогичных характеристик средних и больших рек. Это объясняется тем, что малые водосборы более чутко реагируют на изме-

нение местных факторов формирования речного стока. Поэтому даже небольшие изменения приводят к очень интенсивным изменениям составляющих стока воды.

Также для средних рек характерно неравномерное распределение метеорологических характеристик, в первую очередь выпадения твердых и жидких осадков. Осадки на больших бассейнах могут выпадать очень локально, в то время как в бассей-

нах малых рек жидкие и твердые осадки выпадают на большей части бассейна.

Главный вывод исследования: несмотря на аномальность и атипичность межгодового и внутригодового распределения стока воды малых рек, для них возможно составление гидрологических карт. Также подтверждена схожесть динамик и закономерностей изменений стока воды и его составляющих у малых и больших рек.

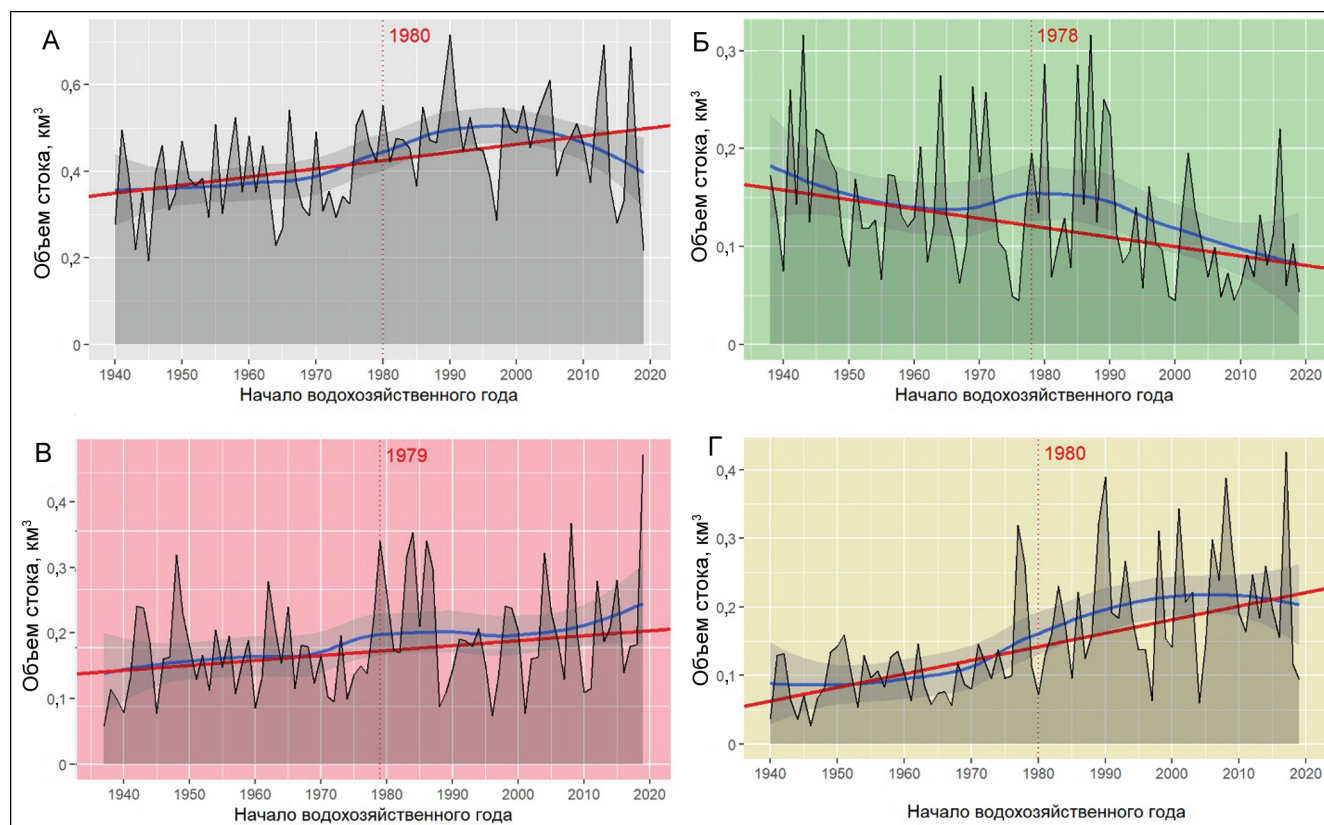


Рис. 4. Изменение составляющих стока воды малых рек за период с 1940 по 2020 г.: А – годовой сток; Б – половодье; В – межень; Г – дождевые паводки; 1980 – средний год выборки

Fig. 4. Changes in the components of water runoff of small rivers for the period 1940–2020: А – annual runoff; Б – flood; В – low-water; Г – rain floods; 1980 – average sampling year

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеевский Н.И., Евстигнеев В.М., Коронкевич Н.И. и др. Малые реки Волжского бассейна / под ред. Н.И. Алексеевского. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 233 с.
- Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л., Антонова М.М. и др. Оценка влияния изменений климата на водный режим и сток рек бассейна Волги // Вода: химия и экология. 2013. № 4. С. 3–12.
- Болгов М.В., Трубецкова М.Д., Филимонова М.К. и др. Современные изменения климатических характеристик и вероятностная оценка изменений минимального стока в бассейне р. Волги // Водное хозяйство России. 2014. № 3. С. 83–99.
- Георгиевский В.Ю. Основные гидрологические характеристики рек бассейна верхней Волги. Ливны, 2015. С. 3–115.

- Гидрологический ежегодник. Т. 1. Вып. 24. Бассейны Волги (среднее и нижнее течение) и Урала. Л.: Гидрометеиздат, 1953–2018.
- Жуков И.А., Айбулатов Д.Н. Гидрологический режим малых рек урбанизированных территорий (на примере Новой Москвы) // Геоиск. 2022. № 4. С. 38–49.
- Жуков И.А., Айбулатов Д.Н. Особенности водного режима верхней Свияги и ее притоков в условиях развития карстовых процессов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2024. № 2. С. 49–59.
- Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Георгиади А.Г. и др. Природные и антропогенные изменения речного стока. Речной сток: пространственно-временная изменчивость и опасные гидрологические явления // Третья

- открытая конференция научно-образовательного центра: сб. тр. М., 2014. С. 22–44.
- Куделин Б.И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1966. 216 с.
- Рец Е.П., Киреева М.Б., Самсонов Т.Е. и др. Алгоритм автоматизированного расчленения гидрографа по методу Б.И. Куделина GrWat: проблемы и перспективы // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 1. С. 27–42. DOI: 10.31857/S032105962201014X.
- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова. СПб.: Научное издание, 2022. 676 с.
- Фролова Н.Л., Магритский Д.В., Киреева М.Б. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 3. С. 251–269. DOI: 10.31857/S032105962203004X.
- Электронные источники
- ГОСТ 19179–73. Гидрология суши. Термины и определения / Государственный комитет СССР по стандартам. М., 1988. 36 с. URL: http://legacy-ipk.meteorf.ru/images/stories/literatura/normdok/30_28.pdf (дата обращения 10.12.2023).
- СП 529.1325800.2023. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М.: Минстрой России, 2023. 103 с. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/b85/grkr0098kt612p7jurpegefctqigb2gy/SP-529.pdf> (дата обращения 15.12.2023).

Поступила в редакцию 15.03.2024

После доработки 10.09.2024

Принята к публикации 15.10.2024

TRENDS OF CHANGES IN WATER REGIME OF SMALL RIVERS IN THE VOLGA RIVER BASIN DURING THE PERIOD OF INSTRUMENTAL OBSERVATIONS

I.A. Zhukov¹, D.N. Aibulatov²

^{1,2} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology

¹ Postgraduate student; e-mail: les-96@yandex.ru

² Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: gidroden@mail.ru

Currently, the qualitative and quantitative hydrological characteristics and the dynamics of their changes are studied mainly for medium and large rivers. The hydrological characteristics of small rivers in Russia are poorly investigated. Considering the increasing deterioration of the ecological state of rivers, affecting primarily the intra-annual water flow distribution of small rivers, the study of flow formation processes, its variability and intra-annual changes is becoming the most important task of hydrology. The article examines changes in the indicators of the intra-annual distribution of runoff of small rivers in the Volga basin based on representative hydrological posts on small rivers in the study area. Water regimes of small rivers before and after the onset of global hydrological changes were analyzed. Spatiotemporal trends of changes in the intra-annual distribution of water flow of small rivers in the Volga River basin were identified. The work presents a first attempt of mapping the trends of changes of the qualitative and quantitative characteristics of water flow of the small rivers.

Keywords: river flow, phases of water regime, intra-annual runoff distribution

REFERENCES

- Alekseevskii N.I., Evstigneev V.M., Koronkevich N.I. et al. *Malые реки Волжского бассейна* [Small rivers of the Volga River basin], N.I. Alekseevskii (ed.), Moscow, Moscow State University Publ., 1998, 233 p. (In Russian)
- Alekseevskii N.I., Frolova N.L., Antonova M.M. et al. Ot-senka vliyaniya izmenenii klimata na vodnyi rezhim i stok rek basseina Volgi [Assessment of the impact of climate change on water regime and runoff of rivers in the Volga River basin], *Voda: khimiya i ekologiya*, 2013, no 4, p. 3–12. (In Russian)
- Bolgov M.V., Trubetskova M.D., Filimonova M.K. et al. Sovremennye izmeneniya klimaticheskikh kharakteristik i veroyatnostnaya otsenka izmenenij minimal'nogo stoka v basseine r. Volgi [Modern changes in climatic characteristics and probabilistic assessment of changes of the minimum flow in the Volga River basin], *Vodnoe khozyaistvo Rossii*, 2014, no. 3, p. 83–99. (In Russian)
- Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B. et al. Stream-flow of Russian Rivers under Current and Forecasted Climate Changes: A Review of Publications, 1. Assessment of Changes in the Water Regime of Russian Rivers by Observation Data, *Water Resources*, 2022, vol. 49, p. 333–350, DOI: 10.1134/S0097807822030046.
- Georgievskii V.Yu. *Osnovnye gidrologicheskie kharakteristiki rek basseina Verkhnei Volgi* [Main hydrological characteristics of the rivers of the Upper Volga River basin], Livny, 2015, 115 p. (In Russian)

- Gidrologicheskiy yezhegodnik*, t. 1, vyp. 24, Basseyny Volgi (sredneye i nizhneye techeniye) i Urala [Hydrological Yearbook, Hydrological Yearbook, vol. 1, issue 24, Basins of the Volga (middle and lower reaches) and the Urals], Leningrad, Gidrometeoizdat, 1953–2018. (In Russian)
- Kireeva M.B., Rets E.P., Samsonov T.E. et al. Algorithm Gr-Wat for automated hydrograph separation by B.I. Kudelin's method: Problems and perspectives, *Water Resources*, 2022, vol. 49, no. 1, p. 23–37, DOI: 10.1134/S0097807822010146.
- Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Georgiadi A.G. et al. [Natural and anthropogenic changes in river flow. River flow: spatial and temporal variability and hazardous hydrological phenomena], *Sbornik trudov Tret'ei otkrytoi konferentsii nauchno-obrazovatel'nogo tsentra* [Proceedings of the Third Open Conference of the Research-and-Education Center], Moscow, 2014, p. 22–44. (In Russian)
- Kudelin B. I. *Printsipy regional'noi otsenki estestvennykh resursov podzemnykh vod* [Principles for regional assessment of natural groundwater resources], Moscow, MSU Publ., 1966, 216 p. (In Russian)
- Tretii otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [Third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation], V.M. Kattsov (ed.), 2022, 676 p. (In Russian)
- Zhukov I.A., Aibulatov D.N. Gidrologicheskii rezhim mal'kikh rek urbanizirovannykh territorii (na primere Novoi Moskvyy) [Hydrological regime of small rivers in urbanized areas (case study of New Moscow)], *Georisk*, 2022, no. 4, p. 3. (In Russian)
- Zhukov I.A., Aibulatov D.N. Osobennosti vodnogo rezhima verkhnei Sviyagi i ee pritokov v usloviyakh razvitiya karstovykh protsessov [Features of water regime of the Upper Sviyaga River and its tributaries under the development of karst processes], *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*, 2024, no. 2, p. 49–59. (In Russian)
- Web sources*
- GOST 19179–73. Hydrology of land. Terms and definitions, USSR State Committee for Standards, Moscow, 1988, 36 p., URL: http://legacy-ipk.meteorf.ru/images/stories/literatura/normdok/30_28.pdf (access date 10.12.2023). (In Russian)
- SP 529.1325800.2023, Determination of the main calculated hydrological characteristics, Moscow, Ministry of Construction of Russia, 2023, 103 p., URL: <https://minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/b85/grkr0098kt612p7jurpegefctqigb2gy/SP-529.pdf> (access date 15.12.2023). (In Russian)

Received 15.03.2024

Revised 10.09.2024

Accepted 15.10.2024

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 556.535

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕК РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

А.Э. Сумачев¹, Г.В. Пряхина², М.В. Сыромятина³, М.Р. Кузнецова⁴,
А.А. Павловский⁵, Т.Н. Осипова⁶, И.Г. Матвеева⁷, Н.А. Лемешко⁸

^{1–8} Санкт-Петербургский государственный университет, институт наук о Земле

⁴ Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт

¹ Кафедра гидрологии суши, ст. преподаватель, канд. техн. наук; e-mail: a.sumachev@spbu.ru

² Кафедра гидрологии суши, доц., зав. кафедрой гидрологии суши, канд. геогр. наук; e-mail: g65@mail.ru

³ Кафедра гидрологии суши, доц., канд. геогр. наук; e-mail: m.syromyatina@spbu.ru

⁴ Отдел океанологии, вед. инженер; e-mail: rotefliege@mail.ru

⁵ И. о. зав. кафедрой климатологии и мониторинга окружающей среды;
доц., д-р геогр. наук; e-mail: a.a.pavlovsky@spbu.ru

⁶ Кафедра климатологии и мониторинга окружающей среды, доц., канд. геогр. наук; e-mail: t.osipova@spbu.ru

⁷ Кафедра климатологии и мониторинга окружающей среды, ст. преподаватель; e-mail: i.matveeva@spbu.ru

⁸ Кафедра климатологии и мониторинга окружающей среды, доц., канд. геогр. наук; e-mail: n.lemeshko@spbu.ru

В пределах административных границ Ростовской области рассмотрено изменение температуры воздуха и осадков, а также расходов и уровней воды за 1966–2019 гг. по шести метеорологическим станциям и 30 речным гидрологическим постам. Выявлено статистически значимое увеличение среднегодовой температуры воздуха. За 54 года повышение среднегодовой температуры воздуха составило в среднем 0,38°C/10 лет, наиболее существенно оно проявляется в январе (0,68°C/10 лет). Значимых изменений годового количества осадков за весь период выявлено не было, также в целом не наблюдаются они и в отдельные месяцы. Однако, если рассматривать последнее тридцатилетие, то в целом по области обращает на себя внимание уменьшение годовых сумм осадков (–24,9 мм/10 лет), которое, в свою очередь, по-разному проявляется в разных районах области. Наиболее существенно оно выражено в юго-западных и южных районах: Таганрог (–46,3 мм/10 лет), Ростов-на-Дону (–35 мм/10 лет), Гигант (–47,8 мм/10 лет), менее выражено в юго-восточных районах: Ремонтное (–7,6 мм/10 лет).

В связи с уменьшением увлажненности территории на подавляющем большинстве рек наблюдается снижение среднегодовых расходов и уровней воды, при этом на реке Дон отмечается перераспределение стока внутри года. Показано, что уровеньный режим рек во многом зависит от комплекса климатических, гидрологических и водохозяйственных факторов, и его изменение, как правило, более выражено по сравнению с изменением расхода воды. Анализ максимальных расходов воды показал наличие статистически значимых отрицательных трендов на большинстве гидрологических постов со средним коэффициентом корреляции –0,33, значимые положительные тренды не выявлены. Анализ высших уровней воды показал наличие статистически значимых отрицательных трендов также на большинстве постов со средним коэффициентом корреляции –0,35. Повторяемость превышения отметок опасного явления (наводнений), рассчитанная за многолетний период, составляет от 0 до 26%, средние превышения опасных отметок от 7 до 74 см. В связи с повсеместным снижением максимальных расходов и высших уровней воды уменьшается вероятность возникновения опасных гидрологических явлений (ОГЯ), связанных с прохождением волны половодья, с другой стороны, продолжение роста температуры воздуха и уменьшение количества осадков может привести к существенному снижению водности рек в будущем.

Ключевые слова: расход воды, уровень воды, бассейн нижнего Дона, наводнения

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.8

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении последнего столетия климатические условия претерпевают значительные изменения, что установлено как для отдельных районов,

так и в глобальном масштабе [State of the global..., 2022]. Поскольку климат является одним из основных факторов, определяющих гидрологический режим водных объектов, эти изменения неизбежно

находят проявление в изменениях сроков ледостава, водности, уровня режима, повторяемости ОГЯ процессов и др. [Базелюк, 2012; Дмитриева, 2018; Литвинов, Дмитриева, 2019; Kireeva et al., 2019a; Фролова и др., 2020; Научно-прикладной справочник..., 2021; Третий оценочный доклад..., 2022]. Деятельность человека вносит дополнительный вклад в режимные изменения гидрологических объектов: преобразование водосборов, создание водохозяйственных систем, регулирование стока и др. Таким образом, изучение гидрологического режима водных объектов в условиях современных изменений климата в засушливых районах, требующих обеспечения значительным количеством воды, является задачей, имеющей как теоретическое, так и практическое значение.

Одной из таких территорий России является Ростовская область, где в результате уже наблюдаемых, а в дальнейшем прогнозируемых по различным сценариям изменений климатических характеристик создаются риски для населения, экономики и природной среды, растет повторяемость опасных гидрометеорологических явлений (аномальная жара, ливневые осадки, засухи, ураганы), возникает угроза опустынивания части территории и уменьшения водности рек.

Климатические изменения и особенности водного режима отдельных рек Ростовской области ранее были рассмотрены различными авторами [Лурье, 2010; Киреева, Фролова, 2013; Георгиади и др., 2017; Киреева и др., 2017; Киреева и др., 2018; Георгиевский и др., 2019; Георгиади и др., 2020; Фролова и др., 2022; Фролова и др., 2023]. Так, согласно [Лурье, 2010], наиболее значительный положительный тренд температуры воздуха был выявлен для холодного периода, в то время как за теплый период повсеместно отмечался отрицательный тренд температуры воздуха. Тренды в рядах годовых сумм осадков, а также за теплый и холодный периоды были положительными практически на всей территории области. При этом к 2020 г. можно было ожидать увеличение среднемесячной температуры воздуха за январь на 2,7°C, за июль на 4,0°C, годовая сумма осадков при этом должна была возрасти на 100 мм. Сток реки Дон согласно [Лурье, Панов, 1999] должен был снизиться к 2020 г., в то время как сроки появления льда становились более поздними, а вскрытия – более ранними. К 2020 г. ожидалось уменьшение продолжительности периода с ледовыми явлениями, которое станет более заметным к 2050 г. Наиболее значительно должно было измениться внутригодовое распределение стока: предполагалось его резкое уменьшение в весенний период и увеличение в летне-осенний и наиболее значимо в зимний. Похожие результаты были полу-

чены в работе [Kireeva et al., 2019b] на основе обработки данных наблюдений. В работе [Корнилов и др., 2017] рассмотрены экологические проблемы и гидрологические особенности рек Сал и Северский Донец (в пределах Ростовской области).

Анализ литературного материала показал, что выполненные оценки относились к ограниченному количеству водных объектов Ростовской области. Кроме того, с момента публикаций были накоплены дополнительные данные гидрометеорологических измерений, и в 2022 г. Росгидрометом был выбран новый базовый период для расчета климатических норм 1991–2020 гг.¹

Целью настоящей работы стала оценка многолетних изменений характеристик водного режима рек Ростовской области с учетом актуальных данных метеорологических и гидрологических наблюдений и расширенного перечня объектов. Особый интерес представляет выявление и сравнение современных тенденций с результатами долгосрочных прогнозов на 2020–2030 гг., представленных в литературных материалах. Исследование проводилось в рамках подготовки Регионального плана адаптации к изменениям климата Ростовской области, утвержденного распоряжением правительства Ростовской области № 285 от 11.05.2022, разработанного в целях формирования системы оперативных и долгосрочных мер адаптации к изменениям климата, реализуемых на уровне субъекта РФ. Коллектив авторов данной статьи принимал участие в подготовке материалов по научному обоснованию данного документа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследования. Ростовская область расположена на юге Восточно-Европейской равнины и частично в Предкавказье, в бассейне нижнего Дона. По характеру поверхности территория области представляет собой равнину, расчлененную долинами рек и балками. Максимальная высота над уровнем моря – 253 м. На территории Ростовской области отмечается в целом однородный температурный режим с ярко выраженным годовым ходом температуры и отчетливой сменой сезонов. Средняя годовая температура колеблется от 8,5°C на севере области до 10,8–10,9°C на юге и юго-западе. Наиболее холодный месяц на территории Ростовской области – январь (диапазон температур от –5,3°C на севере области до –2,6°C на юго-западе, вблизи Таганрогского залива). Самым жарким месяцем является июль, средняя температура которого изменяется от 22,5°C на севере области до 24,9°C на юге. Средняя много-

¹ О переходе на новые климатические нормы // Росгидромет. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/press/news/28963/>.

летняя годовая амплитуда составляет по области 27,7°C. На всей территории Ростовской области положительные температуры отмечаются с марта по ноябрь. Область характеризуется засушливым климатом, особенно резко выраженным на юго-востоке. Увеличение засушливости климата в восточном направлении связано с усилением континентальности и влиянием полупустынных и пустынных районов Средней Азии. Годовая сумма осадков изменяется по территории от 510 до 336 мм, гидротермический коэффициент Г.Т. Селянинова изменяется от 0,77 на севере области до 0,56 на юго-востоке. По условиям влагообеспеченности на территории Ростовской области выделяются два района: очень засушливый на востоке и засушливый на западе [Агроклиматические ресурсы Ростовской области, 1972]. Близость Азовского моря частично определяет температурные характеристики и режим увлажнения. Климат территорий, расположенных на побережье Таганрогского залива, характеризуется рядом особенностей. На станциях, расположенных вблизи побережья, влагосодержание воздуха выше, чем на удаленных. Средние многолетние значения парциального давления водяного пара в июле достигают 18,1 гПа (станция Таганрог), при удалении от побережья значения уменьшаются до 16,5 гПа (станция Ростов-на-Дону) и 15,3 гПа (станция Ремонтное). Для климата побережья характерны сглаженные колебания температуры воздуха с меньшими абсолютными экстремальными значениями. Так, средняя месячная минимальная температура в январе в Таганроге –3,0°C, а на станции Ремонтное –4,1°C. Абсолютный минимум температуры воздуха за период 1991–2020 гг. в Таганроге –27,2°C, на станции Ремонтное –33,8°C. Абсолютный максимум температуры воздуха за тот же период в Таганроге +40,5°C, на станции Ремонтное +43,2°C. При продвижении от побережья к востоку индекс континентальности Н.Н. Иванова увеличивается от 170 в Таганроге до 182 в Ремонтном.

В пределах Ростовской области в бассейне р. Дон протекает около 4600 рек. Это в основном средние и малые реки. Климатические условия, рельеф местности и гидрогеологические особенности территории обусловили относительно слабое развитие гидрографической сети. Густота речной сети составляет 0,1–0,6 км/км². Средний годовой сток составляет 26,2 км³, максимальный – 50,9 км³, минимальный – 10,9 км³. Водный режим многих рек изменен искусственно. На территории области имеется 173 водохранилища емкостью от 1 до 10 млн м³ и 14 водохранилищ емкостью более 10 млн м³ [Итоговый отчет..., 2012]. Внутригодовое распределение стока характеризуется весенним половодьем, проходящим с марта по апрель, достаточно глубокой летней меженью вплоть

до пересыхания малых рек и осенними паводками, переходящими в зимнюю межень.

Материалы. В качестве исходной информации в работе использованы гидрометеорологические данные (ряды среднемесячных значений приземной температуры воздуха, сумм осадков, уровней и расходов воды, максимальных значений расходов и уровней воды) за период с 1966 по 2019 г., находящиеся в свободном доступе на официальных сайтах² по шести метеорологическим станциям и 30 речным постам (из них 24 поста первого разряда) (рис. 1). Отметим, что в работе рассмотрены все реки Ростовской области, на которых ведутся непрерывные наблюдения за элементами гидрологического режима.

Так как гидрологические данные за 1989, 1991–1992, 2005–2007 гг. не были представлены в библиотеке ФГБУ «ГГИ», расчеты выполнялись с учетом пропусков в наблюдениях. Восстановление пропусков по рекам-аналогам не представлялось возможным ввиду отсутствия данных гидрологических наблюдений за эти годы.

Методы. Анализ представленных гидрологических и метеорологических характеристик выполнен методом математической статистики [Сикан, 2007].

Оценка основных климатических параметров выполнена на основе анализа многолетних особенностей метеорологического режима [Кобышева, Наровлянский, 1978]. Весь анализируемый период наблюдений был разбит на два – базовый и контрольный. Базовый период наблюдений – с 1966 по 1990 г. – подразумевает стационарность климатических и, как следствие, гидрологических характеристик, являясь фоновым при оценке влияния климата на гидрологический режим водных объектов. Контрольный – с 1991 по 2019 г. – выбран в соответствии с рекомендациями Росгидромета для расчета новых климатических норм с учетом наличия данных наблюдений.

Для описания метеорологического режима территории было использовано обобщение значений метеорологических величин и их характеристик месячного и годового разрешения. Методика получения обобщенных характеристик метеорологических величин за конкретные временные периоды является единой независимо от используемых средств измерений и способа обработки (ручного или автоматизированного).

² Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ – МЦД). Исходная гидрологическая информация для анализа была получена из различных официальных источников: среднемесячные значения уровней и расходов воды за 1966–2005 гг. собраны по материалам государственного водного кадастра, представленного в библиотеке ФГБУ «ГГИ», данные за 2008–2019 гг. получены по материалам сайта ЕАИС ГМВО.

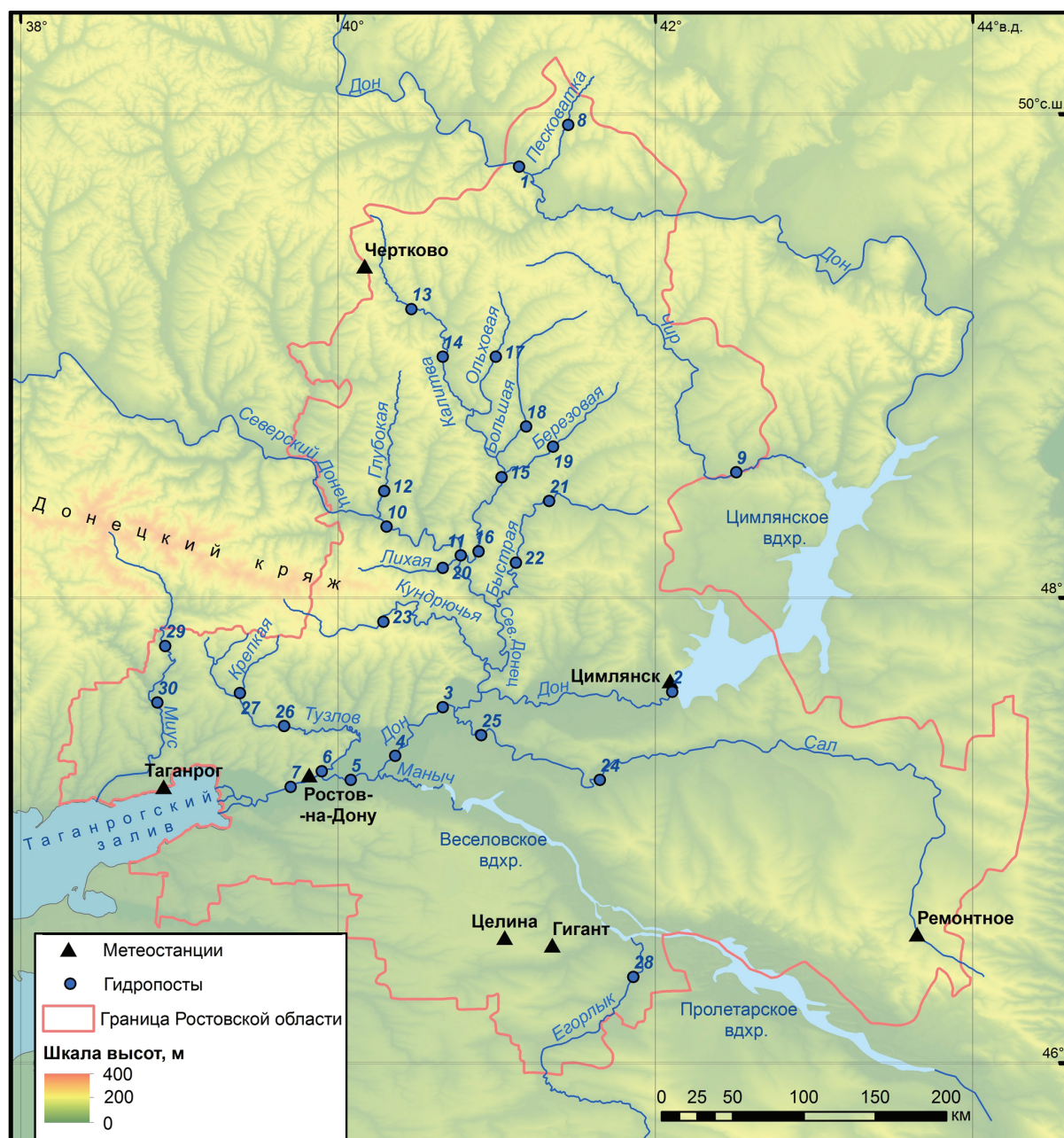


Рис. 1. Район исследования:

- 1 – ст. Казанская (р. Дон); 2 – Цимлянская ГЭС, нижний бьеф (р. Дон); 3 – Раздорская (р. Дон); 4 – Багаевский (р. Дон); 5 – Старочеркасская (р. Дон); 6 – Аксай (р. Дон); 7 – Ростов-на-Дону (р. Дон); 8 – Шумилинская (р. Песковатка); 9 – Обливская (р. Чир); 10 – Каменск-Шахтинский (р. Северский Донец); 11 – Белая Калитва (р. Северский Донец); 12 – Астаховский (р. Глубокая); 13 – Кудиновка (р. Калитва); 14 – Ольховый Рог (р. Калитва); 15 – Раздолье (р. Калитва); 16 – Погорелов (р. Калитва); 17 – Кашары (р. Ольховая); 18 – Индустрия (р. Большая); 19 – Антоновка (р. Березовая); 20 – Богураев (р. Лихая); 21 – Скосырская (р. Быстрая); 22 – Апанаскин (р. Быстрая); 23 – Владимировская (р. Кундрючья); 24 – Большая Мартыновка (р. Сал); 25 – Балабинка (р. Сал); 26 – Несветай (р. Тузлов); 27 – Большекрепинская (р. Крепкая); 28 – Новый Егорлык (р. Егорлык); 29 – Куйбышево (р. Миус); 30 – Матвеев Курган (р. Миус)

Fig. 1. Study area:

- 1 – Kazanskaya (Don river); 2 – Tsimlyanskaya hydroelectric station, downstream (Don river); 3 – Razdorskaya (Don river); 4 – Bagaevsky (Don river); 5 – Starocherkasskaya (Don river); 6 – Aksai (Don river); 7 – Rostov-on-Don (Don river); 8 – Shumilinskaya (Peskovatka river); 9 – Oblivskaya (Chir river); 10 – Kamensk-Shakhtinsky (Seversky Donets river); 11 – Belaya Kalitva (Seversky Donets river); 12 – Astakhovsky (Glubokaya river); 13 – Kudinovka (Kalitva river); 14 – Alder Horn (Kalitva river); 15 – Razdolie (Kalitva river); 16 – Pogorelov (Kalitva river); 17 – Kashary (Olkhovaya river); 18 – Industry (Bolshaya river); 19 – Antonovka (Berezovaya river); 20 – Bogurayev (Likhaya river); 21 – Skosyrskaya (Berezovaya river); 21 – Skosyrskaya (Berezovaya river); Bystraya; 22 – Apanaskin (Bystraya river); 23 – Vladimirovskaya (Kundryuchya river); 24 – Bolshaya Martynovka (Sal river); 25 – Balabinka (Sal river); 26 – Nesvetai (Tuzlov river); 27 – Bolshekrebinskaya (Krepkaya river); 28 – New Yegorlyk (Egorlyk river); 29 – Kuibyshevo (Mius river); 30 – Matveev Kurgan (Mius river)

Для анализа изменчивости характеристик гидрологического режима за весь период наблюдений по срочным, среднемесячным и среднегодовым значениям расходов и уровней воды были оценены статистические значимости линейных трендов, для чего были рассчитаны значения коэффициента корреляции Пирсона и его критические значения [Малинин, 2008]. Критическое значение коэффициента корреляции при уровне значимости 5% было рассчитано по формуле

$$R_{\text{крит}} \approx \frac{2}{\sqrt{n+2}}, \quad (1)$$

где n – фактическая длина рядов наблюдений (в среднем критическое значение коэффициента корреляции равно 0,27). Подобный подход позволяет, как правило, выявить статистически значимые тренды на отдельно взятых постах. В случаях, когда рассматриваются среднемесячные значения расходов или уровней воды на множестве гидрологических постов, тренды, оцененные за какой-либо месяц, могут оказаться статистически незначимыми (т. е. отклонение выборочного значения коэффициента корреляции от нуля лежит в пределах статистической погрешности его определения). Уменьшение погрешности определения выборочных значений коэффициентов корреляции возможно в случае осреднения их значений по группе рек с похожими условиями формирования стока. Целесообразным является осреднение преимущественно незначимых коэффициентов корреляции. В случаях отсутствия линейных трендов среднее по группе рек значение коэффициента корреляции должно быть равно нулю. Для проверки гипотезы о равенстве среднего значения заданному числу применяется одновыборочный тест Стьюдента [Сикан, 2007]. Для реализации данного подхода рассчитывались средние по группе рек коэффициенты корреляции линейных трендов среднемесячных расходов или уровней воды ($R_{\text{ср}}$), которые в случае отсутствия трендов должны быть равны нулю (так как разнонаправленные тенденции, обусловленные погрешностями статистических расчетов, взаимно компенсируются). Эмпирическое значение t статистики рассчитывается по формуле:

$$t = \frac{R_{\text{ср}} - m}{\sigma_x / \sqrt{n}}, \quad (2)$$

где m – теоретическое значение среднего коэффициента корреляции, которое при отсутствии трендов равно нулю.

Однородность рядов по дисперсии проверялась с помощью двухвыборочного теста Фишера, по среднему значению – двухвыборочного теста Стьюдента.

Для обоих тестов были рассчитаны значения p -value, представляющие минимальный уровень значимости опровержения нулевой гипотезы о равенстве двух характеристик. Принятый уровень значимости, использованный в работе, составляет 5%.

Повторяемость ОГЯ (наводнений) рассчитывалась как отношение числа лет, в которые превышались опасные отметки уровней воды, к общему числу лет. Величина отметок ОЯ бралась по данным ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС» [Перечень опасных природных..., 2024].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка основных гидрометеорологических характеристик территории Ростовской области.

В целом по Ростовской области за период с 1966 по 2019 г. произошло статистически значимое повышение среднегодовой температуры приземного воздуха, которое в разных районах области проявилось во все центральные месяцы сезонов (кроме апреля в южной части области). За 54 года повышение среднегодовой температуры воздуха составляет в среднем 0,38°C/10 лет, наиболее существенно оно проявляется в январе (0,68°C/10 лет). В табл. 1 представлены оценки линейного тренда для приземной температуры воздуха для периодов 1966–2019 и 1991–2019 гг. Значимость трендов оценивалась на уровне 5%.

Значимых изменений годового количества осадков за период с 1966 по 2019 г. выявлено не было, также и за отдельные месяцы за некоторым исключением (табл. 2). Однако если рассматривать последнее тридцатилетие, то в целом по области обращает на себя внимание уменьшение годовых сумм осадков, которое, в свою очередь, по-разному проявляется в разных районах области. Наиболее существенно оно выражено в юго-западных и южных районах: Таганрог (–46,3 мм/10 лет), Ростов-на-Дону (–35 мм/10 лет), Гигант (–47,8 мм/10 лет), менее выражено в юго-восточных районах: Ремонтное (–7,6 мм/10 лет). Также были выявлены и значимые положительные тренды сумм осадков, но в отдельные месяцы, для станций Гигант, Ремонтное, Таганрог, Чертково. В таблице 2 представлены оценки линейного тренда для атмосферных осадков для периодов 1966–2019 и 1991–2019 гг. Значимость трендов оценивалась на уровне 5%.

Анализ гидрологических изменений. Водный режим. Анализ стационарности рядов среднегодового стока показал, что гипотеза о стационарности опровергается по критериям Стьюдента и Фишера для 12 и 25% рассмотренных рядов соответственно. Статистически значимые отрицательные тренды выявлены для 21% водотоков – реки Березовая, Лихая, Быстрая (только по г. п. Скосырская) и Сал. Аномальным представляется статистически значи-

мое увеличение расходов воды реки Песковатки по данным гидрологического пункта Шумилинская за все месяцы года, включая среднегодовые расходы воды. Также тенденция к незначительному увеличению расходов воды была выявлена для рек

Егорлык и Крепкая. В остальных случаях отмечена тенденция к снижению среднегодовых расходов воды – средний районный коэффициент корреляции линейного тренда равен 0,20, что статистически значимо отличается от нуля.

Таблица 1

Оценки линейного тренда для приземной температуры воздуха для различных периодов

Месяц	1966–2019 гг.			1991–2019 гг.		
	<i>k</i>	<i>D</i>	Δt	<i>k</i>	<i>D</i>	Δt
<i>Станция «Гигант» (34 740)</i>						
Январь	0,7	9	4	0,2	0,4	0,6
Апрель	–0,07	0,3	–0,4	0,05	0,07	0,2
Июль	0,4	15	2	0,7	12	2
Октябрь	0,4	8	2	0,3	2	0,8
Год	0,4	30	2	0,8	49	2
<i>Станция «Ростов-на-Дону» (34 730)</i>						
Январь	0,6	10	3	0,2	0,5	0,7
Апрель	–0,1	0,3	–0,4	0,4	3	1
Июль	0,3	10	2	0,6	7	2
Октябрь	0,3	7	2	0,4	3	1
Год	0,3	18	2	0,8	54	2
<i>Станция «Ремонтное» (34 759)</i>						
Январь	0,8	9	4	0,08	0,05	0,2
Апрель	–0,1	1	–0,8	–0,09	0,2	–0,3
Июль	0,4	14	2	0,6	12	2
Октябрь	0,4	7	2	0,05	0,07	0,2
Год	0,4	30	2	0,6	42	2
<i>Станция «Таганрог» (34 720)</i>						
Январь	0,6	10	3	0,3	0,8	0,8
Апрель	0,07	0,4	0,4	0,3	2	0,8
Июль	0,5	21	3	0,7	12	2
Октябрь	0,4	12	2	0,5	5	1
Год	0,4	36	2	0,9	59	3
<i>Станция «Цимлянск» (34 646)</i>						
Январь	0,7	0,3	4	0,2	0,3	0,5
Апрель	0,08	0,5	0,5	0,3	2	0,8
Июль	0,5	18	3	0,6	11	1,9
Октябрь	0,5	12	2	0,3	2	0,9
Год	0,4	34	2	0,8	49	2
<i>Станция «Чертково» (34 432)</i>						
Январь	0,7	10	4	–0,05	0,02	–0,16
Апрель	0,1	0,6	0,6	2,8	2	0,8
Июль	0,4	12	2	0,5	6	1
Октябрь	0,4	11	22	0,4	4	1
Год	0,4	2	2	0,7	45	2

Примечания. *k* – коэффициент линейного тренда, °C/10 лет; *D* – доля суммарной дисперсии, объясняемая трендом, %; Δt – суммарное изменение температуры за указанный период, соответствующее линейному тренду, °C.

Полужирным шрифтом выделены статистически значимые изменения.

Изменение внутригодового распределения стока различно на реках исследуемого региона, как по степени значимости, так и по направлению линии тренда, что обусловлено различиями в водохозяйственной деятельности, площади водосбора рек и степени дренирования подземных вод. Для реки Дон по г. п. Казанская и Раздорская харак-

терно увеличение стока за холодный период года, что связано с увеличением температуры воздуха и числа оттепелей и, как следствие, поступлением талой воды в русло реки в период ледостава. На остальных реках с декабря по апрель за редким исключением наблюдается тенденция к снижению стока, а для реки Сал по имеющимся данным

(наблюдения на реке Сал начаты с 1983 г.) можно говорить о статистически значимом тренде. Расходы воды на Дону выше Цимлянского водохранилища за летний период увеличиваются, как и на большинстве незарегулированных рек исследуемой территории. Ниже плотины расходы воды напротив снижаются, что связано как с изменением климата, повышением температуры воздуха и, как следствие, испарения, так и с водохозяйственной деятельностью, заключающейся в регулировании стока с целью обеспечения нужд сельского

хозяйства и промышленности. Для остальных рек исследуемого региона характерно уменьшение расходов воды с ноября по апрель, т. е. в периоды зимней межени и весеннего половодья, что можно объяснить недостаточным дренированием реками подземных горизонтов. В мае, на спаде весеннего половодья, расходы воды имеют тенденцию к увеличению, в октябре также отмечается тенденция к увеличению расходов воды, что связано с увеличением количества осадков за этот месяц (табл. 3, см. табл. 2).

Таблица 2

Оценки линейного тренда для количества осадков для различных периодов

Месяц	1966–2019 гг.			1991–2019 гг.		
	<i>k</i>	<i>D</i>	Δt	<i>k</i>	<i>D</i>	Δt
<i>Станция «Гигант» (34 740)</i>						
Январь	1,3	0,9	7	1,0	0,1	3
Апрель	–1,9	1	–7	–7,4	9	–22
Июль	1,2	0,4	10	–1,9	0,4	–6
Октябрь	4,0	6	22	2,5	0,5	8
Год	–0,7	0,02	–4	–47,8	21	–144
<i>Станция «Ростов-на-Дону» (34 730)</i>						
Январь	1,4	0,5	8	8,8	7	26
Апрель	–2,6	22	–14	–7,2	6	–22
Июль	–2,7	2	–15	–1,2	0,1	–4
Октябрь	3,7	3	20	2,7	0,3	8
Год	–1,6	0,05	7	–35,0	5	–105
<i>Станция «Ремонтное» (34 759)</i>						
Январь	0,4	0,2	2	–2,2	2	–7
Апрель	–0,3	0,04	–2	–6,1	6	–18
Июль	1,2	0,5	7	14,6	20	44
Октябрь	0,5	0,1	2	–5,1	4	–15
Год	4,4	0,7	24	–7,6	0,6	–23
<i>Станция «Таганрог» (34 720)</i>						
Январь	4,4	5	24	14,9	14	46
Апрель	–0,7	0,3	–4	–4,0	3	–12
Июль	–6,7	9	–37	–0,5	0,02	–1
Октябрь	1,9	1	10	–5,5	3	17
Год	–1,1	0,02	6	–46,3	13	–139
<i>Станция «Цимлянский» (34 646)</i>						
Январь	2,8	4	15	3,8	2	11
Апрель	–3,2	5	–18	–1,1	0,4	–3
Июль	1,9	1	10	9,0	6	27
Октябрь	3,2	4	18	0,1	0	0,4
Год	0,9	0,02	5	4,7	0,2	14
<i>Станция «Чертково» (34 432)</i>						
Январь	0,8	0,2	4	9,8	12	29
Апрель	1,5	1	8	2,9	1	9
Июль	6,8	8	37	3,3	0,4	10
Октябрь	0,1	0,0001	0,8	–6,9	6	–21
Год	8,0	1	44	–17,5	2	–52

Примечания. *k* – коэффициент линейного тренда, мм/10 лет; *D* – доля суммарной дисперсии, объясняемая трендом, %; Δt – суммарное изменение количества осадков за указанный период, соответствующее линейному тренду, мм. Полужирным шрифтом выделены статистически значимые изменения.

Таблица 3

Изменение среднемесячных расходов воды рек

Пункт Характеристика	р. Дон – г. п. Казанская	р. Дон – г. п. Раздорская	р. Песковатка – г. п. Шумилинская	р. Сал – г. п. Бол. Мартыновка*	р. Сал – г. п. Балабинка**	р. Быстрая – г. п. Скольская	р. Быстрая – г. п. Анапский	Другие реки области		
								R_{cp}	t	$p\text{-value},$ %
I	0,34	0,37	0,66	-0,62	-0,49	-0,08	-0,09	-0,06	-2,1	5
II	0,36	0,08	0,57	-0,39	-0,22	-0,27	-0,25	-0,13	-4	0
III	0,06	-0,11	-0,21	0,19	-0,28	-0,26	-0,21	-0,19	-9,2	0
IV	-0,47	-0,28	0,03	0,06	-0,44	-0,1	-0,17	-0,06	-2,2	4
V	0,08	-0,21	0,7	-0,45	-0,64	0,33	0,22	0,24	4,5	0
VI	0,32	-0,09	0,72	-0,78	-0,5	0,47	0,29	0,03	1,0	35
VII	0,26	-0,29	0,79	-0,82	-0,62	0,66	0,38	-0,02	-0,6	54
VIII	0,27	-0,26	0,77	-0,72	-0,74	0,63	0,37	0,05	1,3	22
IX	0,33	-0,2	0,75	-0,66	-0,74	0,51	0,27	0,08	1,8	10
X	0,43	-0,13	0,7	-0,48	-0,5	0,33	0,18	0,13	3,1	1
XI	0,42	-0,15	0,68	-0,43	-0,63	-0,02	-0,09	0,04	1,1	28
XII	0,46	0,33	0,7	-0,52	-0,73	0,1	-0,05	-0,02	-0,8	46
Ср. год	-0,1	-0,15	0,51	-0,55	-0,74	-0,31	-0,28	-0,14	-5,0	0
Максимальный расход	-0,5	-0,3	-0,48	0,28	-0,39	-0,36	-0,36	-0,37	-20	0
Минимальный расход	–	–	0,77	-0,79	-0,72	0,8	0,46	0,15	5,2	0

Примечания. В таблице отдельно представлена оценка значимости коэффициента корреляции (R) линейного тренда на реках с наиболее существенными изменениями; незначимые коэффициенты корреляции на остальных реках осреднены (R_{cp}), оценка статистической значимости отличия среднего коэффициента корреляции от нуля выполнялась по формуле (2). Полуширинным шрифтом выделены статистически значимые значения.

* Наблюдения начаты с 2000 г. ** Наблюдения начаты с 1983 г. Для реки Сал в связи с короткой выборкой оценка значимости условна.

Анализ максимальных расходов воды показал статистически значимые отрицательные тренды на большинстве гидрологических постов со средним коэффициентом корреляции $-0,37$, значимые положительные тренды не выявлены. Летняя межень начинается в мае – июне и, как правило, является лимитирующей для водопользования, так как именно летом на большинстве рек регистрируются минимальные расходы и уровни воды. Минимальные расходы воды имеют положительные тренды – отметим, что после 1990 г. ни одна из рек не пересыхала, тогда как до 1990 г. в общей

сложности зарегистрировано 55 случаев пересыхания различных рек.

Уровеньный режим. Статистически значимое падение среднегодовых уровней воды характерно для 56% гидрологических постов, при этом средний коэффициент корреляции равен $0,66$ (что значительно больше по модулю, чем для среднегодовых расходов воды). Так, например, на р. Калитве в створе г. п. Погорелов падение уровней воды характеризуется значительно большими коэффициентами корреляции и угловыми коэффициентами, чем для расходов (рис. 2А).

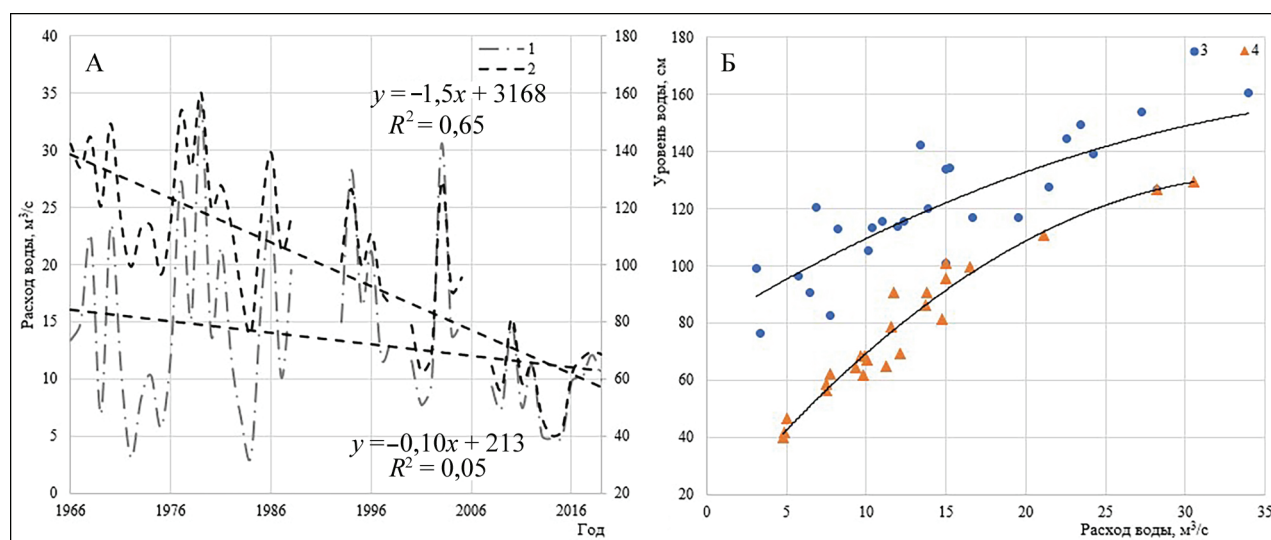


Рис. 2. Многолетние колебания гидрологических характеристик р. Калитвы на г. п. Погорелов: А – среднегодовой расход (1) и уровень воды (2); Б – зависимость среднегодового расхода и уровня воды в 1966–1990 (3) и в 1991–2019 гг. (4)

Fig. 2. Long-term fluctuations in hydrological characteristics of the Kalitva River at the Pogorelov hydrological station: А – average annual flows (1) and water levels (2); Б – long-term dependencies of average annual flows and water levels in 1966–1990 (3) and 1991–2019 (4)

Зависимость расхода воды от уровня в различные периоды существенно различается (рис. 2Б). Это обусловлено возможными изменениями ледового режима, связанными с увеличением температуры воздуха, а также деформациями речного русла.

Отмечаются и отдельные случаи роста среднегодовых уровней воды: ниже Цимлянского водохранилища скачкообразный рост уровней воды произошел в 1978–1981 гг., что совпадает с периодом модернизации и увеличения мощности гидроагрегатов [Гидроэлектростанции России, 1998]. Отметим также увеличение среднегодовых уровней воды на р. Егорлык, сток которой сильно зарегулирован водохранилищами, прудами и многочисленными оросительными системами [Сазонов и др., 2022]. Уровень воды по отношению к базовому периоду по гидрологическому посту Новый Егорлык вырос на один метр, расход же воды

увеличился незначительно. Подобное увеличение уровня может свидетельствовать о заиливании прудов и водохранилищ. В остальных случаях значимое увеличение уровня воды, как правило, имело место после строительства малых водохранилищ либо прудов (Глубокая, Березовая, Лихая). Среднемесячные уровни воды в случае падения среднегодовых значений снижаются за все месяцы года на 90% гидрологических постов, при этом это снижение гораздо более выраженное, чем снижение расхода воды.

Анализ наивысших уровней воды показал наличие отрицательных трендов со средним коэффициентом корреляции, равном $-0,35$ для всех рассмотренных водотоков, кроме р. Егорлык. Анализ минимальных уровней воды показал статистически значимую тенденцию к их снижению на 53% гидрологических постах со средним коэффици-

ентом корреляции 0,61. Статистически значимый рост минимальных уровней воды зарегистрирован по гидрологическим постам Астаховский (р. Глубокая), Индустрия (р. Большая), Антоновка (р. Березовая), Богураев (р. Лихая), Скосырская (р. Быстрая), Апанаскин (р. Быстрая), Владимирская (р. Кундрючья), Новый Егорлык (р. Егорлык). На оставшихся 27% гидрологических постов наблюдаются преимущественно статистически незначимые отрицательные тенденции.

В период половодья и формирования наибольших уровней воды нередко случаи возникновения ОГЯ (наводнений), поэтому в настоящей работе оценена их повторяемость. Для территории Ростовской области ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС» установлены значения опасных уровней воды над нулем поста, при которых регистрируются наводнения. Повторяемость ОГЯ (наводнений), рассчитанная авторами, составляет от 0 до 26% (рис. 3). Среднее превышение опасных отметок – от 7 до 74 см.

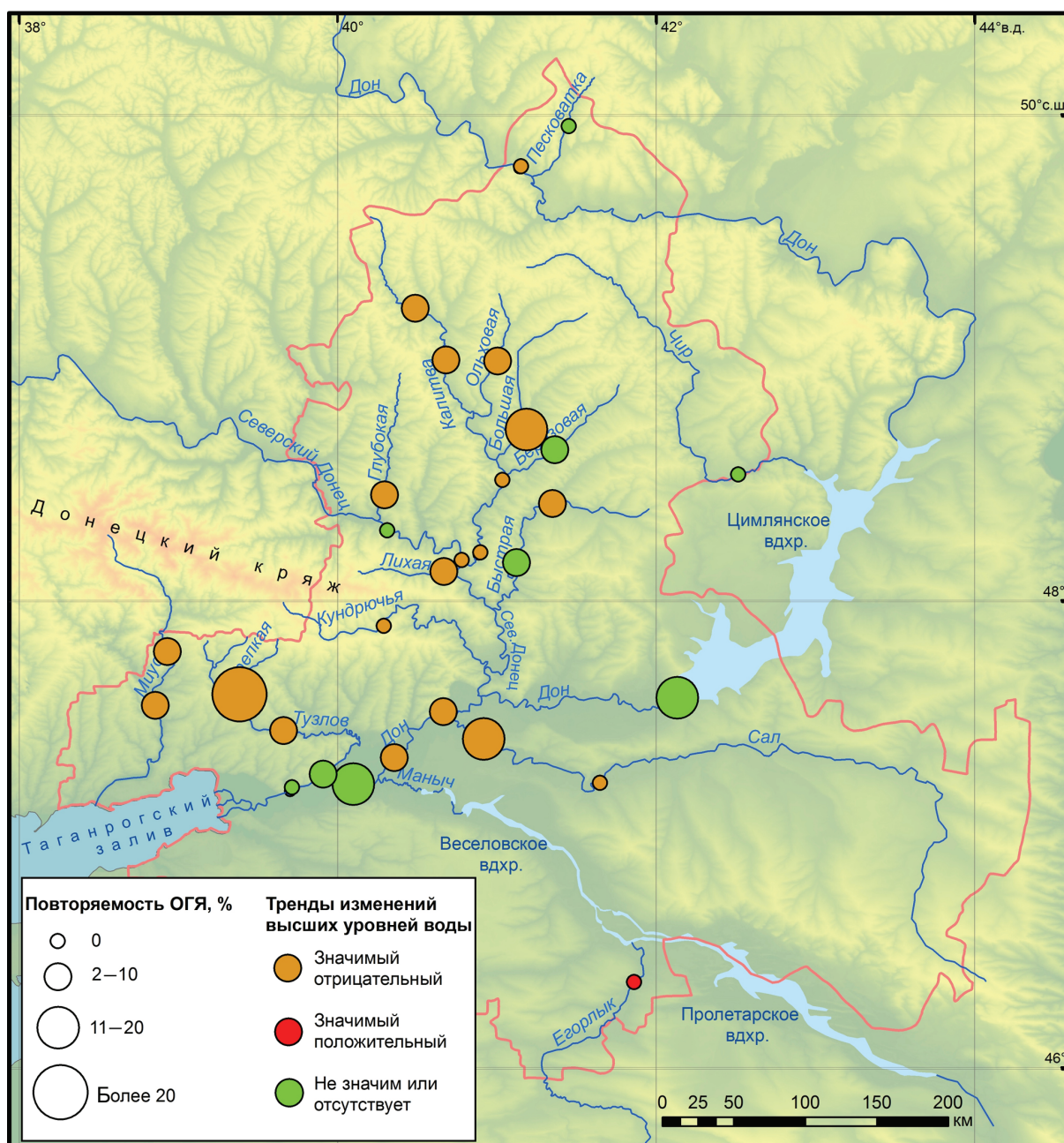


Рис. 3. Тренды изменений наибольших уровней воды за период весеннего половодья и повторяемость ОГЯ (наводнений) на территории Ростовской области по данным гидрологических постов

Fig. 3. Trends in changes in the highest water levels during the period of spring floods and the frequency of dangerous hydrological phenomena (floods) in the Rostov region according to data from hydrological stations

Отметим, что в связи с повсеместным снижением наибольших уровней воды следует ожидать снижения повторяемости наводнений и уменьшения зон затопления.

ВЫВОД

Выполненный анализ показал статистически значимое увеличение температуры воздуха, при этом стоит отметить, что оно идет медленнее, чем это предполагалось в ранее опубликованных работах [Лурье, 2010], за 54 года общее потепление составляет в среднем $0,38^{\circ}\text{C}/10$ лет. Годовые суммы осадков не увеличились, а на отдельных метеостанциях было отмечено их уменьшение за контрольный период (1991–2019). Прогнозы реакции речных систем на климатические изменения, данные в общем виде в [Лурье, Панов, 1999], оправдались.

Увеличение температуры воздуха при отсутствии значимых изменений количества осадков за весь рассматриваемый период свидетельствует об общем уменьшении увлажненности территории. В связи с этим на подавляющем большинстве рек наблюдается уменьшение среднегодовых расходов и уровней воды, при этом на р. Дон отмечается перераспределение стока внутри года. Изменение среднегодовых и среднемесячных уровней воды, как правило, более выражено по сравнению с изменением расходов воды, что обусловлено большим числом факторов, влияющих на уровеньный режим. Максимальные расходы и наибольшие уровни воды снижаются на большинстве рассматриваемых постов, что умень-

шает вероятность возникновения ОГЯ, связанных с прохождением волны половодья. Минимальные расходы воды увеличиваются на большинстве рассмотренных гидрологических постов (в контрольном периоде пересыхание рек не наблюдалось), что благоприятно для водохозяйственной деятельности и гидроэкологической безопасности. Отметим, что, с другой стороны, продолжение роста температуры воздуха и уменьшения количества осадков, приводящее в свою очередь к уменьшению среднегодовых расходов и уровней воды, могут привести и к негативным изменениям в гидрологическом режиме, например к уменьшению водности рек, увеличению расходов на орошение и т. д.

По результатам работы создана «База данных характеристик водного режима водотоков и водоемов Ростовской области», которая включает сведения о 33 гидрологических постах. В ней представлены рассчитанные нормы среднегодовых и среднемесячных расходов воды рек; значения обеспеченных среднегодовых расходов воды рек; нормы среднемесячных и среднегодовых уровней воды рек; нормы среднемесячных и среднегодовых уровней воды водохранилищ; характеристики наибольших уровней воды (среднее значение, коэффициент корреляции линейного тренда, отметка ОГЯ, превышение отметки ОГЯ за период весеннего половодья и повторяемость ОГЯ); обеспеченные значения максимальных расходов воды рек; обеспеченные значения наибольших за год уровней воды на реках и водохранилищах Ростовской области [Пряхина и др., 2023].

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства природных ресурсов и экологии Ростовской области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агроклиматические ресурсы Ростовской области: справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 251 с.
- Базельюк А.А. Опасные гидрометеорологические явления на юге европейской территории России // Природные и социальные риски в береговой зоне Черного и Азовского морей. М.: Триумф, 2012. С. 33–41.
- Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П. и др. Современные и сценарные изменения стока Волги и Дона // Водное хозяйство России. 2017. № 3. С. 6–23. DOI: 10.35567/1999-4508-2017-3-1.
- Георгиади А.Г., Милюкова И.П., Кашутина Е.А. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейне Дона // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 651–662. DOI: 10.31857/S0321059620060061.
- Георгиевский В.Ю., Грек Е.А., Грек Е.Н. и др. Оценка современных изменений максимального стока рек России // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 46–55. DOI: 10.3103/S1068373919110037.
- Гидроэлектростанции России. М.: Типография Института Гидропроект, 1998. 467 с.
- Дмитриева В.А. Гидрологический режим рек Донского бассейна // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2018. № 4. С. 77–84.
- Итоговый отчет о выполнении работ по государственному контракту «Комплексная оценка тенденций изменения климатических условий на среднесрочный (до 2020 года) и долгосрочный (до 2050 года) периоды для предупреждения возможных негативных последствий для окружающей среды и экономики области». СПб.: Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, 2012. 97 с.
- Киреева М.Б., Илич В.П., Фролова Н.Л. и др. Вклад климатических и антропогенных факторов в формирование маловодного периода в бассейне р. Дон 2007–2015 гг. // Геориск. 2017. № 4. С. 10–21.
- Киреева М.Б., Фролова Н.Л. Современные особенности весеннего половодья рек бассейна Дона // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 1. С. 60–76.
- Киреева М.Б., Фролова Н.Л., Рец Е.П. и др. Паводочный сток на реках Европейской территории России

- и его роль в формировании современного водного режима // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 4. С. 48–68. DOI: 10.35567/1999-4508-2018-4-4.
- Кобышева Н.В., Наровлянский Г.Я. Климатическая обработка метеорологической информации. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 215 с.
- Корнилов А.Г., Лебедева М.Г., Решетников В.С. Тренды изменения годового и сезонного стока р. Северский Донец за период инструментальных гидрологических наблюдений (на территории Белгородской области) // Региональные геосистемы. 2017. Т. 38. № 4(253). С. 133–140.
- Литвинов П.В., Дмитриева В.А. Формирование ледового режима рек Верхнего Дона в современных климатических условиях // Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы: материалы Международной научно-практической конференции. Посвящается 85-летию факультета географии, геоэкологии и туризма ВГУ, Воронеж, 03–05 октября 2019 года. Т. 1. Воронеж: Цифровая полиграфия, 2019. С. 448–452.
- Лурье П.М. Региональные особенности изменения климата на юге России и их последствия (на примере Ростовской области) // Географические исследования Краснодарского края: сб. науч. тр. Вып. 5. Краснодар: Кубанский гос. ун-т, 2010. С. 83–92.
- Лурье П.М., Панов В.Д. Влияние изменений климата на гидрологический режим р. Дон в начале XXI столетия // Метеорология и гидрология. 1999. № 4. С. 90–97.
- Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации: учебник. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2008. 408 с.
- Научно-прикладной справочник. Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации. СПб.: РИАН, 2021. 190 с.
- Пряхина Г.В., Сумачев А.Э., Сыромятина М.В., Кузнецова М.Р. База данных характеристик водного режима водотоков и водоемов Ростовской области (RO HRWW): Патент РФ, № 2023623235; 2023.
- Сазонов А.Д., Закруткин В.Е., Решетняк О.С. Временная изменчивость поверхностного гидрохимического стока в бассейне реки Большой Егорлык в условиях антропогенного воздействия и климатических изменений // Геология и геофизика Юга России. 2022. Т. 12. № 2. С. 114–127.
- Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации: учебник. Специальность «Гидрология» направления подготовки «Гидрометеорология». СПб.: Изд-во РГГМУ, 2007. 279 с.
- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории РФ. Общее резюме. СПб.: Научные технологии, 2022. 124 с.
- Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Харламов М.А. и др. Картографирование современного состояния и трансформации водного режима рек европейской территории России // Геодезия и картография. 2020. Т. 81. № 7. С. 14–26. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-961-7-14-26.
- Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б. и др. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 3. С. 251–269. DOI: 10.31857/S032105962203004X.
- Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б. и др. Современные изменения характеристик максимального стока рек России // Вопросы географии. Водные проблемы и их решение. М.: Медиа-ПРЕСС, 2023. Т. 157. С. 137–166. DOI: 10.24057/probl.geogr.157.7.
- Kireeva M., Frolova N., Rets E. et al. Evaluating climate and water regime transformation in the European Part of Russia using observation and reanalysis data for the 1945–2015 period, *Int. J. River Basin Management*, 2019a, vol. 18, no. 4, p. 1–12, DOI: 10.1080/15715124.2019.1695258.
- Kireeva M., Ilich V., Frolova N. et al. Estimation of the impact of climatic and anthropogenic factors on the formation of the extreme low-flow period in the Don-river basin during 2007–2016, *Geogr. Environ. Sustainability*, 2019b, vol. 12, no. 2, p. 62–77, DOI: 10.24057/2071-9388-2017-28.
- State of the global climate 2021, World Meteorological Association et al., 2022, 54 p., DOI: 10.13140/RG.2.2.23099.90400.
- Электронный ресурс*
Перечень опасных природных гидрометеорологических явлений (ОГЯ) на территории ЮФО и СКФО. URL: <https://yugmeteo.donpac.ru/hazards/> (дата обращения 02.03.2024).

Поступила в редакцию 12.11.2023

После доработки 10.08.2024

Принята к публикации 15.10.2024

HYDROLOGICAL REGIME OF RIVERS IN THE ROSTOV REGION UNDER THE CLIMATE CHANGE

A.E. Sumachev¹, G.V. Pryakhina², M.V. Syromyatina³, M.R. Kuznetsova⁴, A.A. Pavlovsky⁵,
T.N. Osipova⁶, I.G. Matveeva⁷, N.A. Lemeshko⁸

¹⁻⁸ St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences

⁴ Arctic and Antarctic Research Institute

¹ Department of Land Hydrology, Senior Lecturer, Ph.D. in Engineering; e-mail: a.sumachev@spbu.ru

² Head of the Department of Land Hydrology, Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: g65@mail.ru

³ Department of Land Hydrology, Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: m.syromyatina@spbu.ru

⁴ Department of Oceanology, Leading Engineer; e-mail: rotefliege@mail.ru

⁵ Acting Head of the Department of Climatology and Environmental Monitoring, Associate Professor,
D.Sc. in Geography; e-mail: a.a.pavlovsky@spbu.ru

⁶ Department of Climatology and Environmental Monitoring, Associate Professor,
Ph.D. in Geography; e-mail: t.osipova@spbu.ru

⁷ Department of Climatology and Environmental Monitoring, Senior Lecturer; e-mail: i.matveeva@spbu.ru

⁸ Department of Climatology and Environmental Monitoring, Associate Professor,
Ph.D. in Geography; e-mail: n.lemeshko@spbu.ru

Within the administrative boundaries of the Rostov region, changes in air temperature and precipitation, as well as flow rates and water levels for 1966–2019 were considered at 6 meteorological stations and 30 river hydrological posts. A statistically significant increase in average annual air temperature was revealed. Over 54 years, the increase in average annual air temperature has averaged 0,38°C/10 years, and it is most significant in January (0,68°C/10 years). No significant changes in the annual amount of precipitation were detected over the entire period; in general, they are not observed in individual months either. However, if we consider the last thirty years, there is a decrease in annual precipitation amounts in the region as a whole (–24,9 mm/10 years), which in turn manifests itself variously in different areas of the region. It is most significant in the south-western and southern regions: Taganrog (–46,3 mm/10 years), Rostov-on-Don (–35 mm/10 years), Gigant (–47,8 mm/10 years), and less pronounced in the southeastern regions: Remontnoe (–7,6 mm/10 years).

Due to a decrease in humidification of the territory, a decrease in average annual flow rates and water levels is typical to the vast majority of rivers, while there is a redistribution of the Don River flow within the year. It has been shown that the level regime of rivers largely depends on a complex of climatic, hydrological and water management factors, and its change, as a rule, is more pronounced than the changes in water discharge. The analysis of maximum water discharges showed the statistically significant negative trends at most hydrological stations with an average correlation coefficient of –0,33; no significant positive trends were identified. The analysis of the highest water levels showed the statistically significant negative trends also at most posts with an average correlation coefficient of –0,35. The frequency of floods, calculated over a long-term period, ranges from 0 to 26%, the average excess of critical levels is from 7 to 74 cm. Due to the widespread decrease in maximum flow rates and highest water levels, the probability of the dangerous hydrological phenomena associated with the passage of a seasonal flood wave is reduced. On the other hand, a continued increase in air temperature and a decrease in precipitation may cause a significant decrease in water flow of rivers in the future.

Keywords: river discharge, water level, the Lower Don River basin, floods

Acknowledgements. The study was financially supported by the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Rostov Region

REFERENCE

- Agroklimaticheskie resursy Rostovskoj oblasti [Agro-climatic resources of the Rostov region], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1972, 251 p. (In Russian)
- Bazelyuk A.A. [The dangerous hydrometeorological phenomena in the south of the European territory of Russia], *Prirodnye i sotsial'nye riski v beregovoi zone Chernogo i Azovskogo morei* [Natural and social risks in the coastal zone of the Black and Azov seas], Moscow, Triumf, 2012, p. 33–41. (In Russian)
- Dmitrieva V.A. Gidrologicheskii rezhim rek Donskogo basseina [Hydrological regime of the rivers of the Don River basin], *Proceedings of Voronezh State University, series: Geography, Geoecology*, 2018, no. 4, p. 77–84. (In Russian)
- Frolova N.L., Kireeva M.B., Kharlamov M.A. et al. Kartografirovaniye sovremennogo sostoyaniya i transformatsii vodnogo rezhima rek Evropeiskoi territorii Rossii [Mapping the current state and the transformation of water regime of rivers in the European territory of Russia], *Geodesy and Cartography*, 2020, vol. 81, no. 7, p. 14–26, DOI: 10.22389/0016-7126-2020-961-7-14-26. (In Russian)

- Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B. et al. Stream-flow of Russian rivers under current and forecasted climate changes: a review of publications 1. Assessment of changes in the water regime of Russian rivers by observation data, *Water Resources*, 2022, vol. 49, no. 3, p. 333–350. DOI: 10.1134/S0097807822030046.
- Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B. et al. [Modern changes of the maximum flow characteristics of Russian rivers], *Vodnye problemy i ih resheniya* [Water problems and their solution], Voprosy geografii, Moscow, Media-Press Publ., 2023, vol. 157, p. 137–166, DOI: 10.24057/probl.geogr.157.7. (In Russian)
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Milyukova I.P. et al. Sovremennye i stsennyye izmeneniya stoka Volgi i Dona [Modern and scenario changes of flow of the Volga and Don], *Water sector of Russia*, 2017, no 3, p. 6–23, DOI: 10.35567/1999-4508-2017-3-1. (In Russian)
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Kashutina E.A. Contemporary and scenario changes of river runoff in the Don basin, *Water Resources*, 2020, vol. 47, no. 6, p. 913–923. DOI: 10.1134/S0097807820060068.
- Georgievskii V.Yu., Grek E.A., Grek E.N. et al. Assessment of modern changes in maximum river flow in Russia, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2019, no. 11, p. 739–745, DOI: 10.3103/S1068373919110037.
- Gidroelektrostantsii Rossii* [Hydroelectric power stations of Russia], Moscow, Printing house of the Hydroproject Institute, 1998, 467 p. (In Russian)
- Itogovy otchet o vypolnenii rabot po gosudarstvennomu kontraktu "Kompleksnaya otsenka tendentsii izmeneniya klimaticheskikh uslovii na srednesrochnyi (do 2020 goda) i dolgosrochnyi (do 2050 goda) periody dlya preduprezhdeniya vozmozhnykh negativnykh posledstviy dlya okruzhayushchei sredy i ekonomiki oblasti"* [Final progress report under the state contract "Comprehensive assessment of climate trends for medium-term (until 2020) and long-term (until 2050) periods to prevent possible negative impacts on the environment and the economy of the region"], St. Petersburg, The Voeikov Main Geophysical Observatory Publ., 2012, 97 p. (In Russian)
- Kireeva M., Frolova N., Rets E. et al. Evaluating climate and water regime transformation in the European Part of Russia using observation and reanalysis data for the 1945–2015 period, *Int. J. River Basin Management*, 2019a, vol. 18, no. 4, p. 1–12, DOI:10.1080/15715124.2019.1695258.
- Kireeva M., Ilich V., Frolova N. et al. Estimation of the impact of climatic and anthropogenic factors on the formation of the extreme low-flow period in the Don River basin during 2007–2016. *Geogr. Environ. Sustainability*, 2019b, vol. 12, no. 2, p. 62–77. DOI:10.24057/2071-9388-2017-28.
- Kireeva M.B., Frolova N.L. Sovremennye osobennosti veshennego polovod'ya rek basseina Dona [Modern features of the spring flood of rivers in the Don basin], *Water sector of Russia: problems, technologies, management*, 2013, no. 1, p. 60–76. (In Russian)
- Kireeva M.B., Frolova N.L., Rets E.P. et al. Pavodochnyi stok na rekakh Evropeiskoi territorii Rossii i ego rol' v formirovaniі sovremennogo vodnogo rezhima [Flood flow on the rivers of the European territory of Russia and its role in the formation of modern water regime], *Water sector of Russia: problems, technologies, management*, 2018, no. 4, p. 48–68, DOI: 10.35567/1999-4508-2018-4-4. (In Russian)
- Kireeva M.B., Ilich V.P., Frolova N.L. et al. Vklad klimaticheskikh i antropogennykh faktorov v formirovanie malovodnogo perioda v basseine r. Don 2007–2015 gg. [The contribution of the climatic and anthropogenic factors to the extreme low flow period in the Don River basin (2007–2015)], *Georisk*, 2017, no. 4, p. 10–21. (In Russian)
- Kobysheva N.V., Narovlyanskii G.Ya. *Klimaticheskaya obrabotka meteorologicheskoi informatsii* [Climatic processing of meteorological information], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1978, 215 p. (In Russian)
- Kornilov A.G., Lebedeva M.G., Reshetnikov V.S. Trendy izmeneniya godovogo i sezonnogo stoka r. Severskii Donets za period instrumental'nykh gidrologicheskikh nablyudenii (na territorii Belgorodskoi oblasti) [Trends in annual and seasonal runoff of the Seversky Donets River during the period of instrumental hydrological observations (within the territory of the Belgorod region)], *Regional'nye geosistemy*, 2017, vol. 38, no. 4(253), p. 133–140. (In Russian)
- Litvinov P.V., Dmitrieva V.A. [Formation of the ice regime of the Upper Don rivers under modern climatic conditions], *Global'nye klimaticheskie izmeneniya: regional'nye efekty, modeli, prognozy* [Global climate change: regional effects, models, forecasts], Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Posvyashchena 85-letiyu fakul'teta geografii, geokologii i turizma VGU, Voronezh, 03–05 oktyabrya 2019 goda, Voronezh, Tsifrovaya poligrafiya Publ., 2019, vol. 1, p. 448–452. (In Russian)
- Lur'e P.M. [Regional features of climate change in southern Russia and their consequences (case study of the Rostov region)], *Geograficheskie issledovaniya Krasnodarskogo kraya* [Geographical studies of the Krasnodar Krai], collection of scientific papers, Krasnodar, Kuban State University Publ., 2010, iss. 5, p. 83–92. (In Russian)
- Lur'e P.M., Panov V.D. An influence of climate changes on hydrological regime of the Don River in the early 21st century, *Russian Meteorology and Hydrology*, 1999, no. 4, p. 62–68.
- Malinin V.N. *Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoi informatsii* [Statistical methods of hydrometeorological information analysis], Textbook, Saint-Petersburg, RGGMU Publ., 2008, 408 p. (In Russian)
- Nauchno-prikladnoi spravochnik. Mnogoletnie kolebaniya i izmenchivost' vodnykh resursov i osnovnykh kharakteristik stoka rek Rossiiskoi Federatsii* [Scientific and Applied Reference Book. Long-term fluctuations and variability of water resources and main characteristics of river flow of the Russian Federation], St. Petersburg, RIAL Publ., 2021, 190 p. (In Russian)
- Pryakhina G.V., Sumachev A.E., Syromyatina M.V., Kuznetsova M.R. *Baza dannykh kharakteristik vodnogo rezhima vodotokov i vodoemov Rostovskoi oblasti (RO HRWW)* [Database of water regime characteristics of watercourses and water bodies of the Rostov region (RO HRWW)], Patent RF, 2023, no. 2023623235. (In Russian)
- Sazonov A.D., Zakrutkin V.E., Reshetnjak O.S. Vremennaja izmenchivost' poverhnostnogo gidrohimičeskogo stoka v basseine reki Bol'shoj Egorlyk v usloviyakh antropogennogo vozdejstviya i klimaticheskikh izmenenij [Temporal variability of surface hydrochemical runoff in the Bolshoy Yegorlyk River basin under the anthropogenic impact and climate change], *Geologiya i geofizika Yuga Rossii*, 2022, vol. 12, no. 2, p. 114–127. (In Russian)

- Sikan A.V. *Metody statisticheskoi obrabotki gidrometeorologicheskoi informatsii* [Methods of statistical processing of hydrometeorological information], Textbook, "Hydrology" specialization of "Hydrometeorology" profile, St. Petersburg, RGGMU Publ., 2007, 279 p. (In Russian)
- State of the global climate 2021*, World Meteorological Association et al., 2022, 54 p., DOI: 10.13140/RG.2.2.23099.90400.
- Tretii otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii RF, Obshchee rezyume* [Third Assessment Report on Climate Change and its Impacts in the Russian Federation, General Summary], St. Petersburg, Naukoemkie tekhnologii Publ., 2022, 124 p. (In Russian)
- Web source*
- Perechen' opasnykh prirodnkh gidrometeorologicheskikh javlenij (OJa) na territorii JuFO i SKFO [List of hazardous natural hydrometeorological phenomena (NH) within the territory of the Southern Federal District and North Caucasus Federal District], URL: <https://yugmeteo.donpac.ru/hazards/> (access date 02.03.2024).

Received 12.11.2023

Revised 10.08.2024

Accepted 15.10.2024

СОКРАЩЕНИЕ ЧИСЛА СЕЛЬСКИХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ В РЕСПУБЛИКЕ УДМУРТΙΑ С 1920-Х ДО 2000-Х ГГ.

О.А. Балабейкина¹, В.Ю. Коробущенко²

¹ Санкт-Петербургский государственный экономический университет, гуманитарный факультет,
кафедра региональной экономики и природопользования

² Санкт-Петербургский государственный университет

¹ Доц., канд. геогр. наук; e-mail: olga8011@yandex.ru

² Магистр геоурбанистики; e-mail: parkkeva@gmail.com

Цель исследования – выявить основные факторы, причины, особенности и характер протекания процесса ликвидации сельских населенных пунктов Республики Удмуртия, имевшего место преимущественно с конца 1930-х гг. по настоящее время. Эмпирической основой исследования послужили интерактивный «Атлас исчезнувших деревень Удмуртии», правовые документы, закрепляющие факт ликвидации населенных пунктов, нестатистические сведения, а также информация, предоставленная Удмуртстатом по официальному запросу авторов. Собранные данные были обработаны с помощью методов контент-анализа, анализа и синтеза, картографического метода и расчета коэффициента Спирмена.

Представлена общая картина процесса упразднения сельских населенных пунктов Удмуртии, способствующая целостному представлению о характере его протекания в ретроспективе и современности. Детально процесс упразднения рассмотрен на территориях Воткинского и Ярского муниципальных районов Республики Удмуртия. Первый отличается разнообразием условий и факторов ликвидации, а второй является типовым в этом отношении.

В пределах Воткинского р-на было ликвидировано по меньшей мере 48 населенных пунктов. Причины разнились в разные исторические периоды. В начальный период существования СССР они сводились к массовой ликвидации индивидуальных сельских хозяйств, возникших в 1920-х гг. в период коллективизации. В 1960–1970-е гг. массовой ликвидации, реализованной в рамках директивы о ликвидации неперспективных сел и деревень, послужила их небольшая людность и крупный миграционный отток населения, имевший место с 1950-х гг. Населенные пункты ликвидировались и по причине изъятия заселенных территорий под водохранилище строящейся ГЭС, а также в связи с истощенностью лесных ресурсов.

Основными причинами упразднения являются обезлюдение, признание поселений бесперспективными и их дальнейшее исключение из учетных данных.

Кроме того, авторами уделяется внимание современным процессам ликвидации сельских поселений, где главным фактором остается их обезлюдение и хозяйственная заброшенность. Обозначаются современные тенденции, связанные с фактами образования новых деревень на месте некогда упраздненных.

Ключевые слова: система сельского расселения, деревня

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.9

ВВЕДЕНИЕ

Система расселения страны и ее отдельных регионов развивается динамично, претерпевая изменения, обусловленные экономическими, политическими, социокультурными, природными процессами. В результате их воздействия населенные пункты могут разрастаться, привлекая людей для постоянного проживания и увеличиваясь в численности и площади. Одновременно возможны и обратные процессы, когда города, поселки, села и деревни утрачивают население вплоть до полного обезлюдения. Оно, в свою очередь, приводит к исключению населенных пунктов из учетных данных.

Тема ликвидации поселений, безусловно, актуальна для России и ее отдельных регионов. Страна

переживала периоды, когда села и деревни упразднялись целенаправленно и директивно, не только в силу причин, продиктованных урбанизационными процессами или особенностями этапа экономического развития.

В целом, кроме отдельных случаев, исключение поселений из учетных данных воспринимается негативно, поскольку влечет за собой тяжелые социальные последствия. Поэтому исследование соответствующих процессов актуально и в аспекте поиска баланса эффективности территориального управления, с одной стороны, и благополучия населения – с другой. В последнем случае речь может идти не о материальном благосостоянии, а о комфорте, связанном с возможностью проживания в из-

бранном месте или, наоборот, осуществления переезда, если к этому имеется расположенность.

На фоне развития технических и транспортных средств, обеспечивающих качественное автономное проживание и мобильность населения, в последние годы фиксируется тенденция к образованию поселений, формально не зарегистрированных, но имеющих сезонное население. Как правило, его составляют дачники, потомки местных жителей, стремящиеся вернуться к родовым истокам, а также лица, предпочитающие проводить отпускной период в уединении.

При располагающих к этому условиях упраздненные некогда населенные пункты могут быть восстановлены в статусе имеющих постоянное население. Одним из субъектов РФ, на территории которого на протяжении длительного периода интенсивно ликвидировались поселения, является Республика Удмуртия. Регион отличается и высоким интересом населения к упраздненным населенным пунктам: в 2017 г. в д. Сеп Игринского р-на начал работать Народный музей исчезнувших деревень. Кроме того, фиксируются случаи регистрации вновь образованных поселений на месте некогда снятых с административного учета.

Исследования, послужившие теоретической и информационной опорой при разработке заявленной темы, можно разделить на несколько смысловых групп. В первую очередь это труды, касающиеся системы расселения сельской местности – ее структуры, тенденций и закономерностей развития и преобразования, ведущих отечественных специалистов: А.И. Алексеева [Алексеев, Имангулов, 2022], Н.В. Зубаревич [Зубаревич, 2017], Т.Г. Нефедовой [Нефедова, 2022] и др.

Важными для понимания процессов, протекающих в системе расселения сельской местности, являются результаты изысканий зарубежных ученых, уделявших внимание типологизации поселений [Stanny et al., 2021], социальной значимости «бесперспективных территорий» [Rodríguez-Pose, 2018], причинам и факторам обезлюдения сел и деревень [Sørensen et al., 2021; Mihailova, Ivanov, 2023]. Для реализации представленного исследования важны и труды, тематически связанные с системой расселения Республики Удмуртия [Кудрявцев и др., 2015].

Отдельную теоретико-методологическую ценность представляют труды, в которых рассмотрен процесс ликвидации населенных пунктов на примерах конкретных регионов РФ. Представленная одной из первых в отечественном научном обороте работа, непосредственно связанная с заявленной тематикой, была выполнена А.А. Ткаченко, И.П. Смирновым, А.А. Смирновой и касалась результатов реконструкции сельского расселения Тверской обл. [Смирнов и др., 2020].

Вслед за ней были опубликованы труды, в содержании которых объектно-предметной областью выступали упраздненные сельские населенные пункты некоторых других административно-территориальных субъектов РФ – Республики Карелия [Балабейкина, Коробущенко, 2023], Мурманской [Савоскул, Алексеев, 2021], Омской областей [Петров, 2019] и др. Результаты узкотематических исследований, проведенных на разных полигонах и отражающих процесс снятия с административного учета деревень, сел и др., служат в качестве опорной модели. Обращение к структуре и содержанию такого рода работ помогает выстроить оптимальную последовательность действий при очередной попытке осмысления и отражения проблемы упразднения сельских поселений в случае оперирования фактическими сведениями, касающимися конкретного региона, как это имеет место по отношению к Республике Удмуртия.

Важно учитывать и результаты исследований, авторы которых уделяют пристальное внимание причинам упразднения населенных пунктов в РФ [Соколова, 2016; Никонов, 2022; Янковская, 2021], поскольку в них содержатся общие необходимые сведения для понимания факторов ликвидации сел и деревень в целом по стране и в пределах отдельных территориальных образований. Практическое и теоретическое значение имеют работы, где обозначены дальнейшие перспективы вовлечения территорий ликвидированных сел и деревень в хозяйственное развитие регионов [Балабейкина, Геталова, 2024].

Отдельного упоминания заслуживают научные публикации, в которых анализируются правовые документы, выступающие основанием для снятия поселений с учета в РФ [Дамбуев, 2019; Попов, 2019; Праскова, 2011].

Анализ содержания указанных трудов позволяет утверждать, что эмпирическая база, отражающая процесс ликвидации и восстановления населенных пунктов в Удмуртии, весьма солидна и доступна для вовлечения в исследования. Однако комплексному научному осмыслению эти данные не подвергались. Цель исследования – выявить основные факторы, причины, особенности и характер протекания процесса ликвидации поселений, имевшего место в Республике Удмуртия с конца 1930-х гг. до современности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эмпирическую основу исследования составили такие источники, как интерактивный «Атлас исчезнувших деревень Удмуртии» [Атлас..., 2023]; правовые документы, закрепляющие факт ликвидации населенных пунктов; нестатистические сведения, представленные на порталах тематических

интернет-сообществ. С целью получения полной и достоверной информации о фактах и причинах ликвидации населенных пунктов авторы осуществляли официальный запрос в территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Удмуртской Республике (Удмуртстат), на который последовал содержательный ответ¹.

Собранные данные были обработаны с помощью методов анализа и синтеза данных открытого доступа. Использовался и картографический метод. Для выявления взаимосвязи между площадью территорий районов и количеством упраздненных населенных пунктов в их пределах был рассчитан коэффициент Спирмена.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В современных границах Республика Удмуртия имеет площадь 41,2 тыс. км² и характеризуется высокой степенью дробности административно-территориального деления, включая в свой состав пять городских округов и 25 муниципальных р-нов. Она была учреждена в конце 1934 г. путем преобразования из одноименной автономной области и постепенно расширялась за счет присоединения территорий, ранее относящихся к Кировской обл. Очертания региона и его внутренняя структура, близкие современным, сформировались в 1960-е гг.

Согласно сведениям, собранным в «Атласе исчезнувших деревень Удмуртии», за весь советский период в республике было упразднено не менее 2373 населенных пунктов. В среднем каждый район лишился 95 поселений. Лидером в данном отношении является Кезский (399 пункта), в то время как наименее активно процесс упразднения протекал в Камбарском р-не (21 пункт) (рис. 1). В некоторой степени такая диспропорция объясняется различиями в площади административных единиц: коэффициент Спирмена между двумя наборами данных равен 0,59, а критерий Фишера – 0,003, что свидетельствует о наличии умеренной прямой корреляции и ее статистической значимости. Необходимо, однако, учитывать, что густота сети населенных пунктов зависит от географических условий местности, истории ее освоения и прочих факторов.

Если рассматривать процессы ликвидации населенных пунктов в республике в хронологическом порядке, обнаружится, что первые преобразования в этом направлении, носившие массовый характер, относятся к концу 1930-х – началу 1940-х гг. (реже – к 1920-м гг.). Причина – политика государства по отношению к отдельным хозяйствам. Земельным кодексом РСФСР, действовавшим с декабря 1922 г.,

устанавливалась возможность участкового землепользования, реализуемая в том числе через выход на хутора и отруба. Такие единоличные хозяйства назывались выселками и починками.

Хуторская система сельского хозяйства просуществовала недолго, поскольку шла вразрез с планом всеобщей коллективизации. В мае 1939 г. руководством СССР было подписано постановление «О сселении дворов колхозников, проживающих на бывших участках хуторского землепользования, в колхозные селения», предполагавшее реализацию к сентябрю 1940 г. На уровне регионов партийными органами издавались аналогичные по содержанию документы. Таковым было, например, постановление СНК УАССР от 16 августа 1939 года № 105714 «О сселении хуторских хозяйств к центральным колхозам по Киясовскому району».

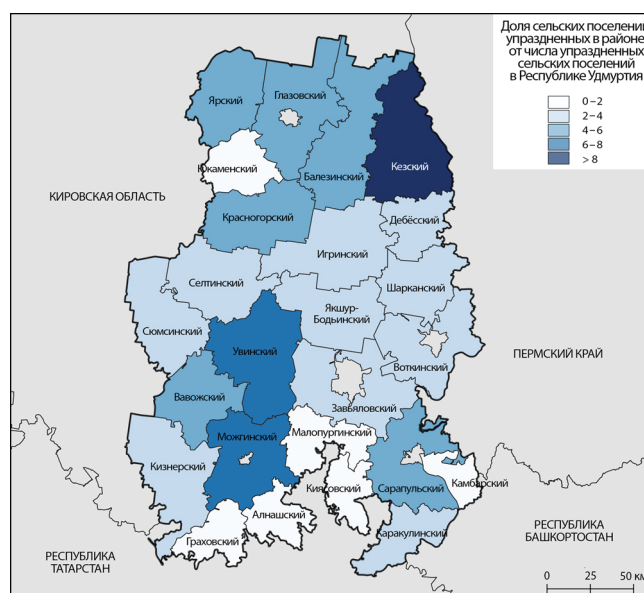


Рис. 1. Доля упраздненных сельских населенных пунктов в разрезе по районам Республики Удмуртия.

Источник: составлено авторами по [Атлас..., 2023]

Fig. 1. The share of abolished rural settlements by districts of Udmurt Republic.

Source: compiled by the authors based on [Atlas..., 2023]

На основании этих документов Указом Президиума Верховного Совета УАССР от 5 июня 1941 г. массово снимались с учета поселения единоличников. Примерами можно указать выс. Песьянка Воткинского р-на; поч. Агеево, Винокурово, Гурапи (Верх. Чепык) Дебесского р-на; д. Яшемель Игринского р-на; д. Шараторы, поч. Лекомувыр, Рябиновский, Сеткай, Троегоры Кезского р-на.

Некоторые поселения, например поч. Макаровский (Макар-починка) Дебесского р-на, Холодный Ключ Кулигинского р-на и д. Гусево Воткинского

¹ Зарегистрировано как «Входящий 1543/4.8.2-03 от 21.11.23».

р-на, прекратили свое фактическое существование еще в 1930-е гг. Причинами стали попадание под раскулачивание, самоликвидация, вступление жителей в состав ближайшего колхоза.

На уровне постановлений Пленума ЦК КПСС к планомерной ликвидации сельских населенных пунктов вернулись в конце 1959 г. Принятое тогда решение о реорганизации «регионального и внутрихозяйственного планирования» стало базой для выработки Академией строительства и архитектуры СССР конкретных предписаний. Согласно таковым, поселения, расположенные в сельской местности, подразделялись на «перспективные» и «неперспективные». Считалось, что последние следовало упразднить. Перспективность оценивалась по таким составляющим, как транспортная доступность населенного пункта, высокий уровень экономического развития и численность населения 1–1,5 тыс. чел. Деревни и села Удмуртии, которые и до войны 1941–1945 гг., принесшей большие людские потери, были преимущественно небольшими, соответствие таким критериям выдержать не могли и массово попадали в перечень неперспективных.

Фиксируется немало примеров сельских населенных пунктов, ликвидированных еще до выхода официального постановления в 1959 г. В частности, в 1955 г. на основании отдельных Указов Президиума Верховного Совета УАССР выселки Михайловка Алнашского р-на, Терехи и Трудовая Пчела Воткинского р-на, Байкашур Дебесского и т. д. были исключены из списка населенных пунктов.

В 1950-е гг. многие поселения обезлюдели фактически, т. е. не только в связи с укрупнением колхозов, но и по причине оттока населения на освоение целинных земель. Юридически эти нежилые поселения были сняты с административного учета также в 1959 г. – поч. Матвеевский Дебесского р-на, Васьякалуд, Дэменлуд, Иванквашур Игринского р-на и т. д.

Но особенно массовый характер ликвидация сел и деревень стала носить с 1960-х гг., когда власти приступили к реализации соответствующих постановлений и рекомендаций.

Между фактическим опустением или признанием поселения неперспективным и формальной ликвидацией могли проходить десятилетия. Например, д. Сырян (Средний Сырян) Граховского р-на попала в перечень предназначенных для упразднения в 1960-е гг., а снята с учета в 1978 г. Опустение д. Бибаньгурт (Кельмекей) Дебесского р-на началось в 1960-х гг., а официально она перестала числиться как населенный пункт только в середине 1980-х гг. Здесь же находилась д. Сылызь, в 1973 г. насчитывавшая 40 чел. населения и признанная неперспективной; формально она была снята с учета только в 1983 г.

В 1980 г. деление сельских поселений на перспективные и не являющиеся таковыми было отменено решением того же государственного органа, который предлагал эту систему в 1960 г. Но сеть населенных пунктов уже была разрушена, процессы обезлюдения в сельской местности Удмуртии продолжались.

Новым документом, на уровне государства закрепляющим процесс ликвидации поселков, деревень и сел в России, стал Указ Президиума ВС РСФСР от 17 августа 1982 г. «О порядке решения вопросов административно-территориального устройства РСФСР». Он частично сохраняет актуальность, хотя в постсоветской России были выпущены законы от 18 декабря 1997 г. № 152-ФЗ «О наименованиях географических объектов» и № 131-ФЗ «Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации» от 06.10.2003 (отредактирован 14.07.2022).

Ликвидация сел и деревень Удмуртии имела место в 1990-е и в 2000-е гг. Так, только 22 июня 2004 г. было исключено из учетных данных 92 населенных пункта. Из них 15 – в Кизнерском р-не; 12 – Якшур-Бодьинском; 10 – Балезинском, Ярском, 7 – Кезском, 6 – Красногорском; 5 – Селтинском, Шарканском; 3 – Воткинском, Можгинском; по 2 – в Глазовском, Игринском и Камбарском; по одному – в Дебесском, Завьяловском, Казмасском, Сюмсинском р-нах. Во всех случаях причиной упразднения было длительное отсутствие в населенном пункте постоянного населения и зарегистрированного в собственности недвижимого имущества.

Актуальный закон рассматриваемого субъекта РФ, в котором отражены условия ликвидации населенных пунктов в пределах его территории, именуется «Об административно-территориальном устройстве Удмуртской Республики» от 19 октября 2006 г. за № 46-РЗ. Содержанием ст. 17 декларируется, что упразднению подлежат населенные пункты, в которых длительное время (свыше трех лет) отсутствуют граждане, постоянно или преимущественно проживающие в указанном населенном пункте, и (или) находящееся в собственности физических и юридических лиц недвижимое имущество.

Этим критериям вполне соответствовали поселения, ликвидированные постановлениями Государственного совета Удмуртской Республики во втором – начале третьего десятилетия XXI в. В 2011 г. на указанных основаниях была упразднена д. Лыштанка Кизнерского р-на; в 2013 г. поч. Молодежный Завьяловского р-на; в 2015 г. д. Чулья Кизнерского р-на; в 2017 г. Дома 1016 км, Дома 1024 км, Дома 1050 км, Дома 1055 км Можгинского р-на и д. Старая Казанка Кизнерского р-на; в 2021 г. Дома 1128 км, дерев-

ни Феокистово и Тюрики Ярского р-на; в 2022 г. д. Юклята Кезского р-на.

Снятые с учета починки и деревни отдалены от административных центров, и возможность их возрождения в обозримой перспективе отсутствует. В ответ на направленный авторами запрос о предоставлении информации об использовании площадей перечисленных ликвидированных поселений Постоянной комиссией Государственного совета Удмуртской Республики по государственному строительству и местному самоуправлению сообщается, что земли населенных пунктов переданы для ведения личного подсобного хозяйства, но не используются, так как не востребованы.

Для получения более детального представления о характере процессов ликвидации поселений в рассматриваемом регионе следует сосредоточить внимание на его отдельных районах. В качестве таковых были выбраны Воткинский и Ярский районы. Первый – как наиболее полно сосредоточивший причины ликвидации населенных пунктов, а второй – как типовой в этом отношении.

«Атлас исчезнувших деревень Удмуртии» содержит сведения о 48 ликвидированных населенных пунктах Воткинского района. Хронологически процесс их упразднения открывается 5 июня 1941 г. и обусловлен упомянутым выше постановлением Президиума Верховного Совета УАССР, которым снимались с учета индивидуальные хозяйства. В Воткинском р-не примерами таковых были выселок Песьянка и починок Тихой Ключ.

В 1955 г. официально упразднили выселок Трудовая Пчела и д. Терехи (Бажуково). До этого времени, еще с 1950 г., когда объединили колхозы, оба населенных пункта стремительно теряли население, переселявшееся в центральную колхозную усадьбу д. Двигатель и в г. Воткинск. Аналогичные направления миграционных процессов были и в д. Захарки, но она подверглась ликвидации несколько позднее – в 1963 г. Путем объединения с д. Болгуры в 1956 г. была упразднена д. Гусево.

Далее процессы ликвидации населенных пунктов Воткинского р-на были связаны не только с укрупнением сельских поселений, но и с введением в эксплуатацию крупных промышленных объектов, а также истощением ресурсов для работы добывающих предприятий.

В 1955 г. вышло распоряжение Совета Министров СССР о строительстве Воткинской ГЭС, в результате осуществления которого ряд поселений Камского сельского совета попадали в зону затопления водами водохранилища. Решение о переносе населенных пунктов было принято еще в 1954 г., но переселение жителей началось в 1957 г. В результате перестали существовать д. Гамы, Гараны,

Демино, Зебеи, Заболотово, Соколы и др., формально упраздненные в 1963 г.

Сохранялась и тенденция ликвидации населенных пунктов, обезлюдевших в связи с переездом жителей. В том же году, что и подвергшиеся затоплению деревни, был снят с учета как несуществующий выселок Ольховское, хотя еще в 1955 г. в нем числилось 56 чел. Видимо, они переселились за это время в более крупные населенные пункты.

Как неперспективные были ликвидированы д. Каменный Ключ (1963), Малиновка и Костенки (1967) и др.

Еще одна тенденция упразднения населенных пунктов в Удмуртии связана с теми из них, которые были образованы в 1930-х гг. как лесозаготовительные. К середине 1960-х гг. лесные ресурсы, обеспечивавшие функционирование соответствующих предприятий, были исчерпаны. Соответственно, обезлюдели и были ликвидированы пос. Калиновский (1963), Безречный лесоучасток и Мутовки (1966), кордон Черновского лесничества (1984).

Сохранялась и роль гидроэнергетических станций: решение о переселении населения д. Патраково из зоны затопления Нижнекамской ГЭС было принято в 1974 г., а упразднено поселение было в 1977 г. В 1983 г. по этой же причине ликвидирована д. Паздеры, территория которой так и не была задействована под площадь водохранилища.

Таким образом, в советский период в пределах Воткинского р-на были сняты с административного учета десятки сельских населенных пунктов. Основные причины ликвидации сводятся к коллективизации, миграционному оттоку из села в город, выполнению директивы о ликвидации неперспективных сел и деревень в 1960–1970-е гг., строительству и введению в эксплуатацию Воткинской ГЭС, истощению лесных ресурсов.

В постсоветский период в Воткинском р-не продолжались процессы, вызывающие отток населения и обезлюдение поселений. В связи с экономическим кризисом, сопровождающим смену политического и экономического устройства, в 1994 г. был закрыт Костоватовский дом отдыха, а 10 лет спустя официально упразднен поселок, образованный при нем. Тогда же были ликвидированы нежилые поселения – разъезд Метляки Гавриловского сельсовета и Дома 62 км Июльского сельсовета.

В качестве типового в отношении причин ликвидации населенных пунктов следует рассмотреть Ярский р-н. Согласно «Атласу исчезнувших деревень Удмуртии», в нем было упразднено 109 поселений в период как минимум с 1939-го (возможно, не ранее 1924-го) по 2021 г. (рис. 2).

Ликвидации подвергались сельские поселения различных типов – деревни, починки, выселки,

хутора, разъезды, отрубы, одиночные домохозяйства при мельницах. Основная их часть возникла в XIX в. и предреволюционный период. Старейший из ликвидированных пунктов – Кушман, основанный в 1662 г.; наиболее поздний по времени основания пункт – Дома 1107 км (1971). Как минимум 12 поселений возникли в XVIII в., из них Большое Малагово, Верхняя Чура, Комарово и Полом были образованы в 1710 г., а Шулегово и Каравай – в 1717 г.

Наиболее распространенной судьбой поселений стало прекращение упоминания их в списках населенных пунктов и невключение в последующие переписи населения: это относится к 83 поселениям района (76,1% от общего числа упразднений). Данные кейсы должны сопровождаться соответствующими приказами и постановлениями, однако обнаружить их в свободном доступе удается не всегда.

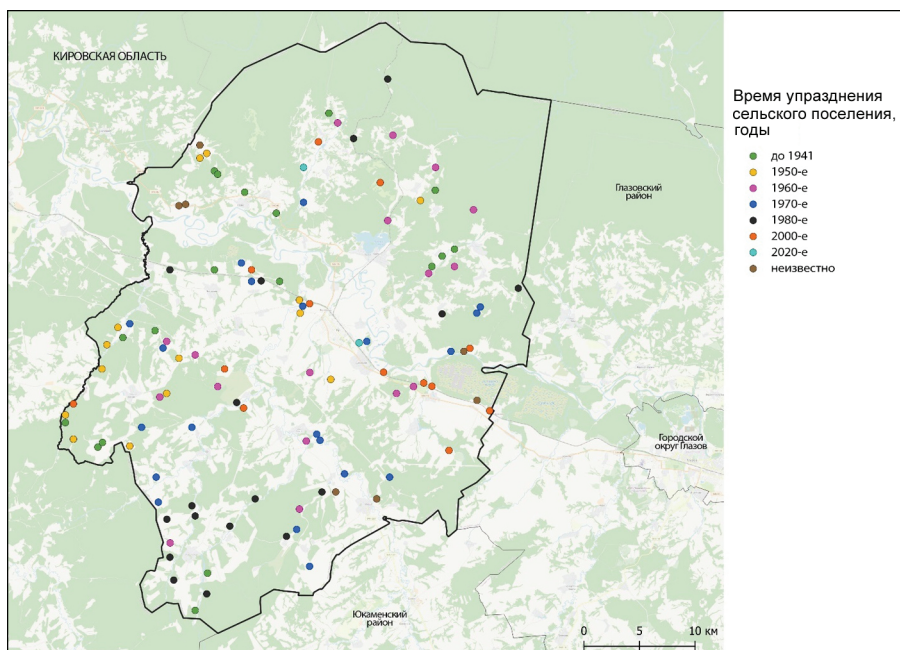


Рис. 2. Упраздненные сельские населенные пункты Ярского района Республики Удмуртия по времени упразднения.

Источник: составлено авторами по [Атлас..., 2023]

Fig. 2. Abolished rural settlements of the Yarsky district of Udmurt Republic by time of abolishment.

Source: compiled by the authors based on [Atlas..., 2023]

В пределах рассматриваемого района 12 поселений (11%) были официально ликвидированы путем снятия с учета в связи с обезлюдением и бесперспективностью. В сущности то же самое, хотя без официального указания конкретной причины, коснулось пяти (4,6%) поселений. Территории пяти пунктов (4,6%) не утратили селитебной функции, будучи либо включенными в близлежащие более крупные поселения, либо объединенными с другими поселениями и образовавшие такие образом новые населенные пункты. Еще о четырех поселениях (3,7%) сведений не имеется.

Единственным населенным пунктом, выделяющимся среди других, является д. Сосновка, на территории которой была сформирована воинская часть. Конечной причиной ликвидации, впрочем, значителен обезлюдение.

В довоенный период было упразднено 18 населенных пунктов, в период 1950–1970 гг. – 31, в пе-

риод 1970–1990 гг. – 38, позже 2000 г. – 15 (рис. 3). Два поселения были упразднены в период с 1939 по 1955 г., по одному – позже 1971 и 1980 гг. О трех поселениях сведений нет. Годами-рекордсменами по количеству ликвидированных поселений являются 1971, 1965 и 1989 гг. (20, 15 и 12 пунктов соответственно). Некоторые из пунктов существовали очень короткий период. Так, хутора Лубнина и Казаковский были образованы в 1920 г., а 1925-й уже является годом их последнего официального упоминания.

Следует, однако, учитывать, что между последним упоминанием населенного пункта в официальных документах и его упразднением могли пройти многие годы. Так, поч. Поздеевский прекратил упоминаться в 1939 г., а упразднен был в 1955 г. Другими кейсами являются д. Гушино и разъезд Дома 1122 км, для которых даты последнего упоминания и упразднения приходятся соответственно на 1965/1971 и 1989/2001 гг. В связи с этим в слу-

чае отсутствия иных сведений даты были приравнены друг к другу. Более того, в списках населенных пунктов могли не упоминаться поселения, на тот момент все еще имевшие постоянное население, например в поч. Мысомлянск на момент прекращения упоминания в 1926 г. проживало 28 человек.

На фоне продолжающихся процессов обезлюдения и ликвидации сельских поселений фиксируются и случаи возвращения некогда упраздненным селам и деревням статуса населенных пунктов, имеющих постоянное население. Это касается, напри-

мер, д. Мувыр Игринского р-на (2008) и д. Лубянка Сарапульского р-на (2010). Последняя была упразднена в 1986 г., но в «Атласе исчезнувших деревень Удмуртии» не упоминается, как и д. Русский Сарамак Кизнерского р-на, ликвидированная в 1984 г. и восстановленная в 2011 г. В 2019 г. были вновь образованы деревни Родники Красногорского р-на и Большие Котляки Якшур-Бодьинского р-на. Первая была исключена из учетных данных в 1978 г., а вторая была ликвидирована в 1963 г. в связи с переселением населения по причине укрупнения сел и деревень.



Рис. 3. Динамика количества упраздненных поселений Ярского р-на Республики Удмуртия, 1924–2021 гг. (составлено авторами). *Примечание:* даты последнего упоминания и упразднения поселений приравнены друг к другу

Fig. 3. Dynamics of the number of abolished settlements in the Yarsky district of the Udmurt Republic, 1924–2021 (compiled by the authors). *Note:* the dates of the last mention and the abolition of settlements are equal to each other

Территории упраздненных некогда населенных пунктов заселяются благодаря развитию системы индивидуального сельского хозяйства и агротуризма. Эти два направления характерны для дестинаций указанного типа в Удмуртии. В отличие, например, от Республики Карелия, где в упраздненных населенных пунктах сохранились историко-архитектурные объекты, интересные для экскурсионного осмотра (деревянные культово-культурные, жилые и хозяйственные постройки), существенного потенциала для познавательных туристских маршрутов в ликвидированных селах и деревнях Удмуртии не имеется.

ВЫВОДЫ

Научное осмысление процесса ликвидации сел и деревень на уровне регионов и их отдельных районов в настоящее время имеет высокую теоретическую и практическую значимость. Данное направление рурологии находится на начальных этапах развития, поэтому важны и методологические разработки, и приращение фактических знаний по указанной тематике. На практике фиксируются неоднократные слу-

чай, когда ранее упраздненные поселения вновь заселяются, а площади их используются под хозяйство.

Удмуртская Республика выступает примером субъекта РФ, в пределах которого ликвидация населенных пунктов осуществлялась на протяжении всего периода с момента образования.

Во многом процесс исключения поселений из учетных данных отражает общие тенденции социально-экономического развития. Так, в 1920–1930-х гг. в Удмуртии, согласно открывшимся возможностям, возникает большое количество поселений, образованных индивидуальными хозяйствами (починки, выселки). Вскоре они были массово ликвидированы в связи с корректировкой курса государственного развития сельского хозяйства.

Большая часть сельских населенных пунктов Удмуртии были небольшими по численности населения и не выдерживали установленных в 1960 г. критериев перспективности. Поэтому большей частью причиной ликвидации выступает исключение сел и деревень из учетных данных. Начатый в 1960 г. этот процесс активно продолжался в 1970–1980-е гг. Процессы обезлюдения начались еще

в 1950-е гг. Жители сельских районов массово выезжали с целью поиска работы на освоении целинных земель, в крупные города.

В 1960-х гг. в районах, где природные условия к этому располагают (Воткинский р-н), некоторые села и деревни упразднялись в связи со строительством и введением в эксплуатацию крупных ГЭС и изъятием селитебных площадей под водохранилища.

Немногочисленны на общем фоне примеры ликвидации лесозаготовительных рабочих поселков, основанных в 1930-х гг., а к середине 1960-х гг. оказавшихся в зоне истощенных лесных ресурсов.

Заметно на обезлюдении и упразднении сельских поселений Удмуртии сказался кризис, сопро-

вождавший распад СССР и создание нового экономического порядка. Обезлюдившие в 1990-х гг. села и деревни в массовом порядке официально упразднялись в начале 2000-х гг.

Однако Республика Удмуртия является примером средоточия познавательного интереса населения к упраздненным поселениям, успешной реализации попыток сохранить историко-культурное наследие ликвидированных сел и деревень. Кроме того, в пределах региона имеются неоднократные примеры инициированного фактически проживающими гражданами образования новых деревень на территориях, некогда снятых с административного учета. Такая позитивная тенденция открывает перспективы для дальнейших исследований в затронутой области знаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев А.И., Имангулов Л.Р. Сельская местность Башкирии: преобладающие типы и особенности трансформации в постсоветский период // Крестьяноведение. 2022. № 4. С. 109–132. DOI: 10.22394/2500-1809-2022-7-4-109-132.
- Балабейкина О.А., Геталова А.С. Упраздненные поселения в системе расселения и туристско-рекреационном хозяйстве Архангельской области // Псковский региональный журнал. 2024. Т. 20. № 1. С. 107–120.
- Балабейкина О.А., Коробущенко В.Ю. Упраздненные поселения Карелии: прошлое и настоящее // Историко-географический журнал. 2023. Т. 2. № 1. С. 90–97. DOI: 10.58529/2782-6511-2023-2-1-90-97.
- Дамбуев И.А. Орфография топонимов в зеркале современного регионального законодательства // Мир науки. Социология, филология, культурология. 2019. № 4. С. 45.
- Зубаревич Н.В. Развитие сельских территорий России, социальные и гендерные проблемы // Международный сельскохозяйственный журнал. 2017. № 2. С. 12–14.
- Кудрявцев А.Ф., Лекомцев А.Л., Сидоров В.П. Особенности Ижевской агломерации и экономические перспективы ее развития // Экологический консалтинг. 2015. № 3(59). С. 30–34.
- Нефедова Т.Г. Пространственная дифференциация сельскохозяйственного производства в России в условиях природного и социального опустынивания // Известия РАН. Серия географическая. 2022. № 1. С. 69–81. DOI: 10.31857/S2587556622010101.
- Никонов В.В. Проект «сноса» 26 селений Московской области из-за действовавших в них православных храмов. 1951 г. // Вестник архивиста. 2022. № 2. С. 546–556. DOI: 10.28995/2073-0101-2022-2-546-556.
- Петров Ю.В. Процессы упразднения населенных пунктов на юге Тюменской области в период 1989–2018 годов // Горные ведомости. 2019. № 1. С. 88–95.
- Попов С.А. О роли законодательных органов государственной власти субъектов РФ в регулировании топонимической номинации // Неофилология. 2019. № 20. С. 491–501. DOI: 10.20310/2587-6953-2019-5-20-491-501.
- Праскова С.В. Упразднение муниципальных образований: критерии допустимости // Журнал российского права. 2011. № 3. С. 57–64.
- Савоскул М.С., Алексеев А.И. Траектории трансформации одной неперспективной деревни (на примере деревни Кузрека Терского района Мурманской области) // Крестьяноведение. 2021. № 3. С. 111–123. DOI: 10.22394/2500-1809-2021-6-3-111-123.
- Смирнов И.П., Смирнова А.А., Ткаченко А.А. Итоги проведения политики сселения малых деревень в Нечерноземье (на примере Тверской области) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2020. № 4. С. 105–115.
- Соколова Е.В. Ключевые причины исчезновения деревень Колосовского района Омской области в 1950–1980-е гг. // Вестн. Омского гос. аграрного ун-та. 2016. № 2. С. 261–268.
- Янковская Г.А. Негативные последствия советских гидроэнергетических проектов: форматы и практики мемориализации // Сибирские исторические исследования. 2021. № 4. С. 119–137.
- Mihailova M., Ivanov B. The change in social infrastructure in rural Bulgaria, *Rural Areas and Development*, 2023, no. 18, p. 37–52, DOI: 10.61517/RAD/2023/18.0300.
- Rodríguez-Pose A. The revenge of the places that don't matter (and what to do about it), *Journal of Regions, Economy and Society*, 2018, no. 1, p. 189–209, DOI: 10.1093/cjres/rsx024.
- Sørensen J.F.L., Svendsen G.L.H., Jensen P.S. et al. Do rural school closures lead to local population decline? *Journal of Rural Studies*, 2021, no. 1, p. 226–235, DOI: 10.1016/j.jrurstud.2021.09.016.
- Stanny M., Komorowski L., Rosner A. The Socio-Economic Heterogeneity of Rural Areas: Towards a Rural Typology of Poland, *Energies*, 2021, no. 14(16), p. 1–23, DOI: 10.3390/en14165030.

Электронный ресурс

Атлас исчезнувших деревень Удмуртии. URL: <https://lost-villages.udsu.ru> (дата обращения 10.02.2023).

Поступила в редакцию 19.12.2023
После доработки 05.06.2024
Принята к публикации 15.10.2024

REDUCTION IN THE NUMBER OF RURAL SETTLEMENTS IN THE REPUBLIC OF UDMURTIA DURING 1920S–2000S

O.A. Balabeikina¹, V.Yu. Korobuschenko²

¹ Saint Petersburg State University of Economics, Faculty of Humanities,
Department of Regional Economics and Nature Management

² Saint Petersburg State University

¹ Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: olga8011@yandex.ru

² Master in Geourbanistics; e-mail: parkkeva@gmail.com

The purpose of the study is to identify the main factors, causes, features and nature of the abolishment of rural settlements in the Udmurt Republic, that took place mainly since the late 1930s. The empirical basis of the study is the interactive “Atlas of Disappeared Villages of Udmurtia”, legal documents confirming the fact of abolishment, non-statistical information, as well as information provided by Udmurtstat at the official request of the authors. The collected data are processed using the methods of content analysis, analysis and synthesis, cartographic method and calculation of the Spearman’s correlation coefficient.

A general picture of the abolishment process of rural settlements in Udmurtia is presented. The process is examined in detail for the Votkinsky and Yarsky districts. The former is characterized by a variety of causes and factors of abolishment, and the latter is a typical one in this context.

At least 48 settlements were abolished in the Votkinsky district. During particular historical periods the reasons were different. In the initial period of the USSR, the mass abolishment of individual agricultural farms was caused by the collectivization. In the 1960–1970s the mass abolishment, implemented within the framework of the directive on the abolishment of unpromising villages, was caused by their small population and large migration outflow that took place since the 1950s. Settlements were also abolished due to the confiscation of areas for water reservoirs and hydroelectric power stations, as well as because of the depletion of forest resources.

The main reasons of abolishment were depopulation, recognition of settlements as unpromising and their further exclusion from accounting data.

In addition, the authors pay attention to modern abolishment of rural settlements, when the main factors are their depopulation and economic abandonment. Current trends associated with the formation of new villages replacing once abolished ones are also identified.

Keywords: rural settlements system, village

REFERENCES

- Alekseev A.I., Imangulov L.R. Sel’skaja mestnost’ Bashkiri: preobladajushhie tipy i osobennosti transformacii v postsovetский period [Rural areas of Bashkiria: prevailing types and features of transformation in the post-Soviet period], *Russian Peasant Studies*, 2022, no. 4, p. 109–132, DOI: 10.22394/2500-1809-2022-7-4-109-132. (In Russian)
- Balabeikina O.A., Getalova A.S. Uprazdnennye poselenija v sisteme rasselenija i turistsko-rekreacionnom hozjajstve Arhangel’skoj oblasti [Abolished settlements in the system of settlement and tourist and recreational economy of the Arkhangelsk Region], *Pskov Journal of Regional Studies*, 2024, no. 1, p. 107–120. (In Russian)
- Balabeikina O.A., Korobushchenko V.Yu. Uprazdnjonnye poselenija Karelii: proshloe i nastojashhee [Past and present of the abolished settlements in the Republic of Karelia], *Historical Geography Journal*, 2023, no. 1, p. 90–97, DOI: 10.58529/2782-6511-2023-2-1-90-97. (In Russian)
- Dambuev I.A. Orfografiya toponimov v zerkale sovremenno-go regional’nogo zakonodatel’sтва [Orthography of place names in the mirror of modern regional legislation], *Mir nauki. Sociologija, filologija, kul’turologija*, 2019, no. 4, p. 45. (In Russian)
- Kudryaftsev A.F., Lekomtsev A.L., Sidorov V.P. Osobennosti Izhevskoj aglomeracii i jekonomicheskie perspektivy ee razvitija [Specific features of the Izhevsk agglomeration and economic prospects of its development], *Jekologicheskij konsalting*, 2015, no. 3(59), p. 30–34. (In Russian)
- Mihailova M., Ivanov V. The change in social infrastructure in rural Bulgaria, *Rural Areas and Development*, 2023, no. 18, p. 37–52, DOI: 10.61517/RAD/2023/18.0300.
- Nefedova T.G. Prostranstvennaja differenciacija sel’skohozjajstvennogo proizvodstva v Rossii v uslovijah prirodnogo i social’nogo opustynivaniya [Spatial differentiation of agricultural production in Russia under conditions of natural and social desertification], *Izvestija Rossijskoj akademii nauk, Serija geograficheskaja*, 2022, no. 1, p. 69–81, DOI: 10.31857/S2587556622010101. (In Russian)
- Nikonov V.V. Proekt “snosa” 26 selenij Moskovskoj oblasti iz-za dejstvovavshih v nih pravoslavnyh hramov. 1951 g. [Unrealized project of “demolition” of 26 villages of the MOSCOW region on account of functioning orthodox churches (1951)], *Vestnik arhivista*, 2022, no. 2, p. 546–556, DOI: 10.28995/2073-0101-2022-2-546-556. (In Russian)
- Petrov Yu.V. Processy uprazhnenija naselennyh punktov na Yuge Tjumenskoj oblasti v period 1989–2018 godov [Processes of the abolishment of settlements in the South

- of the Tyumen region in the period 1989–2018], *Gornye vedomosti*, 2019, no. 1, p. 88–95. (In Russian)
- Popov S.A. O roli zakonodatel'nyh organov gosudarstvennoj vlasti sub'ektov RF v regulirovanii toponimicheskoy nominacii [On the role of legislative bodies of state power of the subjects of the Russian Federation in toponymical naming regulation], *Neofilologija*, 2019, no. 20, p. 491–501, DOI: 10.20310/2587-6953-2019-5-20-491-501. (In Russian)
- Praskova S.V. Uprazhdenie municipal'nyh obrazovanij: kriterii dopustimosti [Abolishment of municipal bodies: criteria of admissibility], *Zhurnal Rossijskogo prava*, 2011, no. 3, p. 57–64. (In Russian)
- Rodríguez-Pose A. The revenge of the places that don't matter (and what to do about it), *Journal of Regions, Economy and Society*, 2018, no. 1, p. 189–209, DOI: 10.1093/cjres/rsx024.
- Savoskul M.S., Alekseev A.I. Traektorii transformacii odnoj neperspektivnoj derevni (na primere derevni Kuzreka Terskogo rajona Murmanskoy oblasti) [Trajectories of transformation of an unpromising village (case study of the Kuzreka village, the Tersk district of the Murmansk region)], *Krest'janovedenie*, 2021, no. 3, p. 111–123, DOI: 10.22394/2500–1809-2021-6-3-111-123. (In Russian)
- Smirnov I.P., Smirnova A.A., Tkachenko A.A. Itogi provedeniya politiki sseleniya mal'nyh dereven' v Nechernozem'e (na primere Tverskoj oblasti) [The results of the “resettlement of small villages” policy in the non-Chernozem area (case study of the Tver region)], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2020, no. 4, p. 105–115. (In Russian)
- Sokolova E.V. Kljuchevye prichiny ischeznovenija dereven' Kolosovskogo rajona Omskoj oblasti v 1950–1980-e gg. [Key reasons for vanishing of villages in the Kolosovsky district of the Omsk region in 1950–1980], *Vestn. Omskogo gos. agrarnogo un-ta*, 2016, no. 2, p. 261–268. (In Russian)
- Sørensen J.F.L., Svendsen G.L.H., Jensen P.S., Schmidt T.B. Do rural school closures lead to local population decline? *Journal of Rural Studies*, 2021, no. 1, p. 226–235, DOI: 10.1016/j.jrurstud.2021.09.016.
- Stanny M., Komorowski L., Rosner A. The Socio-Economic Heterogeneity of Rural Areas: Towards a Rural Typology of Poland, *Energies*, 2021, no. 14(16), p. 1–23, DOI: 10.3390/en14165030.
- Yankovskaya G.A. Negativnye posledstviya sovetskikh gidroenergeticheskikh proektov: formaty i praktiki memorializacii [Adverse effects of Soviet hydropower projects: formats and practices of memorialization], *Sibirskie istoricheskie issledovaniya*, 2021, no. 4, p. 119–137. (In Russian)
- Zubarevich N.V. Razvitie sel'skikh territorij Rossii, social'nye i gendernye problem [Development of rural territories in Russia, social and gender problems], *Mezhdunarodnyj sel'skohozjajstvennyj zhurnal*, 2017, no. 2, p. 12–14. (In Russian)
- Web source*
Atlas of disappeared villages of Udmurtia, URL: <https://lost-villages.udsu.ru> (access data 10.02.2023).

Received 19.12.2023

Revised 05.06.2024

Accepted 15.10.2024

ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТЕЙ ОРГАНОГЕННЫХ И ГУМУСОВЫХ ГОРИЗОНТОВ ПОЧВ В ЛЕСОМЕЛИОРИРОВАННЫХ ЛАНДШАФТАХ СУХОСТЕПНОЙ ЗОНЫ

М.Р. Шайфуллин¹, О.А. Гордиенко², А.В. Кулик³

^{1–3} Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций
и защитного лесоразведения РАН, лаборатория защиты почв от эрозии

¹ Мл. науч. сотр.; e-mail: shafullin-mr@vfanc.ru

² Мл. науч. сотр.; e-mail: gordienko-o@vfanc.ru

³ Ст. науч. сотр., канд. с.-х. наук; e-mail: kulik-a@vfanc.ru

В работе рассмотрены особенности пространственного распределения слоев подстилки и гумусовых горизонтов почв лесомелиорированной территории. Объектом исследования являлись лесокультурные ландшафты на низкопродуктивных песчаных землях, созданные в начале XX в. для защиты от дефляции. Территория расположена в Камышинском районе Волгоградской области (кадастровый квартал – 34:36:000014). Целью исследования было определение особенностей распределения мощности органогенных слоев и гумусовых горизонтов, связанных с составом насаждений (хвойные, лиственные породы), общим проективным покрытием травостоя и его доминирующих ассоциаций. Проведенные исследования актуальны и направлены на оценку эффективности лесомелиоративных мероприятий на песчаных землях в сухостепной зоне. При выполнении работы были использованы как наземные (почвенные и геоботанические), так и дистанционные (агролесомелиоративное картографирование) методы исследования. В результате проведенного анализа растительного и напочвенного покровов установлено, что лесные насаждения, несмотря на вековой возраст, не способствовали формированию на поверхности песчаных почв как подстилочных, так и гумусовых горизонтов. Однако на большей части территории дефляционные процессы ослабли. В результате создания массивных насаждений и формирования травяного покрова пески закрепились. Установлена взаимосвязь между составом древостоя, общим проективным покрытием, а также доминирующей травянистой ассоциацией и мощностью гумусовых и подстилочных горизонтов в хвойных насаждениях. При смешении с лиственными породами и поступлении опада происходит увеличение изучаемых слоев. На пространственную неоднородность показателей для всех изучаемых участков влияет прежде всего низкая скорость разложения опада, а также внутреннее переотложение органогенных и гумусовых горизонтов под действием ветра.

Ключевые слова: лесная подстилка, слаборазвитые почвы, общее проективное покрытие, травостой, изолинейное картографирование

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.10

ВВЕДЕНИЕ

Лесная подстилка выполняет ряд важнейших функций, таких как источник пополнения элементов минерального питания в почве; среда обитания многочисленных представителей почвенной фауны [Потапова, Пятина, 2021]; хранилище семян лесообразующих пород; депо углерода и одновременно база его эмиссии [Gosz et al., 1976]; базис первичного почвообразования; защитный покров для минеральной почвы (защита от эрозии); влагозащитный напочвенный слой; аккумулятор влаги; корнезащитный и корнеобитаемый субстрат возобновления растительности [Иванова, 2021].

Лесная подстилка играет огромную роль в формировании почв, в особенности ее верхних слоев, влияя на ход почвообразовательного процесса и биологический круговорот веществ. Она рассма-

тривается как верхний органогенный опадочно-подстилочный слой. Развитие поверхностных горизонтов почв в лесных биогеоценозах зависит от особенностей поступления опада, его количества, характера, скорости разложения, специфичности процесса гумификации [Иванова, 2021; Berg, 2014]. Поэтому особую актуальность имеет изучение применения лесомелиоративных мероприятий на низкопродуктивных землях, включая ареалы легких слаборазвитых почв и открытых песков, с целью предотвращения деградационных процессов, повышения устойчивости ландшафтов, создания экологического каркаса и дальнейшего ограниченного лесохозяйственного использования этих земель [Кулик и др., 2023; Манаенков, 2018].

Обширные исследования песков и песчаных почв степной зоны в XX в., а также процессов почвоо-

бразования под воздействием степной растительности, изучение влияния типа смещения древесных пород и формирующейся лесной подстилки на рост главных пород в смешанных насаждениях принадлежат А.Г. Гаелю [Гаель, Смирнова, 1999]. На количество образования лесной подстилки влияют условия местопроизрастания древесной растительности (часть склона, экспозиция [Аткина, Аткин, 2000; Pavlova-Traykova, 2024], тип почвенного покрова), возраст и породный состав [Китредж, 1951; Liu et al., 2023a, 2023b], скорость разложения опада, мозаичность развития растительности [Демаков и др., 2018]. Дж. Китредж (1951) отмечает, что годовичное накопление подстилки возрастает до возраста «равновесия между накоплением и разложением», зависящего от породного состава. Ф.Н. Лисецким (2008) на нижнеднепровских песках установлено, что в 20–25-летних насаждениях сосны мощность подстилки составляет 4 см, а в зрелом возрасте увеличивается до 8 см. На песчаных почвах заповедника «Большая Кокшага» (Марий Эл) в лиственных насаждениях она достигает своих максимальных значений в 80 лет, а в сосновых – в 40–50 [Демаков и др., 2018]. Далее ее значения остаются практически на одном уровне.

В степных условиях на песчаных почвах разложение опада ограничивается сухостью климата и снижением активности жизнедеятельности почвенных микроорганизмов и животных [Основы..., 1964; Соловьев, 1967], поэтому здесь, особенно под сосновыми насаждениями, формируются деструктивные лесные подстилки с недифференцированным профилем [Богатырев, 1996]. Процесс разложения опада происходит медленно: в молодых сосняках на песчаных почвах (Обливский район Ростовской области) 7,7% в год, на нижнеднепровских песках за 1,5 года его масса сокращается на 10–12% [Басов, 1979]. Тормозит разложение хвои также низкая зольность и высокое содержание в ней лигнина, а также активное вымывание азота [Богатырев, 1996]. Исследованиями Г.И. Ушаковой (2000) установлено, что увеличение влажности сосновой подстилки почти не оказывает влияние на скорость ее минерализации. Почвообразовательный процесс под лесонасаждениями имеет «сезонно-затухающее выражение», особенно в периоды засух [Основы..., 1964], поэтому под насаждениями сосны формирование гумусового горизонта в лесостепной зоне происходит в 2,2 раза быстрее, чем в степной [Лисецкий, 2008]. В условиях Борской низменности (Словакия) в 25-летних насаждениях сосны на песчаных почвах под лесной подстилкой сформировался гумусированный слой толщиной менее сантиметра [Lichner et al., 2010].

Объект исследования. В конце XIX в. территория близ г. Камышина представляла собой безлесную местность, на которую с запада надвигались массивы подвижных песков, наносящих большой вред земельным угодьям. В 1892 г. Я.А. Ломоносов положил здесь начало закреплению песков путем посадки полыни обыкновенной, овса песчаного и ивы остролистной. Опыт оказался успешным. В последующем на этой территории после организации в 1903 г. казенного древесного питомника за 13 лет было создано 75 га сосновых насаждений. При закреплении прилегающих оврагов использовали дуб, вяз, клен, акацию, а также кустарники – лох, аморфу, смородину и др. [Семенютина и др., 2022].

За прошедший период, более 100 лет, территория созданного лесного массива подверглась ряду неблагоприятных природных (засуха, суховеи, пыльные бури) и антропогенных (пожары) воздействий. Но несмотря ни на что к настоящему времени здесь сформировался уникальный лесокультурный ландшафт.

Исследуемый участок расположен на территории Нижневолжской станции селекции древесных пород – филиала ФНЦ агроэкологии РАН (г. Камышин, Волгоградская область) в сухостепной зоне на Приволжской возвышенности. Его территория площадью 110 га представлена водосборами суходола Кирпичный, притока р. Камышинки, и суходола Беленький, впадающего в р. Волгу (рис. 1А). Высота местности варьирует от 140 до 80 м над уровнем моря. Абсолютная высота местного базиса эрозии составляет 60 м.

Рельеф представлен в основном слабополугими, пологими и слабопокатыми склонами крутизной 1–2°, на долю которых приходится 72% территории, с наклоном 3° – 24%, 4° – 1%, менее 1° – 2% (см. рис. 1Б). Общая экспозиция поверхности территории исследования – северо-восточная. Локальными особенностями рельефа являются бугры высотой более 2 м, чередующиеся понижениями.

Почвообразующими породами для каштановых почв выступают четвертичные карбонатные лессовидные суглинки, для псаммоземов – эоценовые пески [Почвообразующие породы..., 2024].

Почвенный покров представлен псаммоземом гумусовым золово-стратифицированным на погребенных агротемно-каштановых почвах. В условиях рассматриваемой территории на основании маршрутно-полевых обследований выделены следующие гумусовые горизонты: А, А₁ и W. Песчаные и супесчаные горизонты А характерны для гумусовых почв (А–С). В нижней части склона небольшими участками выделены каштановые почвы с поверхностными горизонтами А₁, отличающимися от А появлением комковатой структуры, а также более тяжелым (легкий суглинок) гранулометрическим составом. Под

хвойной растительностью и на заросших песках выделены протогумусовые горизонты W, характеризующиеся малой мощностью (до 10 см), серой окраской и слабой агрегированностью. Почвы легкого грансостава характеризуются слабой противодефляционной устойчивостью [Манаенков, 2014].

Территория расположена в атлантико-континентальной европейской (степной) климатической области умеренного пояса [Рельеф..., 2024]. По данным справочно-информационного сервиса «Погода и климат» [Погода и климат..., 2024]

среднегодовая температура воздуха за период 1954–2023 гг. составила $+7,3^{\circ}\text{C}$. В самый жаркий месяц (июль) ее среднемесячное значение достигает $+23,3^{\circ}\text{C}$, в самый холодный (январь) $-8,6^{\circ}\text{C}$. Среднегодовая сумма атмосферных осадков за период 1959–2023 гг. колебалась в пределах от 191 до 595 мм, составляя в среднем 381 мм. Территория входит в зону недостаточного увлажнения, с холодной зимой и жарким сухим летом. Значение гидротермического коэффициента Селянинова составляет 0,6 [Сажин и др., 2017].

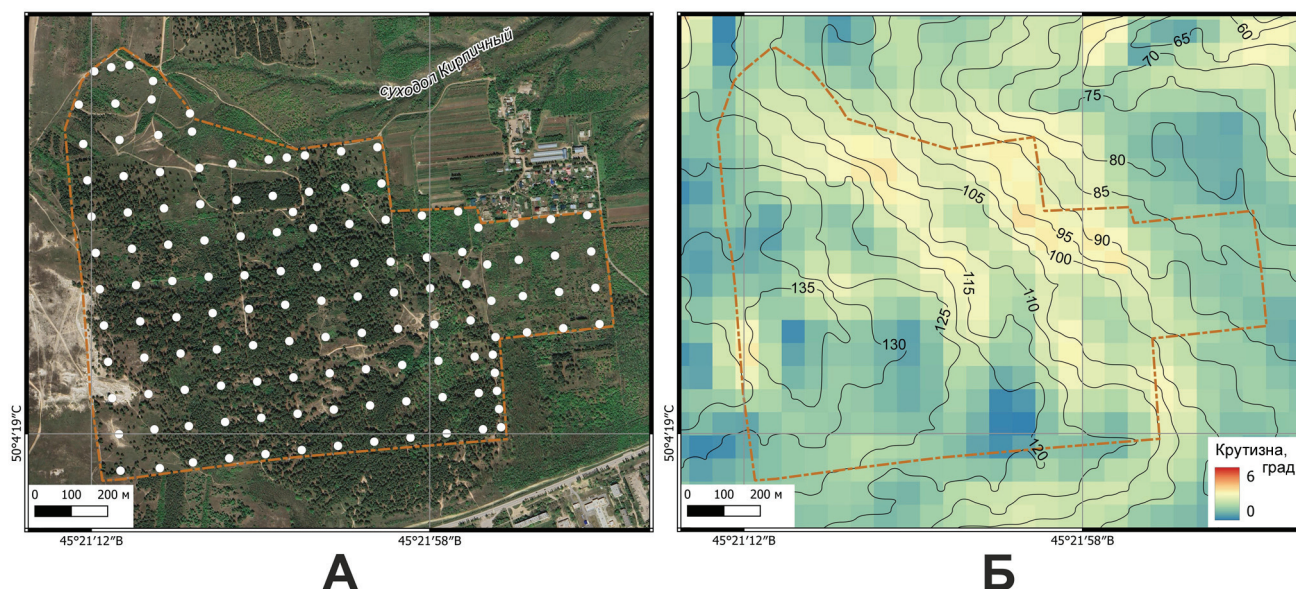


Рис. 1. Территория исследования с указанием точек мониторинга (А) и карта крутизны склонов (Б)

Fig. 1. Study area with monitoring points (A) and slope steepness map (B)

Объект исследования находится в зоне с активным ветровым режимом. Среднегодовое число дней с пыльными бурями – 90, со средней продолжительностью 16,4 ч. Основное их количество приходится на период с конца весны до конца лета, преобладавая в июле–августе. Пыльные бури наблюдаются разной продолжительности: менее 0,5 ч – 40%, от 0,5 до 1,5 ч – 28%, от 1,6 до 3,0 ч – 15%, свыше 3,0 ч – 17%. Преобладают бури со скоростью ветра от 8 до 10 м/с, составляя 27% от общего их числа. Доля их со скоростью от 1–4, 5–7, 11–13 до 14–16 м/с по 17%. При этом перенос песчаных частиц начинается уже с 6 м/с. Для условий Камышина преобладающим направлением ветра во время пыльных бурь является северо-восточное (15%, по розе ветров 16 румбов) [Сажин и др., 2017]. Направление и характер господствующих ветров способствовали движению песков в сторону города, что стимулировало развитие лесомелиоративных мероприятий.

Цель исследования – выявить особенности пространственного распределения мощности подстилки и гумусовых горизонтов в искусственных массивных лесомелиоративных насаждениях на слаборазвитых почвах в сухостепной зоне.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения пространственного распределения мощности подстилки на камеральном этапе всю площадь полигона покрыли регулярной сеткой с размером ячеек 100×100 м, в узлах которой проводили наблюдения. При необходимости в полевых условиях добавляли дополнительные точки для корректировки данных. В июне 2023 г. всего было обследовано 130 точек (см. рис. 1). Измерение мощности горизонтов подстилки проводились с применением классификации А. Занелла с соавторами, согласно которой она подразделяется на подгоризонты: OL, OF, OH, где OL – опад, представляющий собой листья, хвою, ветви, древесный материал, который

может быть обесцвечен и слегка фрагментирован (целостность фрагментов 10–100%); OF – полуразложившийся опад, без целостности анатомического строения (за исключением веток и коры), со следами микоризы; OH – опад, состоящий из зоогенно преобразованного органического вещества [Zanella et al., 2018]. В условиях сухой степи, где расположен объект исследования, горизонты OF и OH очень небольшой мощности, не всегда выделяются из-за нечеткой границы между ними, поэтому отдельно их не дифференцировали, а измеряли вместе – OFH [Методические рекомендации..., 2023] (рис. 2).



Рис. 2. Типы подгоризонтов постилки на изучаемой территории

Fig. 2. Types of litter subhorizons in the study area

Общее проективное покрытие (ОПП) определялось глазомерно посредством оценки вертикальной проекции травянистых растений на поверхность почвы, выраженной в процентах [Ермолова, 2022]. Изучение почвенного покрова выполнялось по стандартным в почвоведении российским и иностранным методикам [Полевой..., 2008; Guidelines..., 2006].

Наиболее распространенные методики спутникового картографирования растительного покрова основаны на использовании мультиспектральных снимков спутников Landsat, Sentinel, MODIS и др. с использованием вегетационных индексов NDVI, RVI, PVI, EVI и пр. [Барталев и др., 2016; Бодрова В.Н., 2018; Дмитриев и др., 2024; Денисова и др., 2019; Книжников Ю.Ф. и др., 2004; Чурюлина А.Г., Бочарников М.В., 2022; Шинкаренко и др., 2022]. Данный подход широко и успешно используется для глобальных и региональных исследований, но имеет существенные ограничения при использовании на локальном уровне, где требуется высокая точность и детальность, вплоть до выделения отдельных крон деревьев. Главным ограничением выступает разрешение мультиспектрального спутникового снимка. Наиболее детальными являются снимки Sentinel-2 с разрешением 10×10 м. Однако степень детализации спектральных космоснимков недостаточна для проведения крупномасштабного картографирования растительного покрова, где необходимо выделение небольших куртин и отдельно стоящих деревьев.

Пространственное распределение растительного покрова изучено по пятиэтапной схеме агролесомелиоративного картографирования [Кулик, 2004] на основе дешифрирования спутниковых снимков, имеющих высокое пространственное разрешение (0,5–1,5 м), полученных при помощи сервиса Google Earth. Полуавтоматическая классификация изображения осуществлена на основе разницы цвета (RGB) пикселей по фотоэталонам с использованием алгоритма Random Forest [Барталев и др., 2016; Малышева, 2014; Юфеев и др., 2010]. Работа выполнена в программе QGIS с использованием модуля dzeros. Участки, используемые в качестве фотоэталонов для проведения дешифрирования, были выделены во время полевых исследований (рис. 3).

Для выделения хвойных древостоев использован ранневесенний снимок (март 2023 г.), на котором отсутствовали кроны лиственных древесных пород, что упростило процесс распознавания. Для классификации остальной растительности был взят летний снимок (июнь 2023 г.). После дешифрирования была проведена ручная визуальная коррекция полученных результатов.

На основе данных, полученных по результатам полевых исследований, построены карты с использованием метода интерполяции кригинг. Работа по обработке и анализу геоданных осуществлялась в программах QGIS и SAGAGIS. Построение карт рельефа и крутизны склонов проведено с использованием снимка SRTM 1 с разрешением 30×30 м. Статистический анализ результатов исследований осуществлен в программе XLstat.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Растительный покров исследуемого участка представлен естественной степной растительностью и искусственными древесными насаждениями. Травяной покров представлен характерными для степной зоны злаковыми, полынными и разнотравными ассоциациями и их сочетанием. Хвойные насаждения состоят из сосны, лиственные представлены преимущественно робинией, вязом и дубом с незначительным участием ясеня, клена, тополя, липы и шелковицы. Также встречаются участки открытых песков, на которых растительный покров отсутствует (рис. 4).

Анализ пространственного распределения растительного покрова выявил следующие особенности: 72,7 га покрыто древесными насаждениями (65,9%), из которых на хвойные породы приходится 36,1 га (32,7%), на лиственные – 36,6 га (33,2%), степными участками (без древесной растительности) занято 34,8 га (31,6%), открытыми песками – 2,8 га (2,5%).

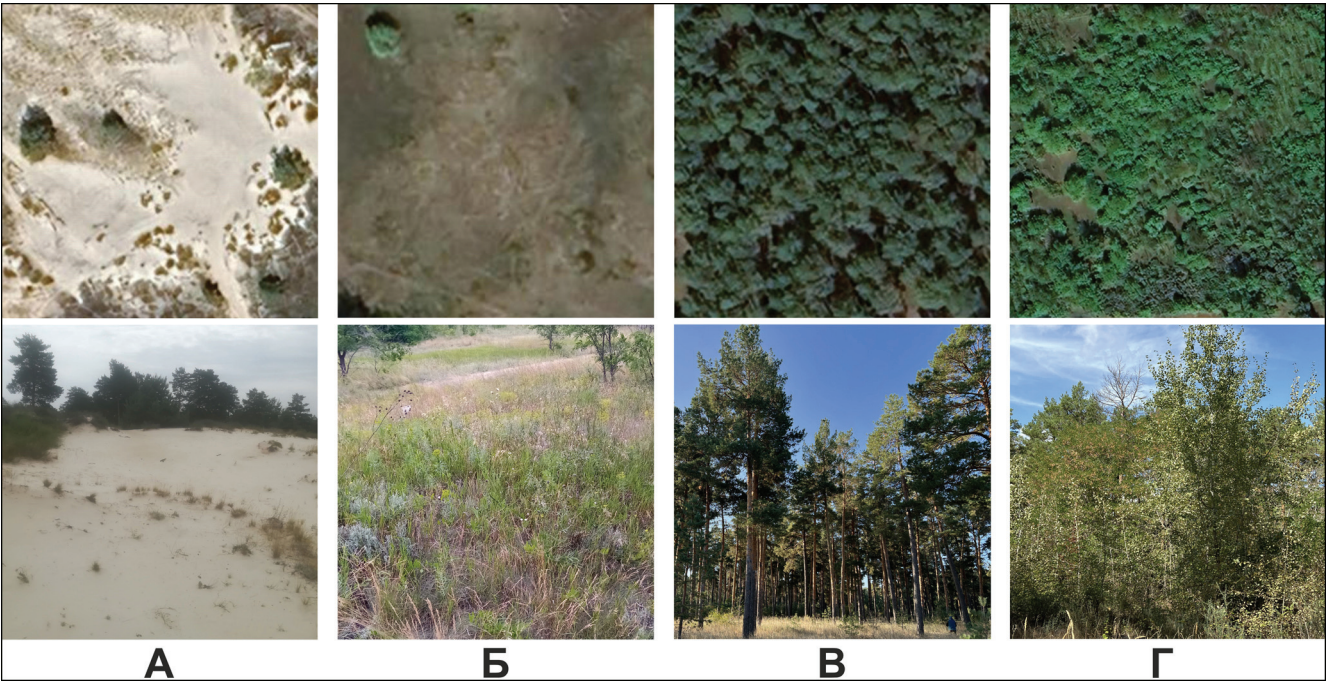


Рис. 3. Фотоэталоны для дешифрирования:
А – открытый песок; Б – степь; В – хвойные насаждения; Г – лиственные насаждения

Fig. 3. Photo standards for interpretation:
A – open sand; Б – steppe; В – coniferous forests; Г – deciduous forests

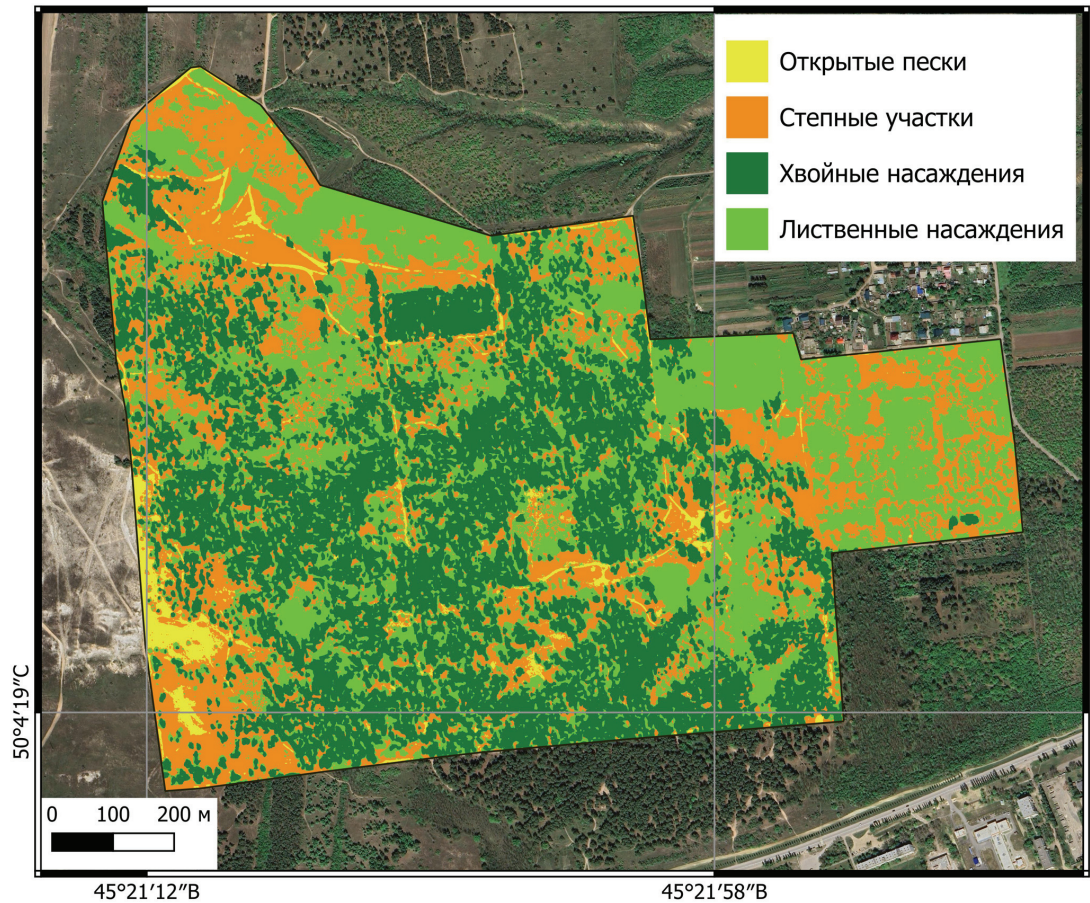


Рис. 4. Типы растительного покрова изучаемой территории

Fig. 4. Types of vegetation in the study area

В результате проведения полевых исследований установлено, что мощность подстилки под хвойными насаждениями в среднем составляет $3,0 \pm 0,2$ см (рис. 5Б), что коррелирует с результатами наблюдений в условиях Марийского Заволжья [Демаков и др., 2018], где при более влажном климате (538 мм осадков в год) данный показатель в среднем составляет $3,7 \pm 0,3$ см. При этом толщина горизонтов подстилки OL и OFH изменяется от 1 до 4 см. Мощность гумусовых горизонтов под насаждениями с хвойными породами не превышает 11 см (в среднем $3 \pm 0,3$ см) (см. рис. 5А). Связано это с генезисом горизонтов. Ранее эта территория представляла собой песчаный массив, на котором отсутствовали какие-либо почвы. После облесения пески частично закрепились, а дальнейшая аккумуляция опада способствовала формированию

протогумусовых горизонтов начальной стадии почвообразования (W). Меньшая скорость разложения опада хвои, в сравнении с листвой [Семенов и др., 2019], и специфика сформировавшегося травяного покрова также тормозят процесс гумусообразования. Общее проективное покрытие (ОПП) в монокультурах сосны изменялось в широком диапазоне (табл. 1), составляя в среднем $51 \pm 5\%$. Установлено, что при преобладании в травостое доли полынных видов увеличивалось не только ОПП, но и мощность гумусового горизонта. Под смешанными хвойно-лиственными насаждениями травяной покров представлен в основном злаками. ОПП в среднем незначительно выше – $61 \pm 9\%$. Мощность гумусового горизонта в среднем составляет $5 \pm 0,8$ см, что почти на 2 см больше, чем под хвойными насаждениями.

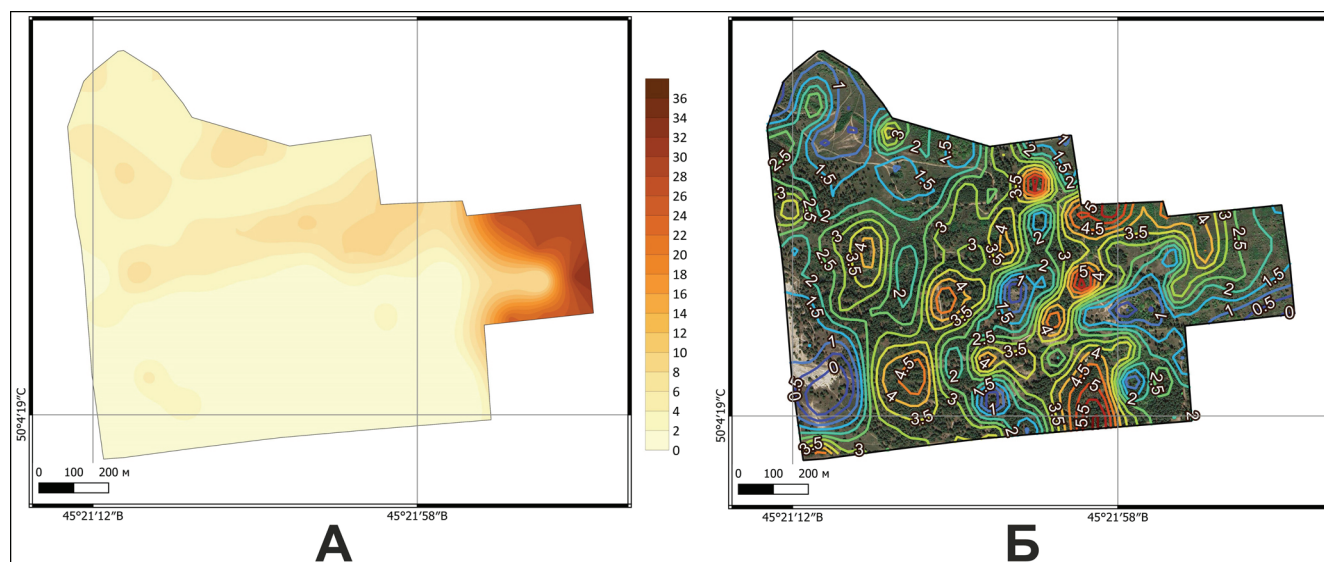


Рис. 5. Пространственное распределение мощности гумусового горизонта (А) и подстилки (Б), см

Fig. 5. Spatial distribution of the depth of humus horizon (A) and litter (B), cm

При наземном наблюдении в хвойных насаждениях отмечены процессы переотложения опада и почвенного материала, поэтому близко располагались участки с разной мощностью гумусового горизонта или с полным его отсутствием. Частично переносу органического и минерального материала препятствует травянистая растительность, но неравномерная степень покрытия ею поверхности влияет на перераспределение растительных остатков внутри массива. Отмечено, что мощность гумусовых горизонтов на участках с проективным покрытием более 75% значительно выше (в среднем 7 см), чем на открытых (в среднем 2 см).

В лиственных насаждениях слой, состоящий из свежего и прошлогоднего листового опада (OL), не

превышал 5 см (в среднем $2 \pm 0,2$ см) (табл. 2) и был представлен ветвями, свежими и полуразложившимися листьями. Установлено, что на участках с малой густотой древостоя мощность как OL, так и OFH минимальна (<1 см). Мощность гумусовых горизонтов сильно варьировала ($C_v - 84\%$), составляя в среднем 14 ± 2 см. Максимальные ее значения (25–30 см) приурочены к нижней части склона, где преобладают зональные темно-каштановые почвы. В отличие от участков, занятых хвойными насаждениями, лиственные произрастают в том числе на зональных темно-каштановых и каштановых почвах. В целом мощность гумусовых горизонтов (AJ и A) соответствует фоновым значениям [Кулик и др., 2017]. ОПП в лиственных насаждениях изме-

нялось в основном в диапазоне 50–95%. Проведя статистический анализ полученных данных, нами не было установлено взаимосвязи величины подстилки и преобладающих ассоциаций травянистых растений с мощностью гумусовых горизонтов. Это обусловлено тем, что на данном участке лиственные насаждения представлены не монокультурой, а разными породами, скорость разложения опада которых различна [Семенов, 2019; Фисун, 2014; Nevel van et al., 2014].

Таблица 1

Статистический анализ данных напочвенного покрова и гумусовых горизонтов хвойных и хвойно-лиственных насаждений

Показатели	Минимум	Q_1	Медиана	Q_3	Максимум	Среднее арифметическое	Среднеквадратическое отклонение	Коэффициент вариации, C_v
<i>Хвойные насаждения (n = 62)</i>								
Общее проективное покрытие, %	1	15	50	90	100	51	5	0,7
Общая мощность подстилки, см	0	2	3	4	6	3	0,2	0,5
Мощность OL, см	0	1	1	2	4	1	0,1	0,6
Мощность OFH, см	0	1	1	2	4	1	0,1	0,8
Мощность гумусовых горизонтов, см	0	1	3	5	11	3	0,3	0,8
<i>Хвойно-лиственные насаждения (n = 15)</i>								
Общее проективное покрытие, %	2	40	80	80	100	61	9	0,6
Общая мощность подстилки, см	0	2	3	4	4	2	0,3	0,5
Мощность OL, см	0	1	1	2	4	1	0,1	0,6
Мощность OFH, см	0	1	1	2	3	1	0,2	0,8
Мощность гумусовых горизонтов, см	0	2	5	7	10	5	0,8	0,6

Примечание: Q_1 и Q_3 – значения квартилей.

Таблица 2

Статистический анализ данных напочвенного покрова и гумусовых горизонтов лиственных насаждений (n = 27)

Показатели	Минимум	Q_1	Медиана	Q_3	Максимум	Среднее арифметическое	Среднеквадратическое отклонение	Коэффициент вариации, C_v
Общее проективное покрытие, %	0	50	90	95	100	71	6	0,4
Общая мощность подстилки, см	1	2	3	4	6	3	0,3	0,5
Мощность OL, см	1	1	1	2	5	2	0,2	0,8
Мощность OFH, см	0	1	1	2	3	1	0,2	0,8
Мощность гумусовых горизонтов, см	0	4	9	30	35	14	2	0,8

Примечание: Q_1 и Q_3 – значения квартилей.

Таблица 3

Статистический анализ данных напочвенного покрова и гумусовых горизонтов степных участков ($n = 26$)

Показатели	Минимум	Q_1	Медиана	Q_3	Максимум	Среднее арифметическое	Среднеквадратическое отклонение	Коэффициент вариации, C_v
Общее проективное покрытие, %	10	50	90	95	100	74	6	41
Мощность горизонта степного войлока, см	0	1	2	4	10	3	1	89
Мощность гумусовых горизонтов, см	0	3	5	9	30	8	2	109

К степным участкам отнесены территории, лишенные древесной растительности, с развитым в разной степени травянистым покровом. По видовому составу преобладают злаковые (38%), злаково-разнотравные (23%) и полынно-злаковые (19%) ассоциации. С поверхности мощностью до 10 см (в среднем 3 ± 1 см) фиксируется слой степного войлока, представленный мертвым напочвенным покровом, состоящим из отмерших, слежавшихся, но еще не полностью разложившихся остатков травянистой растительности. Ниже расположен слой дернины (скопление густо переплетенных корней трав), не превышающий 3–4 см. Мощность гумусовых горизонтов изменялась от 0 до 30 см (в среднем 8 ± 2 см) (табл. 3). Сильное варьирование обусловлено положением точки наблюдений относительно микрорельефа и от степени проективного покрытия, изменяющегося от 10 до 100% (в среднем $74 \pm 6\%$). Средняя мощность гумусовых горизонтов под злаковыми ассоциациями составила 13 ± 3 см, полынными – 6 ± 1 см, злаково-разнотравными – 3 ± 1 см.

ВЫВОДЫ

Полученные результаты согласуются с исследованиями Н.Г. Ремезова и П.С. Погребняка (1965), Л.Г. Богатырева и др. (2019), Ю.П. Демакова и др. (2018), которые отмечают большую мозаичность подстилки в хвойных и хвойно-лиственных лесах. В пределах исследуемой территории неравномерное распределение подстилки обусловлено низким ОПП, за счет чего происходит поверхностный перенос растительных остатков и минеральных частиц почвы.

При анализе данных наземного и дистанционного мониторинга растительного и напочвенного покровов установлено, что за 100-летний период лесомелиоративного освоения территории полно-развитый слой подстилки и гумусовые горизонты не сформировались в отличие от исследований, проведенных на нижнеднепровских песках и в условиях Марийского Заволжья, где отмечено увеличение мощности лесной подстилки с возрастом насаждений.

В хвойных насаждениях формируются деструктивные лесные подстилки с недифференцированным профилем по [Богатырев, 1996], что обусловлено низкой скоростью разложения хвои, редким травяным покровом, активными дефляционными процессами в периферийной зоне массива, не способствующими накоплению опада.

В хвойных насаждениях сформировались протогумусовые горизонты начальной стадии почвообразования. При смешении с лиственными породами отмечено незначительное увеличение мощности гумусовых горизонтов за счет включения в опад кроме хвои еще и листья.

В лиственных насаждениях увеличение мощности гумусового горизонта и подстилки отмечено в нижней части склона на зональных темно-каштановых почвах. При этом ОПП на данных участках выше, чем в хвойных насаждениях. На степных участках мощность гумусового горизонта колебалась в широком диапазоне, что обусловлено положением точки наблюдений относительно микрорельефа и степени ОПП растительным покровом.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке ВИП ГЗ «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджета углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аткина Л.И., Аткин А.С. Особенности накопления подстилок в лесных сообществах // Почвоведение. 2000. № 8. С. 1004–1008.
- Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О. и др. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
- Басов В.Г. Особенности биокруговорота органического вещества и основных элементов питания в сосновых молодняках // Бюллетень Всесоюзного научно-исследовательского института агролесомелиорации. 1979. Вып. 2(30). С. 21–25.
- Богатырев Л.Г., Демаков Ю.П., Исаев А.В. и др. Структурно-функциональная организация подстилок в борах Марийского Заволжья // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2019. № 1. С. 3–9.
- Богатырев Л.Г. Образование подстилок – один из важнейших процессов в лесных экосистемах // Почвоведение. 1996. № 4. С. 501–511.
- Бодрова В.Н. Картографирование лесистости острова Сарпинский Волгоградской области // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2018. № 3. С. 47–54.
- Гаель А.Г., Смирнова Л.Ф. Пески и песчаные почвы. М.: ГЕОС, 1999. 252 с.
- Демаков Ю.П., Исаев А.В., Шарафутдинов Р.Н. Роль лесной подстилки в борах Марийского Заволжья и вариативность ее параметров // Научные труды Государственного природного заповедника «Большая Кокшага». 2018. Вып. 8. С. 15–43.
- Денисова А.Ю., Кавеленова Л.М., Корчиков Е.С. и др. Пространственная классификация преобладающих древесных пород на территории Самарской области по данным Sentinel-2 и таксации леса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 86–101. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-86-101.
- Дмитриев Е.В., Кондранин Т.В., Мельник П.Г. и др. Определение видового состава смешанного леса на основе совместной обработки публичных спутниковых карт и многовременных изображений Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 1. С. 31–50. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-31-50.
- Ермолова Л.С. Подходы к определению фитомассы напочвенного покрова в лесу (обзор методов) // Растительные ресурсы. 2022. Т. 58. Вып. 2. С. 197–216. DOI: 10.31857/S0033994622020054.
- Иванова Е.А. Формирование и разложение древесного опада в лесных экосистемах в фоновых условиях и при антропогенном загрязнении // Вопросы лесной науки. 2021. Т. 4. № 3. С. 1–52. DOI: 10.31509/2658-607x-202143-87.
- Китредж Дж. Влияние леса на климат, почвы и водный режим. М.: Изд-во иностранной литературы, 1951. 456 с.
- Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. Аэрокосмические методы географических исследований: учеб. для студ. высш. учеб. заведений. М.: Академия, 2004. 336 с.
- Кулик К.Н. Агролесомелиоративное картографирование и фито-экологическая оценка аридных ландшафтов. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2004. 247 с.
- Кулик К.Н., Беляев А.И., Пугачева А.М. Роль защитного лесоразведения в борьбе с засухой и опустыниванием агроландшафтов // Аридные экосистемы. 2023. Т. 29. № 1(94). С. 4–14. DOI: 10.24412/1993-3916-2023-1-4-14.
- Кулик К.Н., Кретьинин В.М., Рулев А.С. и др. Красная книга почв Волгоградской области. Волгоград: Принт-2, 2017. 224 с.
- Лисецкий Ф.Н. Почвообразовательный потенциал лесных насаждений при облесении песков в условиях лесостепи и степи // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2008. № 4. С. 13–20.
- Мальшева Н.В. Дешифрирование древесной растительности на сверхдетальных изображениях: метод. пособие для подготовки специалистов высшего проф. образования. М.: Леспроект, 2014. 40 с.
- Манаенков А.С. Лесомелиорация арен засушливой зоны. 2-е изд. перераб. и доп. Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН, 2018. 428 с.
- Манаенков А.С. Перспектива повышения эффективности использования низкопродуктивных сельскохозяйственных земель на юге России // Региональная экономика. Юг России. 2014. № 2(4). С. 64–72.
- Основы лесной биогеоэкологии / под ред. В.Н. Сукачева, Н.В. Дылиса. М.: Наука, 1964. 570 с.
- Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
- Потапова К.В., Пятинина Е.В. Почвенные беспозвоночные-сапрофаги Лисинского учебно-опытного лесхоза. Тезисы докладов VIII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Школы молодых ученых по морфологии и классификации почв «Почвы – стратегический ресурс России» (Сыктывкар, 2021). 2021. С. 334–335.
- Ремезов Н.Г., Погребняк П.С. Лесное почвоведение. М.: Лесная промышленность, 1965. 322 с.
- Сажин А.Н., Кулик К.Н., Васильев Ю.И. Погода и климат Волгоградской области. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2017. 334 с.
- Семенов В.М., Паутова Н.Б., Лебедева Т. Н. и др. Разложение растительных остатков и формирование активного органического вещества в почве инкубационных экспериментов // Почвоведение. 2019. № 10. С. 1172–1184. DOI: 10.1134/S0032180X19100113.
- Семенютина А.В., Хужахметова А.Ш., Семенютина В.А. и др. Научные основы и этапы формирования полифункциональных кластерных дендрологических экспозиций коллекций ФНЦ агроэкологии РАН. Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН, 2022. 192 с.
- Соловьев П.Е. Влияние лесных насаждений на почвообразовательный процесс и плодородие степных почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1967. 292 с.
- Ушакова Г.И. Влияние экологических условий на скорость и характер разложения лесной подстилки (Кольский полуостров) // Почвоведение. 2000. № 8. С. 1009–1015.
- Фисун М.Н., Чемазов М.М., Егорова Е.М. и др. Разложение листового опада древесных и кустарниковых пород // Известия КБГАУ. 2014. № 3(5). С. 18–20.
- Чурюлина А.Г., Бочарников М.В. Картографирование растительных сообществ с участием реликтового вида караганы гривастой в Южном Прибайкалье // Вестн.

- Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2022. № 6. С. 149-156. DOI: 10.55959/MSU0579-9414-5-2022-6-149-156.
- Шинкаренко С.С., Барталев С.А., Васильченко А.А. Метод картографирования защитных лесных насаждений на основе разновременных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения и бисезонного индекса леса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 207–222. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-207-222.
- Юферева В.Г., Кулик К.Н., Рулев А.С. и др. Геоинформационные технологии в агролесомелиорации. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2010. 102 с.
- Berg B. Decomposition patterns for foliar litter – A theory for influencing factors, *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, vol. 78, p. 222–232, DOI: 10.1016/j.soilbio.2014.08.005.
- Gosz J.R., Likens G.E., Bormann F.H. Organic matter and nutrient dynamics of the forest and forest floor in the Hubbard Brook forest, *Oecologia*, 1976, vol. 22, p. 305–320, DOI: 10.1007/BF00345310.
- Guidelines for Soil Description*, Rome, UN Food Agric. Org., 2006, 108 p.
- Lichner L., Hallett P.D., Orfánus T. et al. Vegetation impact on the hydrology of an aeolian sandy soil in a continental climate, *Ecohydrology*, 2010, no. 3(4), p. 413–420, DOI: 10.1002/eco.153.
- Liu F., Zhu K., Wang Zh. et al. Production of reactive oxygen species and its role in mediating the abiotic transformation of organic carbon in sandy soil under vegetation restoration, *Carbon Research*, 2023b, no. 2(35), DOI: 10.1007/s44246-023-00074-0.
- Liu J., Wang J., Morreale S.J. et al. Contributions of plant litter to soil microbial activity improvement and soil nutrient enhancement along with herb and shrub colonization expansions in an arid sandy land, *Catena*, 2023a, vol. 227, DOI: 10.1016/j.catena.2023.107098.
- Nevel van L., Mertens J., Demey A. et al. Metal and nutrient dynamics in decomposing tree litter on a metal contaminated site, *Environmental Pollution*, 2014, vol. 189, p. 54–62, DOI: 10.1016/j.envpol.2014.02.009.
- Pavlova-Traykova E. Influence of erosion control afforestation on some soil parameters in two watersheds in Southwest Bulgaria, *Silva Balcanica*, 2024, no. 25(2), p. 75–83, DOI: 10.3897/silvabalcanica.25.e125509.
- Zanella A., Ponge J.-F., Jabiol B. et al. Humusica 1, article 4, Terrestrial humus systems and forms – Specific terms and diagnostic horizons, *Applied Soil Ecology*, 2018, no. 122, p. 56–74, DOI: 10.1016/j.apsoil.2017.07.005.
- Электронные ресурсы**
- Методические рекомендации по отбору образцов почв и растений для оценки динамики запасов углерода в лесных, степных и тундровых экосистемах. URL: https://ritm-c.ru/account/personal/methods_2023 (дата обращения 02.06.2023).
- Климат. Климатическое районирование // Национальный атлас России. Т. 2. URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/146-150.html> (дата обращения 12.03.2024).
- Рельеф. Гипсометрическая карта // Национальный атлас России. Т. 2. URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/112-113.html> (дата обращения 05.03.2024).
- Погода и климат. Камышин. Летопись погоды в Камышине. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/34363.html> (дата обращения 12.03.2024).
- Почвообразующие породы. URL: <https://webmapget.vsegei.ru> (дата обращения 10.03.2024).

Поступила в редакцию 24.06.2024

После доработки 10.09.2024

Принята к публикации 15.10.2024

SPATIAL DISTRIBUTION PATTERNS OF THE DEPTH OF SOIL ORGANOGENIC AND HUMUS HORIZONS IN FORESTED LANDSCAPES OF THE DRY-STEPPE ZONE

M.R. Shayfullin¹, O.A. Gordienko², A.V. Kulik³

¹⁻³ Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Soil Protection from Erosion

¹ Junior Scientific Researcher; e-mail: shayfullin-mr@vfanc.ru

² Junior Scientific Researcher; e-mail: gordienko-o@vfanc.ru

³ Senior Scientific Researcher; Ph.D. in Agriculture; e-mail: kulik-a@vfanc.ru

The paper considers the features of the spatial distribution of litter layers and humus horizons of soils in a forested area. The object of the study was the forest-cultural landscapes on low-productive sandy lands created in the early twentieth century to protect against deflation. The territory is located in the Kamyslin district of the Volgograd region (cadastral quarter No 34:36:000014). The purpose of the research was to determine the distribution of the depth of organogenic layers and humus horizons in relation to the species composition of plantations (coniferous or deciduous species), the total projective cover of the herbage and its dominant associations. The research is topical and aimed at evaluating the effectiveness of forest reclamation measures on sandy lands in the dry-steppe zone. Both terrestrial (soil and geobotanical) and remote (agroforestry mapping) research methods were applied while carrying out the work. As a result of the analysis of vegetation and ground

cover, it was found that despite their centenary age, forest plantations did not contribute to the formation of both litter and humus horizons on the surface of sandy soils. However, the deflation became weaker across much of the territory. The sands were stabilized due to creation of massive plantings and the grass cover formation. The relationship between the composition of a stand, the total projective cover, the dominant herbaceous association and the depth of humus and litter horizons in coniferous plantations has been found. The depth of studied layers increases if hardwoods are admixed which produce leaf litter. The spatial heterogeneity of the indicators for all the studied sites is primarily influenced by the low rate of litter decomposition, as well as the internal re-deposition of organogenic and humus matter by the wind.

Keywords: forest litter, underdeveloped soils, general projective cover, grass stand, isolinear mapping

Acknowledgements. The work was carried out under a most important national innovation project “Development of a System of Ground-based and Remote Monitoring of Carbon Pools and Greenhouse Gas Fluxes on the Territory of the Russian Federation, Ensuring Creation of a System for Accounting for Data on Fluxes of Climatically Active Substances and the Carbon Budget in Forests and Other Terrestrial Ecological Systems” (registration No. 123030300031-6).

REFERENCES

- Atkina L.I., Atkin A.S. Specific Features of Litter Accumulation in Forest Cenoses, *Eurasian Soil Science*, 2000, vol. 33, no. 8, p. 876–880.
- Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O. et al. *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* [Satellite mapping of the vegetation cover of Russia], Moscow, IKI RAN Publ., 2016, 208 p. (In Russian)
- Basov V.G. Osobennosti biokrugovorota organicheskogo veshchestva i osnovnykh jelementov pitaniya v sosnovykh molodnjakah [Peculiarities of organic matter biocycle and basic nutrition elements in young pine forests], *Bulleten' Vsesojuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta agrosomelioracii*, 1979, vol. 2(30), p. 21–25. (In Russian)
- Berg B. Decomposition patterns for foliar litter – A theory for influencing factors, *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, vol. 78, p. 222–232, DOI: 10.1016/j.soilbio.2014.08.005.
- Bodrova V.N. Kartografirovanie lesistosti ostrova Sarpinskij Volgogradskoj oblasti [Mapping of forest coverage of the Sarpinsky island (Volgograd oblast)], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2018, no. 3, p. 47–54. (In Russian)
- Bogatyrev L.G. Formation of forest litter as one of the major processes in forest ecosystems, *Eurasian Soil Science*, 1996, vol. 29, no. 4, p. 459–468.
- Bogatyrev L.G., Demakov Yu.P., Isaev A.V. et al. Strukturno-funktsionalnaya organizatsiya podstilok v borakh Marijskogo Zavolzhiya [Structural and functional organization of litter in the forests of the Mari Zavolzhye], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 17, Pochvovedenie*, 2019, no. 1, p. 3–9. (In Russian)
- Churiulina A.G., Bocharnikov M.V. Kartografirovanie rastitel'nykh soobshchestv s uchastiem reliktovykh vida karagany grivastoj v Juzhnom Pribajkal'e [Mapping of plant communities with the relict *Caragana jubata* species in the southern Baikal region], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2022, no. 6, p. 149–156, DOI:10.55959/MSU0579-9414-5-2022-6-149-156. (In Russian)
- Demakov Yu.P., Isaev A.V., Sharafutdinov R.N. [Forest cover role in pine forests of Mari Trans-Volga region and variability of soil cover parameters], *Nauchnye trudy Gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika “Bol'shaja Kokshaga”* [Transactions of the “Bol'shaja Kokshaga” state nature reserve], 2018, vol. 8, p. 15–43. (In Russian)
- Denisova A.Yu., Kavelenova L.M., Korchikov E.S. et al. Prostranstvennaja klassifikacija preobladajushhih drevesnykh porod na territorii Samarskoj oblasti po dannym Sentinel-2 i taksacii lesa [Tree species classification in Samara Region using Sentinel-2 remote sensing images and forest inventory data], *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, vol. 16, no. 4, p. 86–101, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-86-101. (In Russian)
- Dmitriev E.V., Kondranin T.V., Mel'nik P.G., Donskoj S.A. Opredelenie vidovogo sostava smeshannogo lesa na osnove sovmestnoj obrabotki publicznykh sputnikovyx kart i mnogovremennykh izobrazhenij Sentinel-2 [Determining mixed forest species composition based on joint processing of public satellite maps and multi-temporal Sentinel-2 images], *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, vol. 21, no. 1, p. 31–50, DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-31-50. (In Russian)
- Ermolova L.S. Podhody k opredeleniju fitomassy napochvennogo pokrova v lesu (obzor metodov) [Approaches to the determination of forest ground cover phytomass (review of methods)], *Rastitel'nye resursy*, 2022, vol. 58, no. 2, p. 197–216, DOI: 10.31857/S0033994622020054. (In Russian)
- Fisun M.N., Chemazokov M.M., Egorova E.M. et al. Razlozhenie listovogo opada drevesnykh i kustarnikovyx porod [Decomposition of leaf litter of tree and shrub species], *Izvestiya KBGAU*, 2014, no. 3(5), p. 18–20. (In Russian)
- Gael A.G., Smirnova L.F. *Peski i peschanye pochvy* [Sands and Sandy Soils], Moscow, GEOS Publ., 1999, 252 p. (In Russian)
- Gosz J.R., Likens G.E., Bormann F.H. Organic matter and nutrient dynamics of the forest and forest floor in the Hubbard Brook Forest, *Oecologia*, 1976, vol. 22, p. 305–320, DOI: 10.1007/BF00345310.
- Guidelines for Soil Description*, Rome: UN Food Agric. Org., 2006, 108 p.
- Ivanova E.A. Formirovanie i razlozhenie drevesnogo opada v lesnykh jekosistemah v fonovykh uslovijah i pri ajero-technogenom zagrjaznenii [Formation and decomposition of tree litter in forest ecosystems under background conditions and under aerotechnogenic pollution], *Voprosy lesnoj nauki*, 2021, vol. 4, no. 3, p. 1–52, DOI 10.31509/2658-607x-202143-87.
- Kittredge J. Forest influences: The effects of woody vegetation on climate, water, and soil, New York, McGraw-Hill Book Co., 1948, 420 p. (In Russian).

- Knizhnikov Yu.F., Kravcova V.I., Tutubalina O.V. *Aehrokosmicheskie metody geograficheskikh issledovanij* [Aerospace methods of geographical research], Moscow, Academy Publ., 2004, 336 p. (In Russian)
- Kulik K.N. *Agrolesomeliativnoe kartografirovaniye i fitoekologicheskaya ocenka aridnykh landshaftov* [Agroforestry mapping and phyto-ecological assessment of arid landscapes], Volgograd, VNIALMI Publ., 2004, 247 p. (In Russian)
- Kulik K.N., Belyaev A.I., Pugachyova A.M. The Role of Protective Afforestation in Drought and Desertification Control in Agro-Landscapes, *Arid Ecosystems*, 2023, vol. 13, iss. 1, p. 1–10, DOI: 10.1134/S2079096123010079.
- Kulik K.N., Kretinin V.M., Rulev A.S., Shishkunov V.M. *Krasnaya kniga pochv Volgogradskoy oblasti* [Red Book of soils of the Volgograd region], Volgograd, Print-2 Publ., 2017, 224 p. (In Russian)
- Lichner L., Hallett P.D., Orfánus T. et al. Vegetation impact on the hydrology of an aeolian sandy soil in a continental climate, *Ecohydrology*, 2010, no. 3(4), p. 413–420, DOI:10.1002/eco.153.
- Lisetsky F.N. Pochvoobrazovatel'nyj potencial lesnykh nasazhdenij pri oblesenii peskov v usloviyakh lesostepi i stepi [Soil-formation Potential of Forest Stands under Sands Afforestation in Forest-steppe and Steppe Environment], *Russian forestry journal*, 2008, no. 4, p. 13–20. (In Russian)
- Liu F., Zhu K., Wang Zh. et al. Production of reactive oxygen species and its role in mediating the abiotic transformation of organic carbon in sandy soil under vegetation restoration, *Carbon Research*, 2023b, no. 2(35), DOI: 10.1007/S44246-023-00074-0.
- Liu J., Wang J., Morreale S.J. et al. Contributions of plant litter to soil microbial activity improvement and soil nutrient enhancement along with herb and shrub colonization expansions in an arid sandy land, *Catena*, 2023a, vol. 227, DOI: 10.1016/j.catena.2023.107098.
- Malysheva N.V. *Deshifirovaniye drevesnoj rastitel'nosti na sverkhdetal'nykh izobrazheniyakh: metodicheskoe posobie dlya podgotovki specialistov vysshego professional'nogo obrazovaniya* [Decoding of woody vegetation on super-detailed images: a methodological guide for the training of specialists in higher professional education], Moscow, Lesproekt Publ., 2014, 40 p. (In Russian)
- Manaenkov A.S. *Lesomeliaciya aren zasushlivoj zony* [Forest reclamation of sandy soils in the semi-arid zone], Volgograd, Federal Research Center of Agroecology of the Russian Academy of Sciences Publ., 2018, 428 p. (In Russian)
- Manaenkov A.S. Perspektiva povysheniya jeffektivnosti ispol'zovaniya nizkoproduktivnykh sel'skohozjajstvennykh zemel' na juge Rossii [The prospect of increasing the efficiency of using low-yielding agricultural land in the south of Russia], *Regional'naya ekonomika. Yug Rossii*, 2014, no. 2(4), p. 64–72. (In Russian)
- Nevel van L., Mertens J., Demey A. et al. Metal and nutrient dynamics in decomposing tree litter on a metal contaminated site, *Environmental Pollution*, 2014, vol. 189, p. 54–62, DOI: 10.1016/j.envpol.2014.02.009.
- Osnovy lesnoj biogeocenologii [Fundamentals of forest biogeocenology], ed. by V.N. Sukachev, N.V. Dylis, Moscow, Nauka Publ., 1964, 570 p. (In Russian)
- Pavlova-Traykova E. Influence of erosion control afforestation on some soil parameters in two watersheds in Southwest Bulgaria, *Silva Balcanica*, 2024, no. 25(2), p. 75–83, DOI: 10.3897/silvabalcanica.25.e125509.
- Polevoj opredelitel' pochv Rossii* [Field determinant of soils of Russia], Moscow, V.V. Dokuchaev Soil Science Institute Publ., 2008, 182 p. (In Russian)
- Potapova K.V., Pyatina E.V. [Soil invertebrates-saprophages of the Lisinsky educational and experimental forestry], "Pochvy – strategicheskij resurs Rossii" [Soils as a strategic resource of Russia], Tezisy dokladov VIII s'ezda Obshchestva pochvedovedov im. V.V. Dokuchaeva i Shkoly molodykh uchenykh po morfologii i klassifikacii pochv, Syktyvkar, 2021, p. 334–335. (In Russian)
- Remezov N.G., Pogrebnyak P.S. *Lesnoe pochvovedenie* [Forest soil science], Moscow, Lesnaja promyshlennost' Publ., 1965, 322 p. (In Russian)
- Sazhin A.N., Kulik K.N., Vasil'ev Yu.I. *Pogoda i klimat Volgogradskoj oblasti* [Weather and climate of the Volgograd region], Volgograd, VNIALMI Publ., 2017, 334 p. (In Russian)
- Semenov V.M., Pautova N.B., Lebedeva T.N. et al. Plant Residues Decomposition and Formation of Active Organic Matter in the Soil of the Incubation Experiments, *Eurasian Soil Science*, 2019, vol. 52, no. 10, p. 1183–1194, DOI 10.1134/S1064229319100119.
- Semenyutina A.V., Khuzhakhmetova A.Sh., Semenyutina V.A. et al. *Nauchnye osnovy i ehtapy formirovaniya polifunkcional'nykh klasternykh dendrologicheskikh ehkspozitsij kolekcij FNC agroekologii RAN* [Scientific foundations and stages of formation of multifunctional cluster dendrological expositions of collections of the Federal Research Center for Agroecology of the Russian Academy of Sciences], Volgograd, Federal Research Center of Agroecology of the Russian Academy of Sciences Publ., 2022, 192 p. (In Russian)
- Shinkarenko S.S., Bartalev S.A., Vasil'chenko A.A. Metod kartografirovaniya zashhitnykh lesnykh nasazhdenij na osnove raznovremennykh sputnikovyx izobrazhenij vysokogo prostanstvennogo razresheniya i bisezonnogo indeksa lesa [Method of mapping protective forest plantations based on multi-temporal satellite images of high spatial resolution and bi-seasonal forest index], *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, vol. 19, no. 4, p. 207–222, DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-207-222. (In Russian)
- Soloviev P.E. *Vliyanie lesnykh nasazhdenij na pochvoobrazovatel'nyj process i plodorodie stepnykh pochv* [Influence of forest plantations on soil formation process and fertility of steppe soils], Moscow, MSU Publ., 1967, 292 p. (In Russian)
- Ushakova G.I. Effect of ecological conditions on the rate and character of forest litter decomposition in the Kola peninsula, *Eurasian Soil Science*, 2000, vol. 33, no. 8, p. 881–886.
- Yuferev V.G., Kulik K.N., Rulev A.S., et al. *Geoinformacionnye tekhnologii v agrolesomeliacii* [Geoinformation technologies in agroforestry], Volgograd, VNIALMI Publ., 2010, 102 p. (In Russian)
- Zanella A., Ponge J.-F., Jabiol B. et al. Humusica 1, article 4, Terrestrial humus systems and forms – Specific terms and diagnostic horizons, *Applied Soil Ecology*, 2018, no. 122, p. 56–74, DOI: 10.1016/j.apsoil.2017.07.005.

Web sources

Methodological recommendations on soil and plant sampling to assess the dynamics of carbon stocks in forest, steppe and tundra ecosystems, *Metodicheskie rekomendacii po*

- otboru obrazcov pochv i rastenij dlja ocenki dinamiki zasobov ugleroda v lesnyh, stepnyh i tundrovyyh jekosistemah*, URL: https://ritm-c.ru/account/personal/methods_2023 (access data 02.06.2023).
- Climate, Climatic zoning, *Nacional'nyj atlas Rossii*, vol. 2, URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/146-150.html> (access data 12.03.2024).
- Relief, Hypsometric map, *Nacional'nyj atlas Rossii*, vol. 2, URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/112-113.html> (access data 05.03.2024).
- Soil-forming rocks, *Pochvoobrazujushhie porody*, URL: <https://webmapget.vsegei.ru> (access data 10.03.2024).
- Weather and climate, Kamyshyn, Annals of weather in Kamyshyn, *Pogoda i klimat, Kamyshin, Letopis' pogody v Kamyshine*, URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/34363.html> (access data 12.03.2024).

Received 24.06.2024

Revised 10.09.2024

Accepted 15.10.2024

ВЛИЯНИЕ СУММАРНОГО СТОКА НАНОСОВ НА ЭРОЗИОННО-АККУМУЛЯТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДОЛИНЕ РУЧЬЯ ДЖАНКУАТ, БОЛЬШОЙ КАВКАЗ

В.А. Иванов¹, В.Н. Голосов², А.С. Цыпленков³, А.В. Коноплев⁴

^{1,4} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, лаборатория геохимии природных вод*

^{1,2} *Институт географии РАН, лаборатория геоморфологии*

² *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, НИЛ эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Макавеева*

³ *Лэндэкёр Рисерч Ltd., 4410 Палмерстон Норт, Новая Зеландия*

⁴ *Институт радиоактивности окружающей среды Фукусимского университета, Япония*

¹ *Мл. науч. сотр., аспирант; e-mail: viktoro.1998@yandex.ru*

² *Вед. науч. сотр., д-р геогр. наук; e-mail: gollossov@gmail.com*

³ *Науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: atsyplenkov@gmail.com*

⁴ *Проф., д-р биол. наук; e-mail: alexeikonoplev@gmail.com*

В данной статье представлены результаты исследования стока взвешенных и влекомых наносов за современный период и особенности переотложения наносов на участке днища долины, характеризующегося преобладанием аккумуляции для водосбора руч. Джанкуат ($F = 9,1 \text{ км}^2$, $Q_{\text{mean}} = 1,5 \text{ м}^3/\text{с}$). Полевые методы исследований включали прямые измерения стока влекомых наносов с помощью пробоотборника Хелли-Смита, определение среднего диаметра проб влекомых наносов и пойменных отложений, русловых деформаций и темпов аккумуляции на пойме, в том числе с использованием радиоцезиевого датирования, в пределах расширения днища долины. Установлено, что суммарный сток наносов руч. Джанкуат составляет $10,1 \cdot 10^6 \text{ кг/год}$, из которых 13% приходится на сток влекомых наносов. По данным балансовых наблюдений за влекомым стоком 2016 и 2023 гг. и радиоцезиевым датировкам пойменных отложений скорость аккумуляции на пойме в пределах расширения днища долины составляет $4,8\text{--}5,6 \pm 1,0 \text{ мм/год}$ за 120-летний период ее формирования. Объем ежегодных русловых деформаций в пределах того же участка днища за период с 2016 по 2023 г. составляет в среднем 1260 т/год . Девятикратная разница между средним диаметром проб влекомых наносов и медианным диаметром русловых отложений в пределах участка расширения днища долины указывает на то, что основная аккумуляция здесь происходит при экстремальных паводках с расходами воды редкой повторяемости.

Ключевые слова: влекомый сток, ^{137}Cs , баланс наносов, перигляциальные водосборы, водосборы малых рек

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.11

ВВЕДЕНИЕ

Водосборы высокогорных рек являются территориями, наиболее чувствительными к потеплению климата, что связано с активизацией эрозионно-аккумулятивных процессов, обусловленной сокращением площадей, ранее занятых ледниками. Последнее влечет за собой воздействие на ранее покрытую ледниками местность субэдральных условий, что имеет последствия для гидрологических и геоморфологических процессов [Geomorphology..., 2019]. Темпы денудации на приледниковых водосборах существенно выше по сравнению с другими горными водосборами [Koppes, Montgomery, 2009; Hinderer et al., 2013].

Ледники, включая прогляциальные зоны, в период их отступления являются доминирующим источником наносов на многих горных водосборах

[Hallet et al., 1996], что сказывается на стоке наносов в более крупных речных бассейнах [Syvitski, Milliman, 2007; Hinderer, 2012]. В то же время процессы транспорта и переотложения наносов для малых рек с ледниковым питанием имеют резко выраженный неоднородный во времени характер [Hinderer et al., 2013]. По данным [Porto, Callegari, 2021], более 50% годового стока наносов рек приходится на экстремальные гидрологические события. При этом доля влекомого стока для некоторых перигляциальных водосборов Альп может составлять до 50% от суммарного стока наносов [Hinderer et al., 2013]. В свою очередь и сток влекомых наносов может иметь значительную сезонную и суточную вариабельность, что может определять его нелинейную связь с прочими метеорологическим и гидрологическими параметрами [Engel et al., 2024].

В последние десятилетия в горах Кавказа происходит интенсивная дегляциация, что соответствует общемировой тенденции [Zemp et al., 2015], и связанная с этим интенсификация эрозионных процессов [Шарифуллин, 2015]. В период с 2000 по 2020 г. площадь ледников на Большом Кавказе сократилась на $23,2 \pm 3,8\%$ [Tielidze et al., 2022]. В отличие от ряда других горных стран [Hinderer et al., 2013; Gray et al., 2010], данных по стоку влекомых наносов на реках Кавказа критически мало. Регулярный мониторинг стока влекомых наносов на Кавказе проводился только на двух постах: р. Баксан (с. Заюково) (1953–1955), р. Терек (г. Казбеги, наст. время г. Степанцминда, Грузия) (1938–1940), причем только последний из постов расположен на малом горном водотоке со значительной долей площади ледников на водосборе.

Процессы эрозии и транспорта наносов неразрывно связаны с их аккумуляцией, в том числе в ловушках наносов. Ловушками наносов являются геоморфологические элементы эрозионно-аккумулятивных систем, в которых происходит разгрузка значительной части наносов в связи с падением транспортирующей способности временного или постоянного потока из-за снижения уклона русла [Харченко и др., 2023]. Оценки объемов аккумуляции наносов за пост-Чернобыльский период в озере Донгуз-Орун позволяют оценить скорость денудации водосбора озера в 1,2–1,5 мм/год [Кузьменкова и др., 2023]. Но даже в отсутствии приемных водоемов участки днищ долин горных рек играют роль ловушек наносов из-за того, что объем эродированного материала во много раз превышает транспортирующие возможности водных потоков, формирующихся внутри водосбора [Hinderer et al., 2013; Bollati, Cavalli, 2021]. Но оценки объемов аккумуляции в днищах долин высокогорных рек более редки и сложны в реализации из-за высокой динамичности малых водотоков. Таким исследованием является статья [Otto et al., 2009], в которой на основе использования геофизических методов были оценены объемы аккумуляции и датировок отложений, что позволило выявить темпы денудации за последние 10 тыс. лет для водосборов малых и средних рек европейских Альп в 0,5–2,6 мм/год.

На данный момент динамика стока наносов на приледниковых водотоках Кавказа недостаточно изучена, что связано с практически полным отсутствием данных о стоке влекомых наносов. Целью данной статьи является детальное изучение стока влекомых и взвешенных наносов в ручье Джанкуат, их долевого вклада в суммарный сток, а также оценка вклада экстремальных паводков в сток наносов на основе особенностей их переотложения на участке днища долины с преобладанием процессов аккумуляции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Физико-географическая характеристика объекта исследования. Водосбор руч. Джанкуат расположен в приводораздельной части северного склона Главного Кавказского хребта, в верхней части долины р. Адыл-су, правого притока р. Баксан (рис. 1). Основная экспозиция бассейна северо-северо-западная, средняя высота водосбора 3100 м [Цыпленков, 2020]. Эта территория представляет собой типичное альпийское высокогорье с крутыми склонами и многочисленными скальными выходами. Вследствие активных денудационных процессов на склонах, в пределах зон аккумуляции, включая днище долины, доминируют грубообломочные отложения. Средняя и верхняя части водосбора представляют собой гляциально-нивальный ландшафт, тогда как нижняя часть занята луговыми альпийскими ландшафтами [Алейникова, Петрушина, 2011]. Общая площадь бассейна р. Джанкуат в створе гидропоста А (см. рис. 1) равна 9,1 км², на долю ледников приходится около 27% площади водосбора [Tsyplenkov et al., 2020]. Главным ледником бассейна является одноименный ледник Джанкуат, его площадь составляет 2,42 км² [Kedich et al., 2023]. На территории бассейна располагается также три малых ледника, общей площадью 0,5 км²: Койавган, Виатау и Висячий, сток с которых питает ручей Койавган, который дренирует около трети всего водосбора руч. Джанкуат и имеет площадь около 3 км². Оледенение водосбора руч. Койавган составляет порядка 16%, доминирующая экспозиция склонов южная, юго-западная, средняя высота его водосбора составляет 3329 м. Большая часть водосбора Койавгана полностью лишена растительности и сложена грубообломочными отложениями [Kharchenko et al., 2020].

Натурные наблюдения, начавшиеся с 1966 г., показывают, что за последние 55 лет фронт ледника отступил на 545 м, другими словами, скорость его отступления составила 9,9 м/год, в результате чего площадь оледенения бассейна сократилась на 22,5% [Poroynin et al., 2024]. По данным метеонаблюдений, организованных на водосборе, средняя температура воздуха в сезон абляции в днище долины руч. Джанкуат составляет 10,2°C, на леднике Джанкуат – 6,6°C [Торопов и др., 2018]. На основе данных глобального климатического мониторинга было показано, что в сезон абляции для данного водосбора температура воздуха выросла на 1,2°C, если сравнивать периоды 2017–2021 и 1981–2010 гг. [Poroynin et al., 2024]. Среднее суммарное количество осадков за период мониторинга в сезон абляции (2008, 2014–2022) в днище долины руч. Джанкуат (2650 м) составляет 439 мм/год [Kedich et al., 2023].

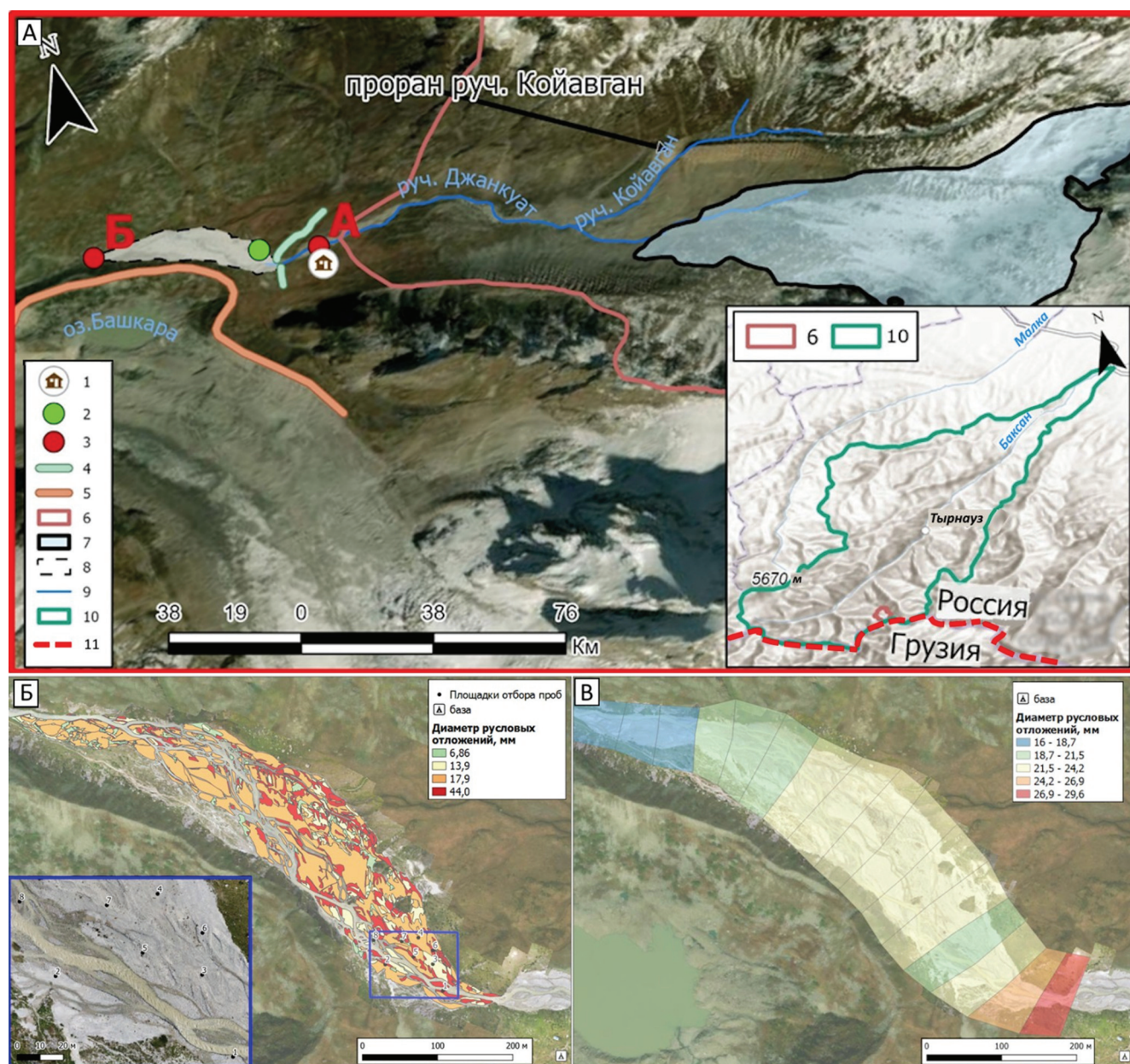


Рис. 1. Схема проведенных работ:

А – карта фактического материала и топонимов: 1 – гляциологическая станция МГУ; 2 – место отбора колонки отложений; 3 – створы измерения влекомых наносов; 4 – морена ледн. Джанкуат, датируемая 1893 г. [Verhaegen et al., 2020]; 5 – морена ледн. Башкара; 6 – водосбор руч. Джанкуат; 7 – граница ледн. Джанкуат на 2017 г. [Rets et al., 2019]; 8 – граница долинного зандра; 9 – русловая сеть водосбора руч. Джанкуат; 10 – водосбор р. Баксан; 11 – Государственная граница РФ; Б – картирование среднего диаметра отложений в пределах расширения днища долины; В – агрегирование среднего диаметра отложений по 50 м

Fig. 1. Fieldwork data:

A – filed materials and toponyms: 1 – glaciological station of Moscow State University; 2 – sediment column sampling site; 3 – bedload measurement points; 4 – moraine of the Dzhankuat glacier 1893 [Verhaegen et al., 2020]; 5 – moraine of the Bashkara glacier; 6 – The Dzhankuat creek watershed; 7 – the border of the Dzhankuat glacier for 2017 [Rets et al., 2019]; 8 – the border of the floodplain; 9 – the channel set of the Dzhankuat creek; 11 – Russian border; 10 – the Baksan river watershed; Б – the diameter of floodplain sediments; В – aggregation of mean sediment diameter by 50 m

Ежедневные наблюдения за стоком воды и взвешенных наносов проводились на ручье Джанкуат во время всего сезона абляции с июня по август в 2015–2017, 2019 и 2023 гг. Эпизодические наблюдения за стоком наносов выполнялись в 2018, 2020,

2021 гг. В 2015, 2016 и 2023 гг. проводились измерения расходов влекомых наносов.

По оценкам [Дюргеров и др., 1972], на период абляции приходится порядка 98% от годового стока взвешенных наносов. Основным источником взве-

шенных наносов для ручья является приледниковая морена (67–79%), материал, вытаявающий из ледника, является вторым по значимости источником (21–33%). В целом, для водосбора руч. Джанкуат за период 2015–2019 гг. около 50% стока наносов было приурочено к ограниченному числу экстремальных гидрологических явлений (1–12% обеспеченности), связанных с выпадением большого количества жидких ливневых осадков [Tsyplenkov et al., 2021].

Событием, наиболее сильно повлиявшим на транспорт наносов руч. Джанкуат за последние как минимум 20 лет, был прорыв правобережной боковой морены ледника Джанкуат в 2015 г. По данным [Kedich et al., 2023], объем образовавшегося прорыва составил порядка 200 тыс. м³. Порядка 25% вынесенного материала переотложилось на конусе выноса притока, большая часть материала поступила в русло р. Джанкуат и частично отложились ниже по течению от участка поступления наносов [Kedich et al., 2023]. При этом неизвестно, какую долю от общего объема перемещенного материала составил растаявший лед.

Для руч. Джанкуат отсутствует какой-либо приемный водоем, но ловушкой наносов служит расширение долины, расположенное ниже моренного вала 1893 ± 20 г. (см. рис. 1). По данным лихенометрических датировок, отложение наносов здесь началось после отступления фронта ледника Джанкуат в 1893 ± 20 г. [Алейникова, Петрушина, 2011; Verhaegen et al., 2020]. Снижение уклона продольного профиля ручья на данном участке площадью 70 170 м², связано с выходами трудноразмываемых кристаллических интрузивных пород (гранитов, гранодиоритов) [Черноморец и др., 2007]. В результате происходит распластывание потока по днищу долины с образованием множества рукавов, что ведет к падению транспортирующей способности потока и, как следствие, приводит к отложению материала, транспортируемого речным потоком.

Методы оценки суммарного стока наносов. Срочные наблюдения за оптической мутностью воды в период абляции проводились на гидрологическом посту А (см. рис. 1). В состав мониторинга входит измерение уровня, температуры, минерализации и оптической мутности воды с периодичностью семь измерений в день. Выбор времени сроков наблюдений предполагает охват пика поступления мутных талых ледниковых вод с 9:00 до 23:00. В период между наблюдениями производится линейная интерполяция значений.

Оптическая мутность приводится к значению массовой мутности с использованием устойчивой многолетней зависимости для данного поста [Tsyplenkov et al., 2020]. В результате получена зависимость:

$$SSC = \begin{cases} 19 - 0,217T + 0,00226T^2, & T < 1000 \\ -566 + 1,21T, & T \geq 1000 \end{cases}, \quad (1)$$

где SSC – весовая мутность, мг/л; T – оптическая мутность, NTU – HACH 2100P.

Мониторинг расходов воды на посту руч. Джанкуат проводился методом ионного паводка на участке русла выше долинного заандра в створе гидрологического поста А. В качестве трассера использовался выпуск 10 л пробы раствора соли с электропроводностью около $70 \cdot 10^{-3}$ мкСм/см, что на порядок выше фоновых значений в потоке. Створ измерения расходов находился в 100 м от места выпуска пробы, предполагается, что на данном расстоянии происходит полное перемешивание.

В среднем расход воды измеряется один раз в пять дней дважды. Измерение уровней производится автоматически с использованием самописца Keller 104, после чего по построенным для каждого месяца отдельным кривым зависимости расходов воды от уровней производится оценка расхода воды на каждые 15 минут установки самописца. Расход взвешенных наносов R (кг/с) вычисляется по формуле:

$$R = Q \cdot SSC, \quad (2)$$

где Q – расход воды, м³/с, SSC – мутность, кг/м³.

Наблюдения за стоком влекомых наносов производились в 2016, 2017 и 2023 гг. параллельно на двух створах (см. рис. 1) с помощью ловушки Хелли – Смита [Helley, Smith, 1971]. Ловушка погружалась в поток на 5 минут. Полученные пробы наносов просушивались в муфельной печи (5 часов при температуре 105°C) и взвешивались. Расчет расхода влекомых наносов подсчитан по формуле:

$$G = \frac{M}{\Delta t} \cdot \frac{B}{b}, \quad (3)$$

где M – масса сухого вещества в ловушке, кг; Δt – время установки ловушки в поток, с (5 минут); B – ширина реки, м; b – ширина ловушки (0,25 м).

В пробах влекомых наносов были измерены медианные диаметры наносов методом ситования. Всего было выполнено 55 измерений расходов влекомых наносов на посту А и 10 измерений на посту Б.

Изучение аллювиальных отложений в расширении днища долины руч. Джанкуат в пределах заандра. В августе 2023 г. для оценки медианного диаметра отложений в пределах расширения днища долины, расположенного между гидростворами А и Б (см. рис. 1А) было выделено четыре категории пойменных отложений с визуальным различием диаметром, для которых было размечено восемь площадок, по две на каждую категорию (см. рис. 1Б).

Измерение диаметра наносов велось в границах площадок, которые были определены при помощи квадратной рамки со стороной 1 м. В поле при по-

мощи линейки были оценены средние диаметры всех обломков более 1,5 см для $\frac{1}{4}$ площади рамки, которые лежали на поверхности. Выборка для каждой площадки составила порядка 6–212 обломков. Диаметр наносов менее 1,5 см был оценен в отобранных пробах мелкозема в лаборатории с помощью набора сит (0,05/0,1/0,25/0,5/1/3 см). Для каждой площадки была оценена доля мелкозема, что позволило рассчитать среднее значение для площадки путем суммирования среднего диаметра крупных обломков и мелкозема в соответствии с занимаемой площадью внутри всей рамки. Для экстраполяции оценок средневзвешенных диаметров наносов, определенных для площадок, была

выполнена съемка БПЛА DJI Mini зандра с высоты в 30 м. Фотограмметрическая обработка снимков была проведена в программе Agisoft Metashape, размер пикселя составил 3 см. Дешифрирование полученного ортофотоплана с учетом отображения на нем ранее исследованных площадок позволило выделить внутри днища долины однородные участки по выбранным четырем категориям (рис. 2). Медианный диаметр русловых отложений для всего исследованного участка днища был оценен как взвешенное среднее диаметров наносов на площадках в зависимости от доли площади, которую занимает каждая группа по крупности русловых наносов.

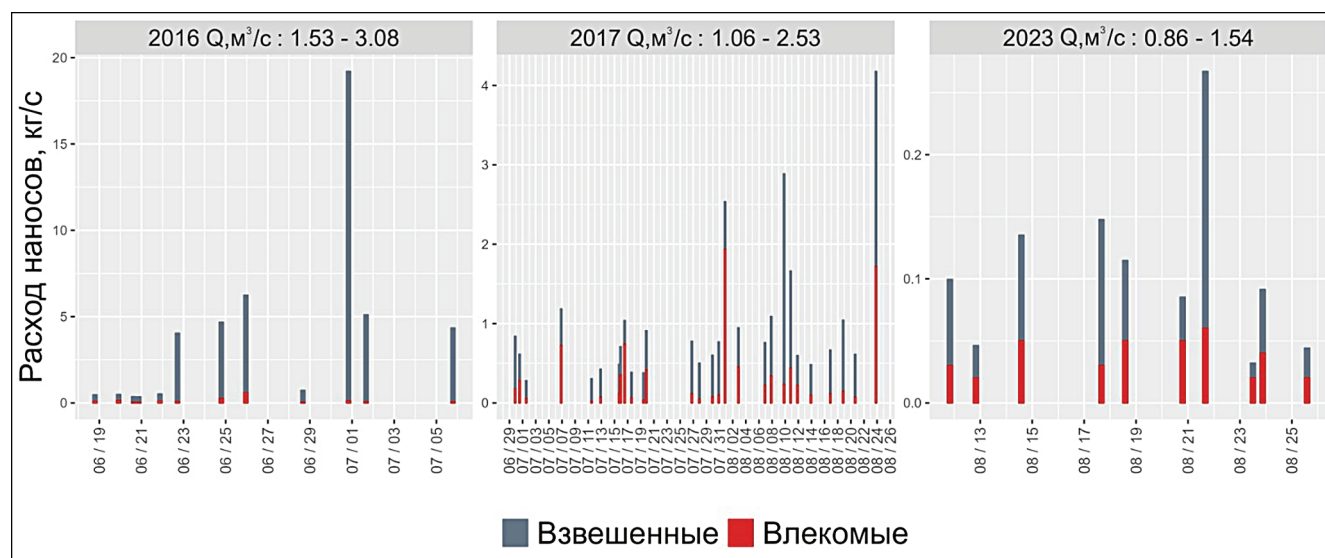


Рис. 2. Соотношение между расходами взвешенных и влекомых наносов при разных расходах воды

Fig. 2. The ratio between the bed load and suspended load at different water discharge

Карта современного вреза русел ручья Джанкуат в пределах исследованного участка днища долины была построена по цифровой модели местности, созданной по данным съемок с БПЛА. Параметры врез русел рассчитаны при помощи инструмента Terrain Profile в QGIS. Полученные результаты были валидированы по натурным измерениям вреза гидрологической штангой по 156 точкам. Средняя ошибка цифровой модели местности в таком случае составила 16%.

Любительские фотографии днища долины руч. Джанкуат, выполненные с ледника Джанкуат с расстояния около 2 км и высоты 150 м, позволили восстановить изменения в положении основного русла ручья в пределах исследованного расширения днища за период с 1981 по 2023 г. Всего для анализа было использовано 17 фотографий. Все фотографии были привязаны с помощью программного комплекса ArcGIS к ортофотоплану, построенному

по данным съемок с БПЛА. Для привязки использовались естественные ориентиры, выступы кристаллических горных пород, положение строений. Привязка включала в себя поиск минимум 20 референсных точек.

Для оценки объема русловой эрозии в пределах расширения днища долины была использована формула:

$$W_b = \frac{L_{\text{разм}} \cdot B \cdot H \cdot \rho}{\Delta t}, \quad (4)$$

где W_b – объем русловых деформаций, кг/год; $L_{\text{разм}}$ – длина фронта размыва, м; B – отступление берега, м; H – средняя глубина вреза русла, м; ρ – плотность грунта кг/м³; Δt – временной промежуток, годы.

Для оценки темпов аккумуляции за исторический период в 2017 г. была отобрана колонка пойменных отложений в пределах исследованного участка днища долины (см. рис. 1). Глубина колонки составила 40 см. Слои были отобраны

через каждые 5 см с площади 15х15 см. Все образцы высушивались при температуре 105°С, далее взвешивались и гомогенизировались (расстирались в ступе до размера <2 мм) в лаборатории. Измерения концентраций ¹³⁷Cs в подготовленных пробах грунта (около 90 г) проводили на коаксиальном германиевом гамма-спектрометре фирмы ООО НИИП «Грин стар инструментов» (СКС-07(09) П-Г-Р, Россия) с относительной погрешностью определения удельной активности 5–10%. Исходя из сухой массы образца и ее фиксированных геометрических параметров, рассчитывались запасы ¹³⁷Cs (кБк/м²) для каждого интервала глубин, где производили измерения [Иванов и др., 2016].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ суммарного стока наносов по данным наблюдений 2015–2023 гг. На основе срочных наблюдений в сезоны абляции 2015–2017, 2019 и 2023 гг. был восстановлен ход стока взвешенных

наносов (табл. 1). По данным совместных измерений расходов воды и мутности, значение суммарного стока взвешенных наносов изменялось в диапазоне от 3·10⁶ до 16·10⁶ кг/год при среднегодовом стоке воды от 10 до 18 млн м³/год (табл. 2). Среднегодовое значение расхода взвешенных наносов составляет 1 кг/с. В период наблюдений наибольшая водность отмечена в 2015 г., когда сток воды за период абляции составил 18·10⁶ м³/год, а максимальный суточный расход воды достигал значения в 8,46 м³/с. Расход взвешенных наносов данного года составил 16,2·10⁶ кг/год, что вдвое превышает среднегодовые значения и в 5 раз годовой сток наносов 2019 г. (табл. 3).

По всем измерениям влекомых наносов на посту А среднее значение составляет 0,16 кг/с, минимальное значение – 0,01 кг/с, максимальное 1,93 кг/с. В зависимости от измерений вклад стока влекомых наносов в общий сток наносов составляет от 1 до 76%, причем с ростом расходов взвешенных наносов происходит уменьшение доли влекомых (см. рис. 2).

Таблица 1

Характеристика суточных измеренных значений стока наносов руч. Джанкуат за сезоны абляции

Год	T, °C	Осад-ки, мм	Q _А , м³/с	SSC _А , мг/л	R _А , кг/с	G _А , кг/с	D _{50А} , мм	G _Б , кг/с	D _{50Б} , мм	(R+G), кг/с	G/(R+G)	Аккумуляция, кг/с
2015	10,7	–	2,10	536	1,87	–	–	–	–	–	–	–
2016	8,98	–	1,77	594	1,30	0,10	4,16	0,03	2,10	–	0,07	0,06
2017	11,4	–	1,40	548	0,89	0,34	2,96	–	–	–	0,28	–
2019	9,40	–	1,16	273	0,35	–	–	–	–	–	–	–
2023	10,7	–	1,21	402	0,61	0,04	2,42	0,02	3,18	–	0,41	0,01
Все годы	10,2	–	1,53	471	1,0	0,16	3,18	0,03	2,64	–	0,25	0,04

Примечание: T – среднесуточная температура воздуха; Q_А – расход воды на посту А; SSC_А – мутность; R_А – расход взвешенных наносов; G_{А,Б} – расход влекомых наносов на постах А и Б; D_{50А,Б} – средний диаметр влекомых наносов на постах А и Б; (R+G) – суммарный сток наносов; G/(R+G) – доля влекомого стока

Таблица 2

Характеристика суммарного стока наносов руч. Джанкуат за сезоны абляции

Год	T, °C	Осад-ки, мм	Q _А , м³/с	SSC _А , мг/л	R _А , кг/с	G _А , кг/с	D _{50А} , мм	G _Б , кг/с	D _{50Б} , мм	(R+G), кг/с	G/(R+G)	Аккумуляция, кг/с
Суммарные величины за сезон абляции												
2015	–	511	18,1·10 ⁶	–	16,2·10 ⁶	2,42·10 ⁶	–	–	–	18,6·10 ⁶	0,15	1,87·10 ⁶
2016	–	570	15,5·10 ⁶	–	11,4·10 ⁶	1,72·10 ⁶	–	–	–	13,1·10 ⁶	0,15	0,97·10 ⁶
2017	–	482	13,0·10 ⁶	–	8,30·10 ⁶	0,75·10 ⁶	–	–	–	9,05·10 ⁶	0,09	0,33·10 ⁶
2019	–	536	10,0·10 ⁶	–	3,00·10 ⁶	0,61·10 ⁶	–	–	–	3,61·10 ⁶	0,20	0,25·10 ⁶
2023	–	746	10,9·10 ⁶	–	5,50·10 ⁶	0,46·10 ⁶	–	–	–	5,96·10 ⁶	0,08	0,14·10 ⁶
Все годы	–	569	13,5·10 ⁶	–	8,86·10 ⁶	1,19·10 ⁶	–	–	–	10,1·10 ⁶	0,13	0,71·10 ⁶

Таблица 3

Минимальные и максимальные значения стока наносов руч. Джанкуат за сезоны абляции

Год	T, °C	Осад- ки, мм	Q_A , м³/с	SSC_A , мг/л	R_A , кг/с	G_A , кг/с	D_{50A} , мм	G_B , кг/с	D_{50B} , мм	$(R+G)$, кг/с	$G/(R+G)$	Аккумуля- ция, кг/с
<i>Минимальные суточные величины за сезон абляции</i>												
2015	4,90	0	0,11	213	0,02	–	–	–	–	–	<0,01	0
2016	–2,70	0	0,46	214	0,10	0,01	0,56	0,01	0,50	–	<0,01	0
2017	2,70	0	0,35	214	0,07	0,05	1,38	–	–	–	<0,01	0
2019	2,14	0	0,01	213	<0,01	–	–	–	–	–	<0,01	0
2023	–1,13	0	0,45	213	0,01	0,02	0,25	0,01	0,32	–	<0,01	0
Все годы	–2,70	0,0	0,01	213	<0,01	0,01	0,25	0,01	0,32	–	<0,01	0,00
<i>Максимальные суточные величины за сезон абляции</i>												
2015	16,8	56,9	8,46	43 300	367	–	–	–	–	–	–	3,40
2016	15,3	40,3	4,45	8 850	39,4	0,54	10,0	0,06	3,86	–	0,28	0,69
2017	17,6	97,2	3,21	53 800	173	1,93	52,5	–	–	–	0,76	0,15
2019	18,1	40,9	3,62	2 260	8,17	–	–	–	–	–	–	0,46
2023	19,3	117	2,29	10 900	95,9	0,06	7,62	0,06	12,8	–	0,62	0,12
Все годы	19,3	117	8,46	53 800	60,8	1,93	52,5	0,06	12,8	–	0,76	3,40

При переходе значений расходов воды через значение в 2,5 м³/с наблюдается скачкообразный рост суммарного расхода наносов (см. рис. 2). Это может быть связано с достижением руслоформирующего расхода воды, что приводит к резкой активизации процессов эрозии дна и бортов русла. В то же время при высоких расходах воды возможно возрастание доли взвешенных наносов за счет перехода части влекомых во взвешенные. Данные экстремальные события обычно приурочены к выпадению обильных ливневых осадков, что в свою очередь приводит к насыщению потока продуктами эрозии, поступающими с водосбора [Tsyplenkov et al., 2020]. Измерения высоких расходов воды могут иметь значительные погрешности. Данные значения выбиваются из общей зависимости расхода влекомых наносов от расхода воды. Поэтому во избежание крупных просчетов, для расходов воды выше 2,5 м³/с использовалось наибольшее измеренное значение в 0,53 кг/с (рис. 3).

Исключая данные пиковые значения, в диапазоне расходов воды от 0,85 до 2,5 м³/с (78% всего периода абляции) существует устойчивая многолетняя зависимость между расходом воды и расходом влекомых наносов, которая имеет вид экспоненты (рис. 4). При низких расходах воды, меньше 0,85 м³/с (13% всего времени абляции), большая часть стока наносов обусловлена перемещением только донных наносов. Предполагается, что дальнейшее снижение расходов воды способствует линейному снижению расходов влекомых наносов до нулевых значений.

В свою очередь повышение расходов воды свыше 2,5 м³/с обычно связано с увеличением скорости таяния или ливневыми осадками, что приводит к поступлению в русло водотока большого количества мелкой взвеси. На долю расходов воды свыше 2,5 м³/с приходится 9% от всей продолжительности периода абляции. Опираясь на данные положения, была предложена составная зависимость расходов воды и влекомых наносов, использованная для интерполяции значений влекомого стока на периоды, неохваченные наблюдениями:

$$G = \begin{cases} Q < 0,85; & 0,0235Q \\ 1 < Q < 2,5; & 0,0036 \exp(2,0269Q) \\ 2,5 < Q; & 0,53 \end{cases} \quad (5)$$

Было рассчитано, что среднемноголетние значения суммарного стока влекомых наносов за период абляции варьируют в диапазоне от $0,46 \cdot 10^6$ кг/год до $2,42 \cdot 10^6$ кг/год, а среднее значение составляет $1,19 \cdot 10^6$ кг/год. Наибольшие значения годового стока наносов приурочены к годам наибольшей водности 2015 и 2016 гг. (см. табл. 3). На даты с среднесуточными расходами воды менее 2,5 м³/с, приходится в среднем 15% от суммарного стока влекомых наносов за период абляции. Минимальные значения (4,4%) наблюдаются для максимального по водности года – 2015-го. Максимальные значения в 27% приурочены к 2023 г. – году с одной из минимальных водностей.

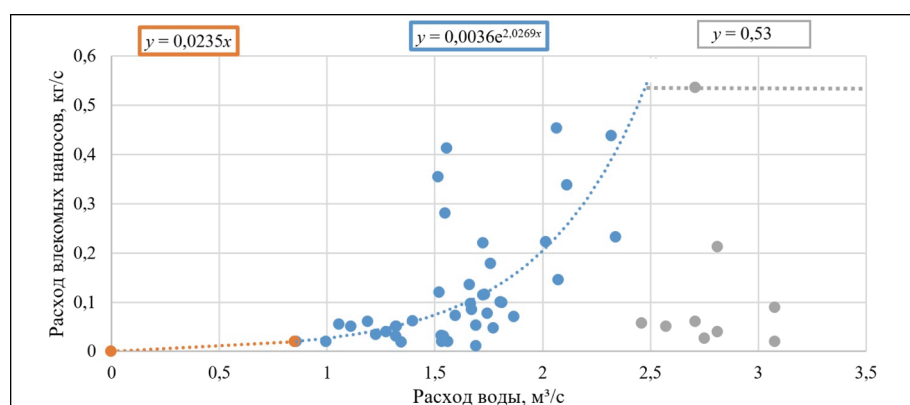


Рис. 3. График связи расходов воды и влекомых наносов

Fig. 3. The relationship between water runoff and bedload

Исходя из расчетов, среднегодовой суммарный сток наносов составляет $10,1 \cdot 10^6$ кг/год. Для поста А доля влекомых наносов в годовом стоке наносов составляет 13%, минимальное значение – 8%, максимальное – 20%. Наибольшее значение доли влекомого стока в 20% приходится на наименьший по водности 2019 г. Наименьшие значения доли влекомого стока в 8 и 9% приурочены к годам «средней» водности (2023 и 2017).

По данным натурных измерений в состав влекомых наносов входят частицы диаметром от менее 0,5 мм до 20 см и более. Средний диаметр частиц влекомого стока составляет 3,18 мм (песок – мелкий гравий), максимальные значения достигают 52,5 мм, минимальные – 0,20 мм. С увеличением расходов воды происходит увеличение диаметра переносимых наносов. При расходах воды менее 1 м³/с медианное значение диаметра составляет 0,24 мм, при расходах воды более 3,5 м³/с – 4,24 мм.

В 2016 и 2023 гг. было проведено десять синхронные измерения влекомых наносов на постах А и Б (см. рис. 1). Было выявлено, что для поста Б среднее значение расхода влекомых наносов равно 0,03 кг/с, что в среднем на 15% меньше, чем на посту А; средний диаметр наносов составляет 2,64 мм, что в среднем на 40% меньше, чем на посту А (см. табл. 1).

По данным измерениям можно вывести зависимость между расходом воды и балансом наносов в пределах участка расширения днища долины, где преобладают процессы переотложения наносов ($G_A - G_B$). Коэффициент детерминации между данными параметрами составляет 0,70, а уравнение связи имеет вид (6).

$$(G_A - G_B) = \begin{cases} Q > 1; & 0,0918Q^2 - 0,1704Q + 0,08 \\ Q < 1; & 0 \end{cases} \quad (6)$$

Расчет по уравнению (6) показывает, что годовой баланс влекомых наносов на участке положительный и имеет значение в $0,71 \cdot 10^6$ кг/год, что состав-

ляет порядка 60% от расхода влекомых наносов на гидростворе А. При минимальном и максимальном значениях в $0,14 \cdot 10^6$ кг/год и $1,87 \cdot 10^6$ кг/год, соответственно. Это говорит о том, что при исследованных расходах воды в пределах расширения днища долины происходит активная аккумуляция наносов. При переходе к размерностям геологических скоростей осадконакопления по формуле (7) можно говорить о том, что для данного участка за счет отложения влекомых наносов скорость аккумуляции по всей его площади составляет 4,8 мм/год.

$$u = \frac{(G_A - G_B)}{\rho_n S_3} \cdot 0,0864, \quad (7)$$

где u – скорость осадконакопления на зандре, мм/год; ρ_n – плотность наносов, кг/м³; S_3 – площадь зандра, м²; G – расход влекомых наносов по постам А и Б, кг/с; 0,0864 – множитель для перехода к размерности мм/год.

Анализ русловых отложений в пределах участка расширения днища долины. По данным съемки БПЛА в августе 2023 г. падение высот в пределах исследованного участка расширения днища долины составляло 40 м/км. Уклон изменялся в диапазоне от 0,005 до 0,085, увеличиваясь вниз по течению. По данным натурных наблюдений установлено, что средняя глубина вреза русел ручья руч. Джанкуат, прорезающих участок расширения днища долины, составляла 43 см с вариабельностью в диапазоне 20–55 см и максимальными значениями до 110 см.

На 65% площади участка отсутствует растительный покров; 13% занимают области с более плотным травянистым покровом, где, вероятно, долгое время не отлагались крупные наносы, но присутствуют временные водотоки и происходит отложение мелкой фракции; 22% площади занимает открытая водная поверхность. Медианный диаметр русловых отложений в пределах исследованного участка руч. Джанкуат составляет 22 мм,

мелкая галька с гравием. Большую часть занимают отложения диаметром 17,9 мм (60%), меньше всего – 6,86 мм (6%). Средняя плотность отложений на участке расширения днища долины была оценена на основе данного распределения диаметра отложений по таблицам [Караушев, 1977] и была принята за 2100 кг/м^3 .

Транспорт наносов и русловые деформации. В результате восстановления положения основного

русла потока за период 1981–2023 гг. было установлено, что пояс русловых деформаций за последние 18 лет равен ширине днища долины, которая в самом широком месте составляет 130 м (рис. 4). Наиболее активными русловыми переформированиями характеризуются верхние 200 м днища долины. Ниже по течению происходит новое слияние проток в единое русло у правого борта долины в 160 м от участка сужения русла, где расположен створ Б.

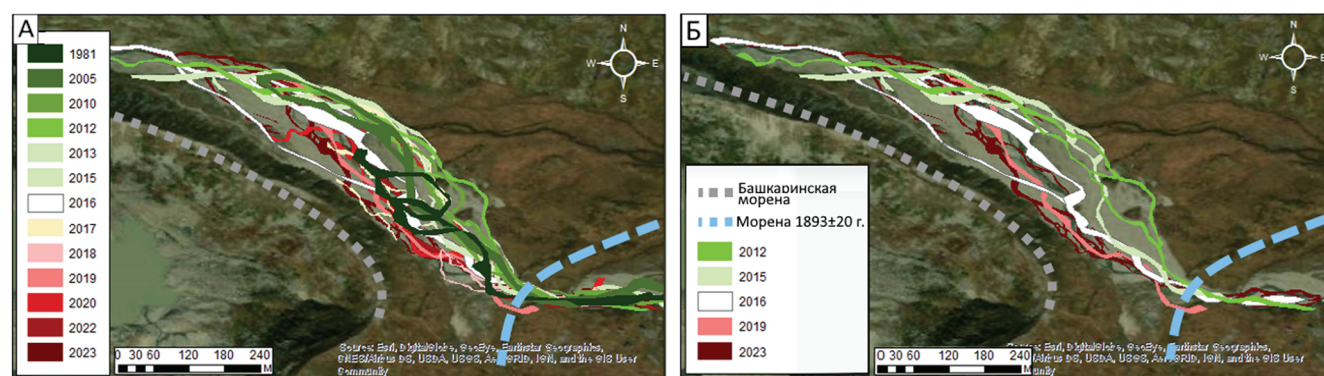


Рис. 4. Положение русла на исследованном участке днища долины в конце периода абляции руч. Джанкуат в период 1981–2023 гг. (А) и в годы наиболее существенных перестроек (Б)

Fig. 4. Channel mitigation of the Djankuat creek 1981–2023 (at the end of ablation period) (А) and at the moment of most essential channel changes (Б)

До 2012 г. основной рукав ручья располагался у правого борта долины, значительно большая часть воды уходила в него сразу после пересечения морены 1893 ± 20 г., но ежегодно русло все дальше отходило от правого борта долины к левому. Наиболее существенная перестройка русла произошла в 2016 г., на следующий год после формирования прорана на правом борту долины руч. Джанкуат (см. рис. 4Б). На текущий момент основной рукав вплотную приблизился к Башкаринской морене.

После 2016 г. расположение основного русла мало менялось на нижнем и верхнем 200-метровых участках расширения днища долины. При этом в его центральной части суммарное смещение русла за счет размыва левого берега составило 30 м ($4,2 \text{ м/год}$) на центральном 350-метровом участке в период с 2016 по 2023 г. (см. рис. 4Б). Учитывая, что средняя глубина вреза русла составила 0,4 м, а плотность отложений – 2100 кг/м^3 , объем ежегодных русловых деформаций в пределах участка, рассчитанный по формуле (4), составляет порядка 1260 т/год .

Аккумуляция наносов на пойме по данным радиоцезиевых датировок и стока влекомых наносов. По данным отбора колонки пойменных отложений средняя удельная активность проб составляет $5,6 \text{ Бк/кг}$. На глубине 5–10 и 30–35 см расположены

два пика активности в 6,6 и 13 Бк/кг соответственно. Предположительно эти пики могут характеризовать поверхность поймы на момент выпадения ^{137}Cs из атмосферы в результате аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г., и максимум испытаний ядерного оружия в открытой атмосфере (1963 г.), которые проводились в период 1954–1963 гг. [Handbook..., 2003]. Исходя из этих данных можно говорить о том, что в период с 1986 по 2017 г. скорость аккумуляции составляла около $1,5\text{--}1,6 \text{ мм/год}$, за период с 1963 по 1986 г. – $10\text{--}11 \text{ мм/год}$. Как было сказано ранее, радиоцезиевые датировки имеют погрешности порядка 10–15%, поэтому можно говорить о том, что за весь период с 1960 по 2017 г. скорость аккумуляции на исследуемом участке днища долины составляла $5,6 \pm 1,0 \text{ мм/год}$.

Сравнение данных о стоке наносов руч. Джанкуат с другими водосборами. Для характеристики темпов денудации территории обычно используют балансовые методы, заключающиеся в оценке источников поступления наносов, их транспорта и переотложения. Среднемноголетние темпы денудации для Северного Кавказа по данным измерения мутности воды на постах Росгидромета колеблются в диапазоне $0,1\text{--}0,25 \text{ мм/год}$ [Tsyplenkov et al., 2019; Мозжерин, Шарифуллин, 2014]. Недостатком данных оценок является недоучет сто-

ка влекомых наносов, который, в свою очередь, как это было показано в статье [Hinderer et al., 2013] для перигляциальных водосборов малых и средних рек Альп, может варьировать в интервале от 1 до 50% и в среднем составляет 17%. Как было показано в нашем исследовании для руч. Джанкуат доля влекомого стока составляет 13% в диапазоне расходов воды 0,5–3 м³/с, который является характерным для последних лет.

Для сравнения полученных результатов имеет смысл обратиться к имеющимся измерениям стока влекомых наносов на Кавказе. Мониторинг влекомых наносов для малых перигляциальных водосборов Кавказа проводился только на р. Терек (в г. Казбеги, наст. время г. Степанцминда, Грузия) в период с 1938 по 1940 г. Гидрометеорологической службой СССР за год производилось 37–47 наблюдений в течение всего года. Измерения производились с помощью сетчатого мешка в 3–5 точках по поперечному сечению русла. Водосбор Терека, г.п. г. Казбеги, имеет площадь 778 км² (в 85 раз больше руч. Джанкуат), среднегодовые расходы воды 67 м³/с (в 6 раз больше руч. Джанкуат), оледенение бассейна 6,36% (в 3,5 раза меньше р. Джанкуат) [Северный..., 1973]. Результаты мониторинга показывают, что суммарный сток наносов составляет $308 \cdot 10^6$ кг/год (в 30 раз больше чем на руч. Джанкуат), в свою очередь на сток влекомых наносов приходится 22%, что в 1,6 раза превышает значения, полученные при измерении влекомого стока на руч. Джанкуат, среднеквадратичное отклонение данных показателей близко у обоих водотоков 0,12 и 0,13 соответственно.

В литературе распространена эмпирическая зависимость для оценки доли стока влекомых наносов от площади водосбора F (км²) в среднемноголетнем масштабе, которая была выведена на базе многолетнего мониторинга стока наносов для перигляциальных водосборов Швейцарских Альп (8) [Schlunegger, Hinderer, 2003]. Расчет по этой формуле, как для водосбора Джанкуата, так и для р. Терек, дает погрешности в сторону завышения в 4,8 и 3,2 раза соответственно

$$\frac{G}{R+G} = 5,06 \ln(F) + 52,5. \quad (8)$$

Пульсирующий режим транспорта наносов в «ловушке наносов». Выше было показано, что в пределах участка расширения днища долины, являющегося ловушкой наносов, доминируют процессы аккумуляции транспортируемого потоком материала. Для горных водотоков характерно чередование волн эрозии и аккумуляции, а сам процесс переотложения наносов носит пульсирующий характер [Cavalli et al., 2013].

Данное положение может быть хорошо проиллюстрировано динамикой баланса влекомых наносов на исследованном участке расширения днища долины между створами А и Б. Для 2016 года баланс стока влекомых наносов всегда положительный и находится в диапазоне от 0,042 до 0,478 кг/с, возрастая по мере роста расходов воды. В 2023 г. баланс стока влекомых наносов был практически в 10 раз меньше по сравнению с 2016 г., и падал вплоть до отрицательных значений, когда расход влекомых наносов на нижнем посту превышал значения на верхнем. В свою очередь расходы воды в 2023 г. значительно меньше, их максимальные значения ниже в 2 раза по сравнению с 2016 г.

В 2023 г. 11–13 августа на водотоке наблюдались максимальные расходы воды до 1,6 м³/с, что связано с выпадением 20 мм осадков и интенсивным таянием ледника за счет высоких температур воздуха. В этот период в целом преобладала эрозия сток влекомых наносов на нижнем посту выше, чем на верхнем.

После данного паводка следует плавное снижение расходов воды вплоть до 12–17 августа 2023 г. В данный период наблюдаются переменные пульсации эрозии/аккумуляции наносов, баланс наносов близок к нулевым значениям. К 17.08.2023 среднесуточные расходы воды приблизились к 0,6–1,2 м³/с. Баланс влекомых наносов стал устойчиво положительным, процессы аккумуляции превышали темпы размыва русла.

Для 23 августа было получено две пары наблюдений: утром (9:50) и вечером (17:55), примечательно, что и в течение дня происходило изменение баланса влекомых наносов. В утренние часы при низких расходах воды в 0,82 м³/с баланс наносов был близок к 0 и составлял 0,01 кг/с, с увеличением расходов воды во второй половине дня до 1,08 м³/с происходило увеличение положительного баланса до 0,03 кг/с – наблюдался рост темпов аккумуляции.

Вклад горизонтальных деформаций русел в баланс влекомых наносов на участке расширения днища долины. Агрегация значений среднего диаметра наносов по участкам расширения днища долины в 50 м (см. рис. 2В) отчетливо показывает его уменьшение вниз по течению. Значение среднего диаметра в нижней точке определены в диапазоне от 16,0 до 18,7 мм, в верхней точке – 24,2–26,9 мм. Средний диаметр отложений снижается в 1,6 раза. Данное распределение свидетельствует о сортировке наносов внутри участка, которая возникает из-за снижения транспортирующей способности потока, что характеризует относительно стабильные гидрологические условия.

В соседней долине, руч. Адыл-Су, данная сортировка полностью отсутствует по всему течению

реки, русловые отложения в долине имеют фракционный состав от илистого песка до крупных глыб, диаметром первых метров. Это связано с тем, что в 2017 г. из-за прорыва ледникового озера Башкара по долине прошел сель [Черноморец и др., 2018].

По плану восстановленного положения русла с 1983 по 2023 г. (см. рис. 3) видно, что уже после 2012 г. основной рукав руч. Джанкуат начинает смещаться к правому борту долины, но данный процесс происходил несколько выше по течению. Выброс материала, произошедший вследствие прорыва боковой морены ледника Джанкуат, в июле 2015 г. не привел к радикальным переменам в русловом режиме, и тенденция смещения русла от левого берега долины к Башкаринской морене продолжилась. Можно говорить о том, что в целом для данного участка днища долины характерно активное меандрирование основного рукава от одного борта к другому за счет постепенного заполнения русла наносами, что совместно с горизонтальными деформациями, приводит к его миграции. При прорыве боковой морены в 2015 г. основную долю материала, поступившего в руч. Джанкуат, составляли взвешенные наносы, об этом свидетельствует отсутствие значимой перестройки русла в 2015 г., которая бы происходила при значительном расходе влекомых наносов. Основная часть крупнообломочного материала переотложилась в образовавшемся при прорыве конусе выноса, поэтому можно говорить о том, что современная перестройка положения русла после 2016 г. в большей степени связана с перерывом материала конуса выноса, появившегося после прорыва, чем с событием прорыва боковой морены.

Объем русловых деформаций для руч. Джанкуат в пределах участка расширения днища долины составляет порядка $1,26 \cdot 10^6$ кг/год, и учитывая, что объем влекомого стока составляет в среднем $1,3 \cdot 10^6$ кг/год, а аккумуляция на данном участке $0,72 \cdot 10^6$ кг/год, то можно говорить о том, что продукты размыва русла на данном участке выступает ключевым источником переотложения наносов.

Диаметр влекомых наносов и русловых отложений. Анализ гранулометрического состава русловых отложений позволяет оценить сток наносов за исторический период, а его сравнение с диаметром влекомых частиц оценить вклад влекомых наносов в формировании отложений на участке расширения днища долины для периодов сопоставимой водности.

На рис. 5 представлено совместное распределение диаметров проб влекомых наносов и русловых отложений, осредненное по всем пробам. Пробы влекомых наносов имеют одномодальное распределение с пиком в 0,75 мм, хотя в отдельных пробах встречались частицы диаметром до 20 мм и

более. Русловые отложения характеризуются мультимодальной функцией распределения диаметра. Первый пик связан с крупнейшими обломками, валунами, которые имеют диаметр более 120 мм, второй пик диаметра (17–70 мм) менее выражен и связан с заполнением пространства между крупными обломками гравием. Третий пик (0,175 мм) приурочен к мелкозему, пылеватой фракции, заполняющей поры между частицами гравия. Среди 8 исследованных площадок встречаются такие, где доминирующую роль играет именно пылеватая фракция, а галька, гравий и валуны имеют единичное распространение.

Можно утверждать, что на пойме руч. Джанкуат массовое отложение наносов в основном происходит во время экстремальных паводков малой обеспеченности. Объем влекомых наносов при данных отметках расходов воды кратно возрастает, что также подтверждается значительно большим диаметром русловых отложений, относительно проб, полученных при измерении влекомых наносов. Так как медианный диаметр отложений в пределах данного участка днища составляет 22 мм, что превышает средний диаметр влекомых наносов при его измерениях, который составляет 2,6 мм, почти в 9 раз. Максимальный расход воды, при котором был измерен расход влекомых наносов составил $3,08 \text{ м}^3/\text{с}$, значение расхода влекомых наносов $0,53 \text{ кг/с}$. В то же самое время максимальные суточные расходы воды в 2015 г. при прорыве прорана превышали отметки в $6 \text{ м}^3/\text{с}$ [Kedich et al., 2023]. По данным измерений Г.Н. Голубева в 1973 г. обильное выпадение ливневых осадков привело к формированию паводка с расходами воды более $10 \text{ м}^3/\text{с}$, причем по утверждению автора данная оценка была занижена из-за повреждения вертушки влекомыми по дну валунами [Голубев, 1976]. В 1975 г. по экспертной оценке того же автора на ручье Джанкуат проходил паводок в $30 \text{ м}^3/\text{с}$, чья обеспеченность была оценена в 2% [Ледник..., 1978]. Независимым подтверждением максимальных объемов аккумуляции наносов на исследуемом участке днища долины в эти годы являются почти на порядок более высокие темпы аккумуляции в период с 1963 по 1986 г., по сравнению с периодом 1986–2017 гг., выявленные на основе радиоцезиевого метода (см. рис. 8).

Темпы аккумуляции наносов на участке расширения днища долины за последние 120 лет. Исходя из предположения о том, что в 1893 ± 20 г. граница ледника была на верхней границе участка чуть ниже по течению от поста А (см. рис. 1), о чем свидетельствует датировка конечной морены [Алейникова, Петрушина, 2011; Verhaegen et al., 2020], можно говорить о том, что накопление наносов руслового генезиса происходит в пределах ис-

следуемого участка на протяжении порядка 120 лет. При темпах аккумуляции, полученных по балансу влекомых наносов, равных 4,8 мм/год, за данный период предположительно должно было отложиться 57,6 см осадков.

Косвенно в качестве оценки слоя аккумуляции может служить глубина вреза русел в пределах участка расширения днища долины. По данным измерений глубина вреза русел, за исключением

отдельных выбросов, достигает значений в 55 см, что практически совпадает с оценками по балансу наносов. Это отчасти подтверждает достоверность полученных оценок слоя суммарной аккумуляции за 120-летний период.

По радиоцезиевым датировкам скорость аккумуляции за весь период с 1963 по 2017 г. составила $5,6 \pm 1,0$ мм/год, что совпадает оценками аккумуляции по балансовому методу.

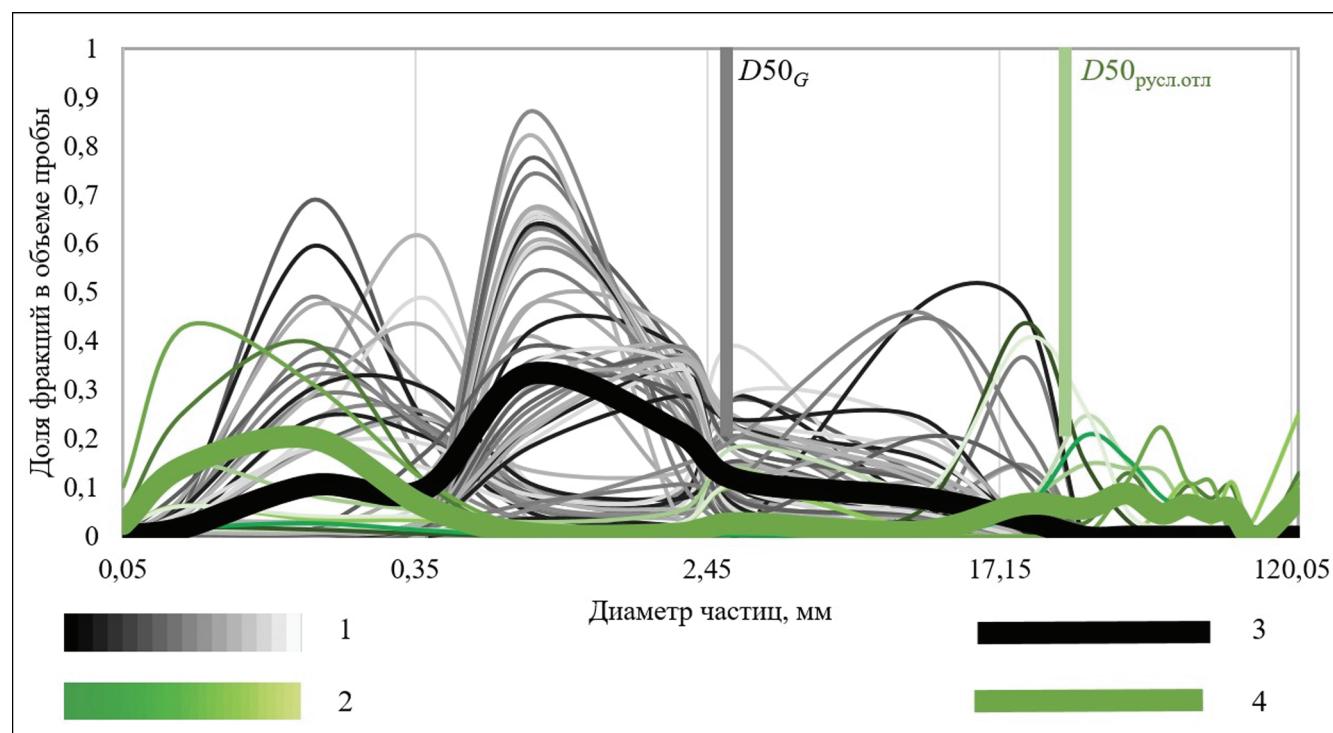


Рис. 5. Диаметр проб влекомых наносов и русловых отложений по данным полевых исследований:

1 – пробы влекомых наносов, 2016, 2017, 2023 гг.; 2 – пробы русловых отложений; 3 – средневзвешенное значение по всем пробам влекомых наносов; 4 – среднее значение по всем пробам влекомых наносов русловых отложений

Fig. 5. Diameter of bed load samples and floodplain sediments according to field data:

1 – bed load samples, 2016, 2017, 2023; 2 – samples of riverbed sediments; 3 – weighted average value for bedload samples; 4 – average value for all floodplain sediments samples

ВЫВОДЫ

На основе данных мониторинга стока взвешенных и влекомых наносов в руч. Джанкуат в период с 2015 по 2023 г. и установленных эмпирических связей с расходом воды было получено значение суммарного стока наносов (влекомый + взвешенный) в $10,1 \cdot 10^6$ кг/год. Расчеты показали, что на долю влекомого стока наносов приходится в среднем 13%. В составе влекомого стока доминируют фракции от среднего песка до среднего гравия.

Установлено, что при расходах воды средней и высокой обеспеченности порядка 60% стока влекомых наносов, формирующегося на участке от края ледника до гидрологического створа А, переоткладывается в пределах участка расширения днища

долины, расположенного ниже по течению от створа А. Среднемноголетнее значение аккумуляции составляет $0,71 \cdot 10^6$ кг/год, в то же время данная величина имеет ярко выраженный пульсирующий характер, обусловленным сменой этапов эрозии и аккумуляции в результате изменения водности ручья. В целом на участке расширения днища долины наблюдается направленное осадконакопление со скоростью 4,8 мм/год. Эти оценки, полученные на основе радиоцезиевых датировок (5,6 мм/год), были близки к темпам аккумуляции на данном участке.

По результатам съемки БПЛА участок расширения днища долины руч. Джанкуат имеет площадь 70×170 м², 66% данной площади занято незадернованными русловыми отложениями, наиболее ча-

сто встречается галька и гравий диаметром 22 мм. Было показано, что медианный диаметр русловых отложений в 10 раз превышает диаметр проб влекомых наносов, что может говорить о том, что основную роль в осадконакоплении на пойме играют расходы воды низкой обеспеченности. Кроме того, было выявлено, что на данном участке просматриваются следы сортировки наносов, медианный диа-

метр отложений от его верхней границы к нижней снижается в 1,6 раза. Пояс русловых деформаций в самом широком месте за последние 42 года составляет 150 м. На текущий момент наиболее интенсивные русловые переформирования происходят в центральной части участка и составляют 4,2 м/год. Было выявлено, что объем русловой эрозии в период с 2016 по 2023 г. составляет 1260 т/год.

Благодарности. Авторы статьи выражают благодарность коллективу сотрудников и студентов-практикантов ледникового отряда Эльбрусской учебно-научной базы географического факультета МГУ за помощь в проведении полевых работ. Отдельно хотелось бы поблагодарить И.В. Железнову, Ю.А. Зубихину, М.Е. Зубову, И.А. Сучкову, С.В. Харченко, А.Н. Губанова за помощь в измерении стока влекомых наносов и расходов воды, О.И. Турчинскую, В.А. Ефимова, В.О. Базилову, Е.Д. Панченко, М.А. Терешину за предоставленные фотографии долинного ландшафта, М.М. Иванова за помощь в обработке проб, Е.Д. Корнилову и Е.П. Рец за консультации и предоставление гидрометеорологических данных, а также начальника ледникового отряда В.В. Поповнину за оказанную поддержку и помощь в исследовании. Настоящая работа была выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-614) и в рамках Государственной программы № 121051100166-4 НИЛ ЭПИРП им. Н.И. Маккавеева МГУ им. М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алейникова А.М., Петрушина М.Н. Структура и динамика приледниковых ландшафтов Приэльбрусья // *Лед и Снег*. 2011. Т. 2. № 114. С. 127–134.
- Голубев Г.Н. Гидрология ледников. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 248 с.
- Дюргеров М.Б., Фрейдлин В.С., Чернова Л.П. Сток взвешенных наносов в бассейне ледника Джанкуат летом 1970 года // *Материалы гляциологических исследований*. 1972. Т. 19. С. 253–254.
- Иванов М.М., Иванова Н.Н., Голосов В.Н., Шамигурина Е.Н. Оценка накопления сорбированного изотопа ^{137}Cs в верхних звеньях флювиальной сети в зоне Черномыльского загрязнения // *География и природные ресурсы*. 2016. № 4. DOI: 10.21782/gipr0206-1619-2016-4(156-163).
- Караушев А.В. Теория и методы расчета речных наносов. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 271 с.
- Кузьменкова Н.В., Голосов В.Н., Грабенко Е.А. и др. Скорости осадконакопления в горных озерах Кавказа как индикаторы темпов денудации на их водосборах // *Известия Российской Академии наук. Серия Географическая*. 2023. Т. 87. № 1. С. 42–59. DOI: 10.31857/S2587556623010107.
- Ледник Джанкуат: Центр. Кавказ / под ред. И.Я. Боярского. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 184 с.
- Мозжерин В.В., Шарифуллин А.Г. Оценка современного денудационного снижения гор по данным о стоке взвешенных наносов рек (на примере Тянь-Шаня, Памиро-Алая, Кавказа и Альп), *Геоморфология*, 2014. № 1. С. 15–23. DOI: 10.15356/0435-4281-2014-1-15-23.
- Северный Кавказ // *Ресурсы поверхностных вод СССР*. Л.: Гидрометеиздат, 1973. Т. 8. 124 с.
- Харченко С.В., Голосов В.Н., Цыпленков А.С. и др. Темпы современной денудации малого водосбора в среднегорном поясе Большого Кавказа (на примере водосбора Гитче-Гижигит) // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр.* 2023. Т. 78. № 3. С. 38–51. DOI: 10.55959/msu0579-9414.5.78.3.4.
- Цыпленков А.С. Идентификация долевого вклада различных источников в сток наносов малых горных рек зоны современного оледенения // *Сборник материалов ежегодного научного семинара «Маккавеевские чтения – 2019»*. М.: Географический факультет МГУ, 2020. С. 94–105.
- Черноморец С.С., Петраков Д.А., Алейников А.А. и др. Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия). 1 сентября 2017 года // *Криосфера Земли*. 2018. Т. 22. № 2. С. 70–80.
- Черноморец С.С., Петраков Д.А., Крыленко И.В. и др. Динамика ледниково-озерного комплекса Башкара и оценка селевой опасности в долине реки Адыл-Су (Кавказ) // *Криосфера Земли*. 2007. Т. 11. № 1. С. 72–84.
- Шарифуллин А.Г. Современная денудация в горах Кавказа и Средней Азии: территориальные особенности и факторы, их определяющие. Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2015. 22 с.
- Bollati I.M., Cavalli M. Unraveling the relationship between geomorphodiversity and sediment connectivity in a small alpine catchment, *Transactions in GIS*, 2021, vol. 25, no. 5, DOI: 10.1111/tgis.12793.
- Cavalli M., Trevisani S., Comiti F. et al. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments // *Geomorphology*. 2013, vol. 188, p. 31–41, DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.05.007.
- Engel M., Coviello V., Savi S. et al. Meltwater-driven sediment transport dynamics in two contrasting alpine proglacial streams, *Journal of Hydrology*, 2024, vol. 635, p. 131171, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131171.
- Geomorphology of Proglacial Systems: Landform and Sediment Dynamics in Recently Deglaciated Alpine Landscapes* (Geography of the Physical Environment), T. Heckmann, D. Morche (eds.), Cham, Springer International Publishing, 2019, DOI: 10.1007/978-3-319-94184-4.
- Gray J.R., Laronne J.B., Marr J.D.G. Bedload-surrogate monitoring technologies, US Geological Survey Scientific Investigations Report, 2010, T. 5091.

- Hallet B., Hunter L., Bogen J. Rates of erosion and sediment evacuation by glaciers: A review of field data and their implications, *Global and Planetary Change*, 1996, vol. 12, no. 1–4, DOI: 10.1016/0921-8181(95)00021-6.
- Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides, 2003, DOI: 10.1007/0-306-48054-9.
- Helley E.J., Smith W. *Development and calibration of a pressure-difference bedload sampler*, US Department of the Interior, Geological Survey, Water Resources Division, 1971.
- Hinderer M. From gullies to mountain belts: A review of sediment budgets at various scales, *Sedimentary Geology*, 2012, vol. 280, p. 21–59, DOI: 10.1016/j.sedg-eo.2012.03.009.
- Hinderer M., Kastowski M., Kamelger A. et al. River loads and modern denudation of the Alps – A review, *Earth-Science Reviews*, 2013, vol. 118, DOI: 10.1016/j.earsci-rev.2013.01.001.
- Kedich A., Kharchenko S., Tsyplenkov A. et al. Lateral moraine failure in the valley of the Djankuat Catchment (Central Caucasus) and subsequent morphodynamics, *Geomorphology*, 2023, vol. 441, DOI: 10.1016/j.geomorph.2023.108896.
- Kharchenko S., Tsyplenkov A., Petrakov D. et al. Causes and consequences of the streambed restructuring of the Koiavgan Creek (North Caucasus, Russia), *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 163, DOI: 10.1051/e3s-conf/202016302003.
- Koppes M.N., Montgomery D.R. The relative efficacy of fluvial and glacial erosion over modern to orogenic timescales, *Nature Geoscience*, 2009, vol. 2, no. 9, DOI: 10.1038/ngeo616.
- Otto J.C., Schrott L., Jaboyedoff M. et al. Quantifying sediment storage in a high alpine valley (Turtmanntal, Switzerland), *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, vol. 34, no. 13, DOI: 10.1002/esp.1856.
- Popovnin V., Gubanov A., Lisak V. et al. Recent Mass Balance Anomalies on the Djankuat Glacier, Northern Caucasus, *Atmosphere*, 2024, vol. 15, no. 1, p. 107, DOI: 10.3390/atmos15010107.
- Porto P., Callegari G. Using ^7Be measurements to explore the performance of the SEDD model to predict sediment yield at event scale, *Catena*, 2021, vol. 196, DOI: 10.1016/j.catena.2020.104904.
- Rets E.P., Popovnin V.V., Toropov P.A. et al. Djankuat glacier station in the North Caucasus, Russia: A database of glaciological, hydrological, and meteorological observations and stable isotope sampling results during 2007–2017, *Earth System Science Data*, 2019, vol. 11, no. 3, DOI: 10.5194/essd-11-1463-2019.
- Schlunegger F., Hinderer M. Pleistocene/Holocene climate change, re-establishment of fluvial drainage network and increase in relief in the Swiss Alps, *Terra Nova*, 2003, vol. 15, no. 2, DOI: 10.1046/j.1365-3121.2003.00469.x.
- Syvitski J.P.M., Milliman J.D. Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean, *Journal of Geology*, 2007, vol. 115, no. 1, DOI: 10.1086/509246.
- Tielidze L.G., Nosenko G.A., Khromova T.E. et al. Strong acceleration of glacier area loss in the Greater Caucasus between 2000 and 2020, *Cryosphere*, 2022, vol. 16, no. 2, DOI: 10.5194/tc-16-489-2022.
- Tsyplenkov A., Vanmaercke M., Collins A.L. et al. Elucidating suspended sediment dynamics in a glacierized catchment after an exceptional erosion event: The Djankuat catchment, Caucasus Mountains, Russia, *Catena*, 2021, vol. 203, DOI: 10.1016/j.catena.2021.105285.
- Tsyplenkov A., Vanmaercke M., Golosov V. Contemporary suspended sediment yield of Caucasus mountains, *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2019, vol. 381, DOI: 10.5194/piahs-381-87-2019.
- Tsyplenkov A., Vanmaercke M., Golosov V. et al. Suspended sediment budget and intra-event sediment dynamics of a small glaciated mountainous catchment in the Northern Caucasus, *Journal of Soils and Sediments*, 2020, vol. 20, no. 8, DOI: 10.1007/s11368-020-02633-z.
- Verhaegen Y., Huybrechts P., Rybak O. et al. Modelling the evolution of Djankuat Glacier, North Caucasus, from 1752 until 2100CE, *Cryosphere*, 2020, vol. 14, no. 11, DOI: 10.5194/tc-14-4039-2020.
- Zemp M., Frey H., Gärtner-Roer I. et al. Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century, *Journal of Glaciology*, 2015, vol. 61, no. 228, DOI: 10.3189/2015JoG15J017.

Поступила в редакцию 06.07.2024

После доработки 08.09.2024

Принята к публикации 15.10.2024

THE EFFECT OF TOTAL SEDIMENT RUNOFF ON EROSION AND ACCUMULATION PROCESSES IN THE VALLEY OF THE DJANKUAT STREAM, GREATER CAUCASUS

V.A. Ivanov¹, V.N. Golosov², A.S. Tsyplenkov³, A.V. Konoplev⁴

^{1,4} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Geochemistry of Natural Waters

^{1,2} Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Geomorphology

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,
The Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes

³ Landcare Research Ltd., 4410 Palmerston North, New Zealand

⁴ Institute of Environmental Radioactivity, Fukushima University, Japan

¹ Junior Scientific Researcher; Post-Graduate Student; e-mail: viktoro.1998@yandex.ru

² Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: golossov@gmail.com

³ Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: atsyplenkov@gmail.com

⁴ Professor; D.Sc. in Biology; e-mail: alexekonoplev@gmail.com

The article presents the results of the study of the suspended and bed sediment runoff for the modern period. In addition the features of sediment deposition within a valley bottom section of the Djankuat stream catchment ($F = 9,1 \text{ km}^2$, $Q_{\text{mean}} = 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$) with predominance of accumulation are discussed. Field research methods included direct measurements of bed load using the Helly-Smith sampler, determination of the average diameter of bed load and floodplain sediments, channel deformations and accumulation rates on the floodplain within the broader section of the valley floor, including the radiocesium dating method. It has been established that the total sediment runoff of the Djankuat Stream is $10,1 \cdot 10^6 \text{ kg/year}$, 13% of which is the bed load. According to the bed load sediment budget observations in 2016 and 2023, as well as the radiocesium dating of floodplain sediments, the accumulation rate on the floodplain within the broader section of the valley floor is $4,8\text{--}5,6 \pm 1,0 \text{ mm/year}$ over the total period since its origination (120 years). During 2016–2023 the volume of annual channel erosion within the same section is 1260 tons/year. The nine-fold difference between the average diameter of the bed load sediments and the median diameter of the floodplain sediments within the broader section of the valley floor indicates that the main deposition events are related to extreme floods with less frequent water discharges.

Keywords: bed load, ^{137}Cs , sediment budget, periglacial catchments, small rivers catchments

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the staff and students at the Djankuat glacial station of the MSU Faculty of Geography for their assistance during fieldwork. Particular thanks are due to I.V. Zheleznova, Yu.A. Zubikhina, M.E. Zubova, I.A. Suchkova, S.V. Kharchenko and A.S. Gubanov for their assistance in measuring the bedload and water discharge, to O.I. Turchinskaya, V.A. Efimov, V.O. Bazilova, E.D. Panchenko and M.A. Tereshina for the filed photo of the floodplain, to M.M. Ivanov for his assistance in the processing of samples, to E.D. Kornilova and E.P. Retz for consulting and providing hydrometeorological data, and to the Head of the glacial station V.V. Popovnin, for his support and assistance in the study. Analytical part of the study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation under the Agreement No 075-15-2024-614 under the framework of the state task No 121051100166-4 of the Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes of the Lomonosov Moscow State University.

REFERENCES

- Alejnikova A.M., Petrushina M.N. Struktura i dinamika prilednikovyh landshaftov Priel'brus'ya [The structure and dynamics of periglacial landscapes in Prielbrusie], *Lyod i Sneg*, 2011, vol. 2, no 114, p. 127–134. (In Russian)
- Bollati I.M., Cavalli M. Unraveling the relationship between geomorphodiversity and sediment connectivity in a small alpine catchment, *Transactions in GIS*, 2021, vol. 25, no. 5, DOI: 10.1111/tgis.12793.
- Cavalli M., Trevisani S., Comiti F. et al. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments, *Geomorphology*, 2013, vol. 188, p. 31–41, DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.05.007.
- Chernomorec S.S., Petrakov D.A., Alejnikov A.A. et al. The outburst of Bashkara glacier lake (Central Caucasus, Russia) on September 1, 2017, *Earth's Cryosphere*, 2018, vol. 22, no. 2, p. 61–70.
- Chernomorec S.S., Petrakov D.A., Krylenko I.V. et al. Dinamika lednikovo-ozernogo kompleksa Bashkara i ot-senka selevoj opasnosti v doline reki Adyl-Su (Kavkaz) [Changes of the Bashkara glacier lake system and assessment of debris flow hazard in the Adyl-Su River valley], *Kriosfera Zemli*, 2007, vol. 11, no. 1, p. 72–84. (In Russian)
- Cypplenkov A.S. Identifikaciya dolevogo vклада razlichnyh istochnikov v stok nano-sov malyh gornyh rek zony sovremennogo oledeneniya [Identification of the contribution of different sources into the sediment discharge for the small mountain rivers within the present-day glaciations zone], *Makkaveevskie chteniya – 2019* [Makkaveev Scientific Conference – 2019], Sbornik materialov ezhegodnogo nauchnogo seminara. Moscow, Geograficheskij fakul'tet MGU, 2020, p. 94–105. (In Russian)

- Dyurgerov M.B., Frejdlin V.S., Chernova L.P. [Suspended matter runoff in the Djankuat Glacier basin in summer 1970], *Materialy glaciologicheskikh issledovanij* [Materials of glaciological studies], 1972, vol. 19, p. 253–254. (In Russian)
- Engel M., Coviello V., Savi S. et al. Meltwater-driven sediment transport dynamics in two contrasting alpine proglacial streams, *Journal of Hydrology*, 2024, vol. 635, p. 131171.
- Geomorphology of Proglacial Systems: Landform and Sediment Dynamics in Recently Deglaciated Alpine Landscapes* (Geography of the Physical Environment), T. Heckmann, D. Morche (eds.), Cham, Springer International Publ., 2019, DOI: 10.1007/978-3-319-94184-4.
- Golubev G.N. *Gidrologiya lednikov* [Hydrology of glaciers], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1976, 24 p. (In Russian)
- Gray J.R., Laronne J.B., Marr J.D.G. *Bedload-surrogate monitoring technologies*, US Geological Survey Scientific Investigations Report, 2010, vol. 5091.
- Hallet B., Hunter L., Bogen J. Rates of erosion and sediment evacuation by glaciers: A re-view of field data and their implications, *Global and Planetary Change*, 1996, vol. 12, no. 1–4.
- Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides*, 2003, DOI: 10.1007/0-306-48054-9.
- Harchenko S.V., Golosov V.N., Cyplenkov A.S. et al. Tempy sovremennoj denudacii malogo vodosbora v srednegornom poyase Bol'shogo Kavkaza (na primere vodosbora Gitche-Gizhgit) [Rates of modern denudation of a small catchment in the middle mountain belt of the Greater Caucasus (case study of the Gitche-Gizhgit catchment)], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2023, vol. 78, no. 3, p. 38–51. (In Russian)
- Helley E.J., Smith W. *Development and calibration of a pressure-difference bedload sampler*, US Department of the Interior, Geological Survey, Water Resources Division, 1971.
- Hinderer M. From gullies to mountain belts: A review of sediment budgets at various scales, *Sedimentary Geology*, 2012, vol. 280, p. 21–59, DOI: 10.1016/j.sedg-geo.2012.03.009.
- Hinderer M., Kastowski M., Kamelger A. et al. River loads and modern denudation of the Alps – A review, *Earth-Science Reviews*, 2013, vol. 118, DOI: 10.1016/j.earsci-rev.2013.01.001.
- Ivanov M.M., Ivanova N.N., Golosov V.N., Shamshurina E.N. Assessing the accumulation of sorbed isotope ¹³⁷CS within the upper components of the fluvial network in the zone of Chernobyl contamination, *Geography and Natural Resources*, 2016, vol. 37, no. 4, p. 355–361.
- Karashev A.V. *Teoriya i metody rascheta rechnykh nanosov* [Theory and methods of river sediments calculation], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1977, 271 p. (In Russian)
- Kedich A., Kharchenko S., Tsyplenkov A. et al. Lateral moraine failure in the valley of the Djankuat Catchment (Central Caucasus) and subsequent morphodynamics, *Geomorphology*, 2023, vol. 441, DOI: 10.1016/j.geomorph.2023.108896.
- Kharchenko S., Tsyplenkov A., Petrakov D. et al. Causes and consequences of the streambed restructuring of the Koiavgan Creek (North Caucasus, Russia), *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 163, DOI: 10.1051/e3s-conf/202016302003.
- Koppes M.N., Montgomery D.R. The relative efficacy of fluvial and glacial erosion over modern to orogenic timescales, *Nature Geoscience*, 2009, vol. 2, no. 9, DOI: 10.1038/ngeo616.
- Kuz'menkova N.V., Golosov V.N., Grabenko E.A. et al. Skorosti osadkonakopleniya v gornyh ozerah Kavkaza kak indikatory tempov denudacii na ih vodosborah [Sedimentation rates evaluation in Caucasus Mountain lakes as indicators of their catchments denudation], *Izvestiya Rossijskoj Akademii Nauk, Seriya Geograficheskaya*, 2023, vol. 87, no. 1, p. 42–59, DOI: 10.31857/S2587556623010107. (In Russian)
- Lednik Dzhankuat: Centr. Kavkaz* [The Djankuat Glacier: Central Caucasus], I.Ya. Boyarsky (ed.), Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1978, 184 p. (In Russian)
- Mozzherin V.V., Sharifullin A.G. Ocenka sovremennogo denudacionnogo snizheniya gor po dannym o stoke vzveshennykh nanosov rek (na primere Tyan'-Shanya, Pamiro-Alaya, Kavkaza i Al'p) [Estimation of current denudation rate of the mountains based on the suspended sediment runoff of the rivers (the Tien Shan, the Pamir-Alai, the Caucasus and the Alps as an example)], *Geomorfologiya*, 2014, no. 1, p. 15–23, DOI: 10.15356/0435-4281-2014-1-15-23. (In Russian)
- Otto J.C., Schrott L., Jaboyedoff M. et al. Quantifying sediment storage in a high alpine valley (Turtmanntal, Switzerland), *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, vol. 34, no. 13, DOI: 10.1002/esp.1856.
- Popovnin V., Gubanov A., Lisak V. et al. Recent Mass Balance Anomalies on the Djankuat Glacier, Northern Caucasus, *Atmosphere*, 2024, vol. 15, no. 1, p. 107, DOI: 10.3390/atmos15010107.
- Porto P., Callegari G. Using ⁷Be measurements to explore the performance of the SEDD model to predict sediment yield at event scale, *Catena*, 2021, vol. 196, DOI: 10.1016/j.catena.2020.104904.
- Severnij Kavkaz, Resursy poverhnostnykh vod SSSR* [Northern Caucasus, Resources of surface waters in the USSR], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1973, vol. 8, 124 p. (In Russian)
- Rets E., Popovnin V.V., Toropov P.A. et al. Djankuat glacier station in the North Caucasus, Russia: A database of glaciological, hydrological, and meteorological observations and stable iso-tope sampling results during 2007–2017, *Earth System Science Data*, 2019, vol. 11, no. 3, DOI: 10.5194/essd-11-1463-2019.
- Schlunegger F., Hinderer M. Pleistocene/Holocene climate change, re-establishment of fluvial drainage network and increase in relief in the Swiss Alps, *Terra Nova*, 2003, vol. 15, no. 2, DOI: 10.1046/j.1365-3121.2003.00469.x.
- Sharifullin A.G. *Sovremennaya denudaciya v gorah Kavkaza i Srednej Azii: territorial'nye osobennosti i faktory, ih opredelyayushchie* [Current denudation in the mountains of the Caucasus and the Middle Asia: territorial features and the governing factors], Kazan, Kazanskij (Privolzhskij) federal'nyj universitet, 2015, 22 p. (In Russian)
- Syvitski J.P.M., Milliman J.D. Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean, *Journal of Geology*, 2007, vol. 115, no. 1, DOI: 10.1086/509246.
- Tielidze L.G., Nosenko G.A., Khromova T.E. et al. Strong acceleration of glacier area loss in the Greater Caucasus between 2000 and 2020, *Cryosphere*, 2022, vol. 16, no. 2, DOI: 10.5194/tc-16-489-2022.

- Tsyplenkov A., Vanmaercke M., Collins A.L. et al. Elucidating suspended sediment dynamics in a glacierized catchment after an exceptional erosion event: The Djankuat catchment, Caucasus Mountains, Russia, *Catena*, 2021, vol. 203, DOI: 10.1016/j.catena.2021.105285.
- Tsyplenkov A., Vanmaercke M., Golosov V. Contemporary suspended sediment yield of Caucasus mountains, *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2019, vol. 381, DOI: 10.5194/piahs-381-87-2019.
- Tsyplenkov A., Vanmaercke M., Golosov V. et al. Suspended sediment budget and intra-event sediment dynamics of a small glaciated mountainous catchment in the Northern Caucasus, *Journal of Soils and Sediments*, 2020, vol. 20, no. 8, DOI: 10.1007/s11368-020-02633-z.
- Verhaegen Y., Huybrechts P., Rybak O. et al. Modelling the evolution of Djankuat Glacier, North Caucasus, from 1752 until 2100CE, *Cryosphere*, 2020, vol. 14, no. 11, DOI: 10.5194/tc-14-4039-2020.
- Zemp M., Frey H., Gärtner-Roer I. et al. Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century, *Journal of Glaciology*, 2015, vol. 61, no. 228, DOI: 10.3189/2015JoG15J017.

Received 06.07.2024

Revised 08.09.2024

Accepted 15.10.2024

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ И МАТЕРИАЛОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2024 Г.

Статья	DOI	№	Стр.
Акимов В.В., Чернецкий Ф.М. Трансформация территориальной структуры обрабатывающей промышленности Республики Корея в XXI в.	10.55959/MSU0579-9414.5.79.5.8	5	90
Алексеева Н.Н., Лопатников Д.Л., Банчева А.И. Изменение экологических характеристик стран – экономических гигантов Азии в контексте геоэкологического перехода	10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.3	2	31
Афанасьева А.О., Лебедева С.А. Экологическое состояние участка «Оглахты» Хакасского заповедника по результатам наблюдений 2022 г.	10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.3	1	37
Бакланов П.Я. Новые факторы и предпосылки экономического районирования России	10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.1	2	5
Балабейкина О.А., Коробущенко В.Ю. Сокращение числа сельских населенных пунктов в Республике Удмуртия с 1920-х до 2000-х гг.	10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.9	6	106
Битюкова В.Р., Дехнич В.С., Кравчик А.И., Касимов Н.С. Оценка влияния автономных систем отопления жилых строений на загрязнение воздуха в муниципальных образованиях (на примере Байкальского региона)	10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.2	1	22
Блажевич Ф.В., Слука Н.А. География «фабрик мысли»	10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.11	4	133
Бобровский Р.О., Горячко М.Д. Выявление кластеров высокотехнологичной промышленности на уровне регионов и городов России в 2015–2019 гг.	10.55959/MSU0579-9414.5.79.5.5	5	52
Болиховская Н.С., Молодьков А.Н. Климато-фитоценотические события позднего неоплейстоцена (МИС 5 – МИС 3) на юго-восточном побережье Финского залива	10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.8	3	89
Буданцева Н.А., Васильчук Ю.К., Васильчук А.К. Изоскейпы и палеоизотермы среднеянварской температуры воздуха в голоцене на севере Западной Сибири (по данным изотопно-кислородного состава повторно-жильных льдов)	10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.7	3	78
Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук Дж.Ю., Васильчук А.К., Чижова Ю.Н. Вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в атмосферных осадках Москвы в 2017–2019 гг.	10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.9	1	114
Высоцкая А.А., Медведков А.А. Климатогенные изменения растительности курумов запада Среднесибирского плоскогорья в зональных условиях средней тайги	10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.2	4	17
Голосов В.Н., Мавлюдов Б.Р., Харченко С.В., Навас А., Гаспар Л., Лизага И., Кастильо А. Сток наносов на малом приледниковом водосборе (остров Кинг Джордж (Ватерлоо), Антарктика)	10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.1	4	3
Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Сазонов А.А., Пахомова О.М., Поздняков С.П., Ван Пин. Связь между осадками, речным стоком и испаряемостью на европейской части России и ее изменчивость	10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.5	6	55
Дьяконов К.Н., Мазей Н.Г., Прокушкин А.С., Шатунов А.Е., Зазовская Э.П., Новенко Е.Ю. Депонирование углерода в карстовом болоте Мордовского заповедника в позднем голоцене	10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.3	4	30
Дьяконов К.Н., Пыленок П.И., Харитонова Т.И. Водный режим Окской поймы в условиях изменения климата как фактор ограничения природопользования	10.55959/MSU0579-9414.5.79.5.14	5	162
Дюжова К.В. Субрецентные спорово-пыльцевые спектры аллювиальных отложений рек Дон и Кубань и их значение при палеогеографических реконструкциях	10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.4	1	48
Екимовская О.А., Гриценюк А.П., Сороковой А.А., Шеховцов А.И., Сизых А.П. Современное состояние и эффективность реосвоения заброшенных сельскохозяйственных угодий в речных бассейнах юго-западного Забайкалья	10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.4	3	43
Елтай А.Г., Ивкина Н.И. Моделирование уровня в казахстанской части каспийского моря с помощью модели MIKE 21	10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.7	2	80
Ермолов А.А., Кажукало Г.А., Носков А.И., Огородов С.А. Рельеф дна Обской губы Карского моря	10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.7	1	89

Статья	DOI	№	Стр.
Жаринов С.Н., Голубева Е.И., Зимин М.В. Оценка пирогенного воздействия на лесные территории Тверской области	10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.10	1	125
Жуков И.А., Айбулатов Д.Н. Тенденции изменений водного режима малых рек бассейна Волги за период инструментальных наблюдений	10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.7	6	81
Иванов В.А., Голосов В.Н., Цыпленков А.С., Коноплев А.В. Влияние суммарного стока наносов на эрозионно-аккумулятивные процессы в долине ручья Джанкуат, Большой Кавказ	10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.11	6	129
Ильин В.И., Архипкин В.С. Особенности приливного водообмена в Курильских проливах по данным моделирования	10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.4	4	44
Ильинова Н.В., Хорошев А.В. Ландшафтные факторы варьирования фитомассы сельскохозяйственных угодий Оренбургского Предуралья	10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.6	6	67
Имангулов Л.Р., Корюхин Д.М. Миграция молодежи в предгорном Левашинском районе Дагестана	10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.12	2	146
Иовлев П.С., Бобров А.В., Романов М.С., Здравчев Н.С., Тимченко А.С., Кандидов М.В., Васеха Н.Д., Михайлова А.А., Стеванович М.Б., Купцов К.В., Сорокин А.Н. Расселение представителей семейства Liliaceae в связи со строением их репродуктивных органов	10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.1	3	3
Исаев А.В., Демаков Ю.П., Шарафутдинов Р.Н., Рыжова Л.В. Геохимические особенности аллювиальных почв среднего течения р. Большая Кокшага	10.55959/MSU0579-9414.5.79.5.3	5	27
Караваев В.А., Гуня А.Н., Аккиев М.И., Воскова А.В. Оценка состояния и перспектив экологического туризма на территории Кабардино-Балкарского высокогорного заповедника	10.55959/MSU0579-9414.5.79.5.11	5	124
Ковбашиш Д.И., Светлов Н.М., Дронин Н.М. Адаптация земледельческого проекта к регулированию выбросов парниковых газов	10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.3	3	32
Коноплев А.В., Иванов М.М., Комиссаров М.А., Голосов В.Н., Кузьменкова Н.В. Реконструкция долговременной динамики радиоцезия в водных объектах, загрязненных в результате ядерных аварий (Чернобыль и Фукусима)	10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.1	6	3
Котельянец Е.А., Совга Е.Е., Коновалов С.К. Пространственное распределение тяжелых металлов в донных отложениях бухт Севастопольского региона	10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.6	4	68
Котеньков С.А., Лобачева Д.М. Карта и записки Энгельберта Кемпфера 1697 г. Историко-географический анализ	10.55959/MSU0579-9414.5.79.5.10	5	114
Котеньков С.А., Макшаев Р.Р., Лобачева Д.М., Матлахова Е.Ю. Волго-Каспийский канал в XVIII веке: историко-географическая реконструкция судоходного маршрута	10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.12	3	150
Кохан А.В., Еременко Е.А., Мороз Е.А., Ермаков А.В., Соколов С.Ю. Флюидогенный рельеф на шельфах морей Арктики	10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.8	2	91
Кошелева Н.Е., Сычева Д.Г., Касимов Н.С. Геохимические особенности снежного покрова на территории МГУ имени М.В. Ломоносова	10.55959/MSU0579-9414.5.79.5.1	5	3
Крутов О.Д., Греля Н.К., Веприцкий А.А., Куксин Я.К., Назаренко Г.А., Прусихин О.Е., Широкова П.А., Крузе Ю.Л., Алексеев А.И. Новые сельские жители и формы их территориальной организации в Воскресенском округе Нижегородской области	10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.6	2	66
Кузина А.А., Минникова Т.В., Гайворонский В.Г., Колесников С.И., Ревина С.Ю. Лабораторное моделирование экологически безопасных концентраций мазута в почвах Крыма	10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.7	4	80
Куликова Ж.М., Добролюбов С.А. Объемные характеристики тихоокеанских вод в Северном Ледовитом океане	10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.12	1	141
Лисина А.А., Сазонов А.А., Фролова Н.Л., Крыленко И.Н., Мотовилов Ю.Г. Чувствительность водного стока р. Колымы к современным климатическим изменениям	10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.9	3	109
Лысенко Е.И., Ткач А.А., Макшаев Р.Р., Янина Т.А., Зенина М.А. Палеоэкологические условия в предельтовом районе Северного Каспия в голоцене	10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.5	1	61

Продолжение

Статья	DOI	№	Стр.
Лящевская М.С., Паничев А.М. Влияние позднеголоценовых изменений климата на лесные экосистемы Сихотэ-Алинского биосферного заповедника по данным спорово-пыльцевого анализа озерных отложений	10.55959/MSU0579-9414.5.79.5.6	5	65
Малахова В.В., Елисеев А.В. Чувствительность температуры придонного слоя морей арктического шельфа к температуре воздуха в XX–XXIII веках по данным СМIP6	10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.9	2	108
Манаенков А.С. Условия произрастания и выращивание дубрав на плакорах и склонах Приволжской и Ергенинской возвышенностей и равнинах Сало-Маньчского междуречья	10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.5	3	53
Мысленков С.А. Анализ высоты ветровых волн и продолжительности безледного периода вдоль Северного морского пути с 1979 по 2021 г.	10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.11	2	134
Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г., Кукушкин С.Ю., Янсон С.Ю. Минералого-геохимические особенности снежного покрова на антропогенно нарушенных территориях Надым-Пуровского междуречья (север Западной Сибири)	10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.2	3	17
Пахомова О.М., Григорьев В.Ю., Сазонов А.А., Повалишников Е.С., Фролова Н.Л. Гидрологический режим водотоков и проблемы водоснабжения населения Республики Калмыкия	10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.1	1	3
Петров Н.А., Чубарова Н.Е. Влияние парниковых газов и атмосферного аэрозоля на коротковолновую и длинноволновую радиацию для условий безоблачного неба	10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.2	6	15
Романов А.А., Коблик Е.А., Редькин Я.А. Пространственная организация населения птиц островов Уруп и Итуруп (Курильские острова)	10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.8	1	103
Савельева К.В., Дженз Д., Рожкова А.К., Шлык Д.Х., Токарь Э.А., Воробьева Т.А., Кузьменкова Н.В. Природные радионуклиды и цезий-137 в почвах и донных осадках озера Ханка	10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.5	2	54
Савенко А.В., Савенко В.С., Иванова И.С. Содержание фтора в поверхностных и подземных водах Ямало-Ненецкого автономного округа	10.55959/MSU0579-9414.5.79.5.13	5	155
Сатосина Е.М., Гуцина Д.Ю., Тарасова М.А., Железнова И.В., Емельянова Е.Р., Гибадуллин Р.Р., Осипов А.М., Ольчев А.В. Влияние аномалий температуры и осадков на потоки диоксида углерода во внетропических лесах Северного полушария	10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.2	2	19
Свиточ А.А., Макшаев Р.Р., Ключевкина Т.С., Ткач А.А. К вопросу о гирканских отложениях нижней Волги	10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.9	4	109
Синюткина А.А., Гашкова Л.П., Харанжевская Ю.А. Пирогенное изменение болотной растительности и торфа в Западной Сибири	10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.6	1	78
Смирнова А.А. Географические факторы ревитализации сельских населенных пунктов «без населения»	10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.11	1	133
Сумачев А.Э., Пряхина Г.В., Сыромятина М.В., Кузнецова М.Р., Павловский А.А., Осипова Т.Н., Матвеева И.Г., Лемешко Н.А. Гидрологический режим рек Ростовской области в условиях изменения климата	10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.8	6	91
Сумкина А.А., Иванов В.В., Кивва К.К. Тепловой баланс поверхности Баренцева моря в холодный период года	10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.10	3	124
Красовская Т.М., Лукьянов Л.Е., Тикунов В.С. Сохранение природоохранных функций городских заказников в условиях рекреационной нагрузки	10.55959/MSU0579-9414.5.79.5.2	5	17
Тарбеева А.М., Крыленко И.В., Сурков В.В., Михайлова Н.М. Современные процессы в четковидных руслах степных рек Хоперско-Бузулукской равнины	10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.11	3	136
Терешина М.А., Ерина О.Н., Соколов Д.И. Оценка чувствительности одномерной модели озера к входным данным	10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.6	3	64
Ткач А.А., Ткач Н.Т., Зенина М.А., Янина Т.А. Витальные изотопные смещения кислорода остракод Каспийского региона	10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.4	6	41
Трофимов И.А., Трофимова Л.С., Яковлева Е.П., Алябина И.О., Урусевская И.С., Шоба С.А. Агроландшафтно-экологическое районирование природных кормовых угодий регионов России	10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.4	2	43

Окончание

Статья	DOI	№	Стр.
<i>Хасая Н.М., Гречко Е.А.</i> Географические различия глубины интеграции общих рынков	10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.3	6	30
<i>Хорошев А.В.</i> Концепция структурной карты геосистем	10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.5	4	55
<i>Чалов Р.С., Голубцов Г.Б., Завадский А.С., Куракова А.А.</i> Условия формирования и особенности морфодинамики разветвленного русла среднего Иртыша	10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.10	4	119
<i>Чендев Ю.Г., Геннадиев А.Н., Смирнова М.А., Лебедева М.Г.</i> Лесные полосы как фактор почвообразования в агроландшафтах юга Среднерусской возвышенности	10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.8	4	94
<i>Чепурная А.А., Новенко Е.Ю.</i> Реконструкция растительности и климата долины р. Теберды (Западный Кавказ) в позднем голоцене по палинологическим данным	10.55959/MSU0579-9414.5.79.5.7	5	78
<i>Черкашин А.К., Распутин Е.А.</i> Математико-статистический анализ геоизображений для изучения пространственной организации геосистем	10.55959/MSU0579-9414.5.79.5.4	5	40
<i>Чучкалов А.С., Зырянов Г.А., Мартемьянов Д.В.</i> Социально-экономическая трансформация сельских населенных пунктов пригородного района Чебоксар за последнее 30 лет	10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.10	2	121
<i>Шайфуллин М.Р., Гордиенко О.А., Кулик А.В.</i> Особенности пространственного распределения мощностей органогенных и гумусовых горизонтов почв в лесомелиорированных ландшафтах сухостепной зоны	10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.10	6	116
<i>Щеглова Е.А., Дохов Р.А.</i> Деконцентрация или децентрализация? Пространственная динамика логистики в Лос-Анджелесе и Чикаго	10.55959/MSU0579-9414.5.79.5.9	5	101
<i>Щитова Н.А., Зольникова Ю.Ф., Соловьев И.А., Белозеров В.С.</i> Географические особенности адаптации иностранных студентов в России	10.55959/MSU0579-9414.5.79.5.12	5	141

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ СТАТЕЙ К ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. СЕРИЯ 5. ГЕОГРАФИЯ»

Общие требования к статье

Журнал «Вестник Московского университета. Серия 5. География» публикует результаты оригинальных исследований в различных областях географической науки, теоретические, методические и обзорные статьи, представляющие интерес для мирового научного сообщества. Представленные к опубликованию материалы должны соответствовать формальным требованиям журнала, пройти процедуру слепого рецензирования и получить рекомендацию к публикации на заседании редколлегии журнала. Решение о публикации принимается на основе научной значимости и актуальности представленных материалов. Статьи, отклоненные редакционной коллегией, повторно не принимаются и не рассматриваются.

Объем статьи (текст, таблицы, список литературы, рисунки, перевод на английский) не должен превышать 1 а. л. (40 тыс. печатных знаков, включая пробелы, 5 рисунков), не более 50 тыс. знаков для обзорных статей. Объем кратких сообщений составляет 0,25 а. л. Рекомендуемый список литературы – до 30 наиболее актуальных работ по рассматриваемому вопросу. В обзорных статьях список литературы не должен превышать 60 источников. Для кратких сообщений список литературы может быть до 10 источников. Самоцитирований в списке литературы не должно быть более 10% от общего числа использованных источников.

Статья должна быть четко структурирована и включать рубрики: введение; материалы и методы исследований; результаты исследований и их обсуждение; выводы; список литературы.

Все материалы статьи компонуются **в единый сводный файл в формате Word** и размещаются в нем в следующей последовательности:

1. УДК;
2. Название статьи;
3. Инициалы и фамилия автора(ов);
4. Для каждого автора приводится полное название учреждения, в котором выполнялось исследование, подразделение (кафедра, лаборатория и т. п.), уч. степень, должность, *e-mail*;
5. Аннотация статьи;
6. Ключевые слова;
7. Текст статьи;
8. Благодарности, в том числе – финансирование;
9. Список литературы;
10. Таблицы;
11. Подписи;
12. Рисунки;
13. Перевод на английский язык пунктов 2–6, 8–9;
11. В пункте 4 просьба использовать в переводе официальное наименование организации на английском языке (а не собственный вариант перевода).

Подготовка текста

Текст набирается 12 кеглем через один интервал, поля слева, сверху и снизу – 2 см, справа – 1,5 см. Не допускается использование табулятора или пробелов для обозначения абзаца, ручных переносов в словах, переносов строк клавишей Enter в рамках одного предложения, разрывов страниц и разделов. В тексте статьи возможно использование полужирного шрифта и курсива для смысловых выделений, однако не должно использоваться подчеркивание. Десятичная часть чисел отделяется запятой.

Формулы набираются в редакторе формул в отдельную строку и имеют сквозную нумерацию по всей статье, выровненную по правому краю строки.

Таблицы набираются в Word, не допускается разделение ячеек косой линией. Ручные переносы не допускаются.

Рисунки представляются отдельными файлами, названными по их номерам (например: рис.1.tiff, рис.2.jpg), в графическом формате (eps, tif, jpg) разрешением не менее 300 dpi для полутоновых и 600 dpi для черно-белых изображений и графиков. Для графиков, выполненных в Excel, дополнительно прикладываются соответствующие файлы Excel. Картинки должны быть полностью готовы к изданию. Представление рисунков в виде схем Word или набранного текста с добавлением графических элементов, наложенных сверху, **не допускается**.

Ссылка на источник в тексте документа указывается в квадратных скобках. В тексте ссылки через запятую указывается фамилия автора и год издания. Если ссылок несколько – они отделяются друг от друга точкой с запятой. Ссылка на источник на иностранном языке указывается на языке оригинала. Список русскоязычной литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1–2003, 7.82–2001 и 7.0.5–2008. DOI (при наличии) указывается в конце ссылки. Ссылка на источник на английском языке оформляется единообразно и в русскоязычном, и в переведенном на английский язык списке литературы. **При наличии у русскоязычного издания, которое фигурирует в списке литературы, оригинальной или переводной англоязычной версии в ссылке должна быть указана именно она, а не русскоязычный вариант.**

Более подробные инструкции по подготовке статей для авторов можно найти на сайте журнала <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/index>. Статьи, оформленные не по правилам, будут возвращаться автору на переработку.

Статьи принимаются на географическом факультете в редакции, через сайт журнала и по электронной почте.

Редакция: комната 2108а, тел. +7(495)9392923. Сайт журнала <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/index>. Электронная почта: vestnik_geography@mail.ru.

Плата за публикацию не взимается

УЧРЕДИТЕЛИ:

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;
географический факультет МГУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

С.А. ДОБРОЛЮБОВ, доктор географических наук, профессор, академик РАН (главный редактор)
В.С. ТИКУНОВ, доктор географических наук, профессор (зам. главного редактора)
Е.А. ЕРЕМЕНКО, кандидат географических наук (ответственный секретарь)
А.И. АЛЕКСЕЕВ, доктор географических наук, профессор
С.И. БОЛЫСОВ, доктор географических наук, профессор
А.Н. ГЕННАДИЕВ, доктор географических наук, профессор
К.Н. ДЬЯКОНОВ, доктор географических наук, профессор, член-корреспондент РАН
С.С. ЗИЛИТИНКЕВИЧ, доктор географических наук, профессор (Метеорологический институт Финляндии)
О.Г. ЗОЛИНА, профессор (Университет Ж. Фурье, г. Гренобль, Франция)
В.Ю. ИВАНОВ, профессор (Мичиганский университет, США)
Н.С. КАСИМОВ, доктор географических наук, профессор, академик РАН
А.В. КИСЛОВ, доктор географических наук, профессор
В.А. КОЛОСОВ, доктор географических наук, профессор
К.П. КОЛТЕРМАНН, профессор
М. КОНЕЧНЫ, профессор (Университет г. Брно, Чешская Республика)
С.Б. КРООНЕНБЕРГ, профессор (Технологический университет г. Делфт, Нидерланды)
С.М. МАЛХАЗОВА, доктор географических наук, профессор
Г. МОУРИ, профессор (Университет г. Токио, Япония)
С.А. СОКРАТОВ, кандидат географических наук, PhD
П.Е. ТАРАСОВ, доктор наук, профессор (Берлинский Свободный университет, Германия)
Н.Л. ФРОЛОВА, доктор географических наук, профессор
В.Е. ШУВАЛОВ, кандидат географических наук, доцент
Т.А. ЯНИНА, доктор географических наук, профессор
В.В. ЯНКО-ХОМБАХ, доктор геолого-минералогических наук, профессор (Институт прикладных исследований Авалон, г. Виннипег, Канада)

EDITORIAL BOARD:

S.A. DOBROLUBOV, doctor of science, Academician of the Russian Academy of Sciences, professor (Editor-in-chief)
V.S. TIKUNOV, doctor of science, professor (Deputy Editor-in-chief)
E.A. EREMENKO, candidate of science (Secretary-General)
A.I. ALEKSEEV, doctor of science, professor
S.I. BOLYSOV, doctor of science, professor
A.N. GENNADIYEV, doctor of science, professor
K.N. D'YAKONOV, doctor of science, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, professor
S.S. ZILITINKEVICH, doctor of science, professor (Finnish Meteorological Institute, Finland)
O.G. ZOLINA, professor (Fourier University, Grenoble, France)
V.YU. IVANOV, professor (Michigan University, USA)
N.S. KASIMOV, doctor of science, academician of the Russian Academy of Sciences, professor
A.V. KISLOV, doctor of science, professor
V.A. KOLOSOV, doctor of science, professor
K.P. KOLTERMANN, professor
M. KONECNÝ, professor (Masaryk University, Faculty of Science, Czech Republic)
S.B. KROONENBERG, professor (Delft University of Technology, Department of Applied Earth Sciences, Netherlands)
S.M. MALKHAZOVA, doctor of science, professor
G. MOURI, professor (University of Tokyo, Japan)
S.A. SOKRATOV, candidate of science, PhD
P.E. TARASOV, professor (Free Berlin University, Germany)
N.L. FROLOVA, doctor of science, professor
V.E. SHUVALOV, candidate of science, associate professor
T.A. YANINA, doctor of science, professor
V.V. YANKO-KHOMBACH, doctor of science, professor (Avalon Institute of Applied Sciences, Winnipeg, Canada)

Номер подготовили члены редколлегии
Т.Я. ЯНИНА, К.Н. ДЬЯКОНОВ

Редактор **Е.С. Повалишникова**

Адрес редколлегии:

119992, Москва, Ленинские горы, МГУ,
географический факультет, комн. 2108а. Тел. 7(495) 939-29-23

Журнал зарегистрирован в Министерстве печати и информации РФ.
Свидетельство о регистрации № 1552 от 14 февраля 1991 г.

Подписано в печать 00.00.2016. Формат 60×90/8.
Гарнитура Times New Roman. Бумага офсет. № 1. Офсетная печать. Усл. печ. л.
Уч.-изд. л. 00. Тираж экз. Изд. № 00000. Заказ №

Типография МГУ.
119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 15.