

III Международная научная конференция

«Геоэкологическая оценка бассейнов горных рек:

теоретико-методологические
и методические аспекты,
региональные исследования»

г. Феодосия (пгт Курортное), Россия
24-25 апреля 2025 г.

Материалы конференции



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»
Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова
Институт геологии Дагестанского федерального исследовательского центра РАН
Федеральный университет Рио-де-Жанейро
Центр морских и прибрежных исследований Гвинеи

Геоэкологическая оценка бассейнов горных рек: теоретико-методологические и методические аспекты, региональные исследования

III Международная научная конференция

Материалы докладов

24–25 апреля 2025 г.
г. Феодосия (пгт Курортное), Россия

Севастополь
ФИЦ ИнБИОМ
2025

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation
A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS
Millionshchikov Grozny State Oil Technical University
Institute of Geology of the Daghestan Federal Research Centre of RAS
Federal University of Rio de Janeiro
Marine and Coastal Research Center of Guinea

Geoecological Assessment of Mountain River Basins: Theoretical, Methodology and Methodical Aspects, Regional Research

The III International Scientific Conference

Book of abstracts

24–25 April, 2025
Feodosia, Kurortnoye, Russia

Sevastopol
IBSS
2025

УДК [502/504:556.51](23)

ББК 26.38

Г36

Конференция проводилась при финансовой поддержке проекта Российской Федерации в лице Минобрнауки России — гранта в форме субсидий на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технического развития (соглашение № 075-15-2024-644) «Динамика геоэкологического состояния бассейнов горных рек Северо-Восточного Кавказа, Азербайджана и Ирана в условиях изменения климата и растущей антропогенной нагрузки».

Г36 **Геоэкологическая оценка бассейнов горных рек: теоретико-методологические и методические аспекты, региональные исследования** : материалы докладов III Международной научной конференции, 24–25 апреля 2025 г., Феодосия (пгт Курортное), Россия. Севастополь : ФИЦ ИнБЮМ, 2025. 149 с. EDN: [TCKUDY](#).

ISBN 978-5-6052832-3-2

В сборнике представлены материалы III Международной научной конференции «Геоэкологическая оценка бассейнов горных рек: теоретико-методологические и методические аспекты, региональные исследования». Рассмотрены теоретические и методологические подходы к оценке состояния окружающей среды в районах бассейнов горных рек, а также практические аспекты применения современных технологий, таких как ДЗЗ и ГИС. Особое внимание уделено региональным исследованиям и анализу особенностей пространственной структуры, функционирования и современного состояния ландшафтов горных речных бассейнов. Также обсуждаются проблемы антропогенной трансформации ландшафтов и возможности использования искусственного интеллекта в практике геоэкологических исследований.

УДК [502/504:556.51](23)

ББК 26.38

Geoecological Assessment of Mountain River Basins: Theoretical-Methodological and Practical Aspects, Regional Studies : book of abstracts of the III International Scientific Conference, 24–25 April, 2025, Feodosia, Kurortnoye, Russia. Sevastopol : IBSS, 2025. 149 p. EDN: [TCKUDY](#).

The proceedings include materials from the III International Scientific Conference “Geoecological Assessment of Mountain River Basins: Theoretical-Methodological and Practical Aspects, Regional Studies.” The papers cover theoretical and methodological approaches to assessing the environmental state of mountain river basins, alongside practical applications of advanced technologies, such as remote sensing and geographic information systems (GIS). Particular attention is devoted to regional studies, as well as the analysis of the spatial structure, functioning, and current condition of landscapes within mountain river basins. The issues of anthropogenic transformation of landscapes and the potential for employing artificial intelligence in geoecological research are also explored. This proceedings are intended for researchers and professionals in geoecology, landscape science, natural resource management, and environmental protection.

*Сборник публикуется по решению учёного совета ФИЦ ИнБЮМ
(протокол № 9 от 15.09.2025).*

ISBN 978-5-6052832-3-2

© Авторы, 2025

© ФИЦ ИнБЮМ, 2025

Содержание

| | |
|---|----|
| Ануфриева Е. В., Шадрин Н. В., Гассиев Д. Д., Шапова Е. П., Ржечицкий Я. А., Черкашина С. А. Затенённость горных рек как важный недоучитываемый фактор их экологического статуса | 7 |
| Атаев З. В. Высокогорные нивально-гляциальные ландшафты верховий рек Богосского хребта (Северо-Восточный Кавказ): пространственная структура и климатическая изменчивость | 10 |
| Атаев З. В. Пространственно-временная экотонность ландшафтов контактной горно-равнинной полосы российского Кавказа | 16 |
| Атаев З. В. Реакция аридных ландшафтов бассейнов рек Российского Прикаспия на современные климатические изменения | 28 |
| Батукаев А. А., Керимов И. А. Методы обработки метеорологических данных станции Campbell с использованием библиотек языка R | 35 |
| Братанов Н. С., Фам К. Н., Горбунов Р. В., Горбунова Т. Ю., Samara A. I., Sow B. B., Фаерман А. В., Табунщик В. А., Diallo A. I. P., Keita I. Сезонные изменения содержания тяжёлых металлов в почвах бассейна реки Фатала (Гвинейская Республика) | 42 |
| Гагаева З. Ш., Керимов И. А. История изучения климата Северного Кавказа в XVIII–XX вв. | 47 |
| Гайрабеков У. Т., Музаев И. Х. Бассейн реки Гумс: условия и особенности формирования растительных поясов | 51 |
| Гелагаев А. Ш. Геоэкологическое состояние реки Сунжа: аналитический обзор | 55 |
| Голубев Ф. М., Глухов А. А., Капинус Э. Ю. Особенности формирования цифровых моделей поверхности различного масштаба и точности в условиях сложной структуры рельефа | 59 |
| Дрыгваль П. В., Дрыгваль А. В. Изменение температуры воздуха в бассейнах рек Каспийского моря (1961–2023 гг.) | 64 |
| Забураева Х. Ш., Забураев Ч. Ш., Шаипова А. А. Гидрорекреационный потенциал горного региона (на примере Чеченской Республики) | 68 |
| Игнатьева Д. А., Горбунова Т. Ю., Алексеев Я. И., Горбунов Р. В., Монахова Ю. А., Шварцев А. А., Братанов Н. С., Keita I., Diallo A. I. P. Изучение сезонной динамики бактериального разнообразия почв бассейна реки Фатала (Гвинейская Республика) методом метагеномного анализа | 73 |

| | |
|--|-----|
| Каширина Е. С., Панкеева Т. В. Геоэкологическая оценка ландшафтов бассейна реки Чёрная (Крымский полуостров) | 79 |
| Курашева О. А. Концентрации неорганических соединений азота в реке Черек от её истока до выхода в предгорную зону (КБР) | 83 |
| Лубков А. С., Вышкваркова Е. В., Воскресенская Е. Н., Щодро А. Е. Применение модели искусственной нейронной сети для прогнозирования паводков в Горном Крыму | 86 |
| Малахова Л. В., Табунщик В. А., Малахова Т. В., Мосейченко И. Н. Оценка поступления хлорорганических соединений и диэтилгексилфталата из снежного покрова в Симферопольское водохранилище (Крымский полуостров) | 91 |
| Мамаев С. А., Курбанисмаилова А. С., Сулейманова Ф. В., Мамаев А. С., Ахмедов А. С., Гусейнова А. Ш., Исаева Н. А. Развитие опасных геологических процессов в бассейне реки Сулак на Восточном Кавказе в связи с изменяющимися климатическими условиями | 96 |
| Никифорова А. А., Табунщик В. А. Динамика значений комплексного индекса загрязнения атмосферы в бассейне реки Сунжа в 2019–2024 гг. | 101 |
| Петренко А. Е. Геоэкологическое состояние поверхностных источников в бассейнах рек Горного Крыма | 107 |
| Решетняк О. С. Оценка трансформации химического состава речных вод как динамичного компонента ландшафтов европейской части России | 112 |
| Скок Н. В., Юровских А. М., Иванова Ю. Р. Геоэкологическая ситуация водосборной территории малых рек в горной полосе Среднего Урала на примере ландшафтного заказника «Гора Шунут-Камень» | 119 |
| Сулейманов В. К., Мамаев С. А., Черкашин В. И., Идрисов И. А., Ибаев Ж. Г. Условия и факторы развития экзогенных геологических процессов в бассейнах рек Горного Дагестана | 124 |
| Табунщик В. А., Никифорова А. А., Линёва Н. П., Дрыгваль П. В., Горбунов Р. В., Горбунова Т. Ю., Фам К. Н., Керимов И. А., Братанов Н. С., Киселёва М. В. Пространственно-временная изменчивость поля содержания формальдегида в юго-западной части водосборного бассейна Каспийского моря | 128 |
| Эльжаев А. С., Додуев А. А. Определение уровня подземных вод методом ВЭЗ в пределах бассейна реки Сунжа (на примере участка «Черноречье») | 132 |
| Чигирова Л. Б. Методы определения расходов воды малых горных рек на примере Кабардино-Балкарской Республики | 137 |
| Miranda F., Rezende O., Haddad A., and Miguez M. A novel index for flash flood mapping in GIS environment: Case study in Brazil | 142 |

УДК 574.5

Затенённость горных рек как важный недоучитываемый фактор их экологического статуса

Ануфриева Е. В.¹, Шадрин Н. В.¹, Гассиев Д. Д.¹, Шапова Е. П.², Ржечицкий Я. А.²,
Черкашина С. А.²

¹ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», Севастополь, Россия

²НИИ биологии ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет», Иркутск, Россия

✉ lena_anufrieva@mail.ru

Рассмотрена роль недоучитываемого фактора затенённости в экологии горных рек. На основе собственных и литературных данных показано влияние этого фактора на образование биоплёнок, концентрацию кислорода, содержание омега-3 — полиненасыщенных жирных кислот в биомассе гидробионтов. Сделан вывод о необходимости учёта фактора затенённости при оценке экологических особенностей экосистем горных рек.

Ключевые слова: горные реки, затенённость, освещённость, кислород, ПНЖК

Наличие нескольких факторов экстремальности и особенности экосистем горных рек позволяют отнести их к типу полиэкстремальных [1]. Как и все речные экосистемы, они являются проточными системами; к ним неприменимы точечные модели, их следует рассматривать с точки зрения концепции речного континуума [2]. Понятие речного континуума — продольная описательная модель экологического функционирования рек, включающая в себя биологические сообщества, геоморфологию, гидродинамику и т. д. Она основана на целостном видении водотоков, от их истоков до устьев, которые должны рассматриваться как водные экосистемы во взаимодействии с морем, уровнем грунтовых вод, берегами, прибрежными лесами и всем гидрологическим контекстом. В этом контексте прежде всего следует остановиться на звене река — прибрежные леса. Стоит вспомнить, что рек на планете до появления лесов примерно 390 млн лет назад не могло быть и не было, были только временные водотоки [5]. Речных русел не было вообще, так как не было деревьев с развитой корневой системой, которые с того времени формируют и стабилизируют речные русла. С тех пор леса обуславливают функционирование и устойчивость речных экосистем, влияя на них разными путями [2].

Идею о «вписанности» рек в общеприродный контекст впервые чётко сформулировал выдающийся английский физик Д. Тиндаль в XIX в. в своей знаменитой книге «Формы воды в виде облаков, рек, льда и ледников»: «Следуя по нашей реке, от впадения её в море до истока, мы, если не разрывать эту цепь явлений, доходим до самого Солнца» [4]. Он же чётко сформулировал важность поступающей в реки солнечной энергии для функционирования речных систем. В то же время этот фактор во многих экологических построениях функционирования рек сейчас учитывается недостаточно комплексно, а некоторые аспекты часто вообще упускаются из виду. Один из них — степень затенённости поверхности реки.

На затенение поверхности горной реки могут влиять лесная растительность и формы рельефа, при этом степень затенённости варьирует в широких пределах вдоль русла и меняется неодинаково в течение суток на разных участках. Например, в разные дни июля 2024 г. на горной реке Большая Котинка (впадает в Байкал) авторы одновременно проводили измерение освещённости на поверхности воды и концентрации кислорода в воде на расположенных рядом двух участках реки — на совсем не затенённом и сильно затенённом древесной растительностью. В одной точке освещённость днём менялась от 1500 до 7460 лк, а в другой — от 450 до 3200 лк. Различалась и концентрация кислорода в этих точках; так, в один из дней она составляла 14,4 и 12,7 мг·л⁻¹ соответственно. Эти различия в концентрации кислорода в двух точках объясняются тем, что в первой на камнях наблюдалось хорошее развитие альгобактериальной фотосинтезирующей биоплёнки, а в затенённом месте на камнях

её практически не было. В реках с быстрым течением основной вклад вносят биоплёнки, образующиеся на поверхности камней; доля фитопланктона здесь близка к нулю [2]. Фотосинтез при низкой освещённости также не может быть значительным. Измерения на этих точках в разные дни показали, что в пасмурные дни без солнца различия в показателях освещённости были выражены слабее. Поэтому соотношение автохтонного и аллохтонного органического вещества, поступающего в бентосные трофические сети, зависит и от степени затенения: чем она выше, тем большую роль играет аллохтонная органика, в основном опад листьев с деревьев [6, 7]. Соотношение доли двух источников в формировании пула органического вещества в горных реках — важная функциональная характеристика их экосистем.

Затенение комплексно влияет на состояние и функционирование экосистем рек и на их биоресурсы. Исследования показали, что ценный вид лососёвых рыб хариус в сибирских реках из незатенённых участков имеет в своей биомассе в два раза более высокое содержание омега-3 — полиненасыщенных жирных кислот (далее — ПНЖК), чем хариус из тех участков, которые затенены лесом [8]. На затенённых участках в реку с берега попадает значительно больше наземных насекомых и других членистоногих, чем продуцируется в реке, а в незатенённых наоборот [6, 8]. В биомассе наземных членистоногих содержится существенно меньше омега-3 — ПНЖК, чем в биомассе речных обитателей [6, 8]. Это объясняется тем, что омега-3 — ПНЖК синтезируются водорослями, но не наземными растениями.

Всеядные рыбы, живущие в небольших затенённых реках, питаются и водными, и наземными беспозвоночными, с преобладанием последних (около 40 % рациона). Те же самые виды рыб из незатенённых рек имеют в рационе существенную долю водных беспозвоночных (около 95 % рациона), что и объясняет более высокое содержание омега-3 [8]. Следует отметить, что омега-3 — ПНЖК являются эссенциально важными элементами питания; их недостаток в пище может нарушать нормальное развитие детей и вести к тяжёлым заболеваниям [3]. Рыба из затенённых и незатенённых участков реки будет иметь разную пищевую ценность. Всё это показывает, что фактору затенения при изучении конкретных горных рек, особенно малых, следует уделять большее внимание, оценивая их специфику и функционирование.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Экосистемы экстремальных местообитаний Азово-Черноморского бассейна и других регионов: биоразнообразие, функционирование, динамика и биоресурсный потенциал» (№ гос. регистрации 124030100107-9).

Список использованных источников

1. Ануфриева Е. В., Шадрин Н. В. Жизнь в экстремальной среде. Животные в экосистемах гиперсолёных вод. Москва : Тов-во научных изданий КМК, 2023. 183 с. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/12719>. EDN: YVUIER
2. Богатов В. В., Федоровский А. С. Основы речной гидрологии и гидробиологии. Владивосток : Дальнаука, 2017. 384 с. EDN: YOHSJZ
3. Махутова О. Н., Гладышев М. И. Незаменимые полиненасыщенные жирные кислоты в физиологии и метаболизме рыб и человека: значение, потребности, источники // Российский физиологический журнал им. И. М. Сеченова. 2020. Т. 106, № 5. С. 601–621. EDN: PKYGZE
4. Тиндаль Д. Формы воды в виде облаков, рек, льда и ледников. Пер. с англ. [под ред. К. Л. Кирпичева]. Санкт-Петербург : Ред. журн. «Знание», 1876. 215 с.
5. Шадрин Н. В. Дополнительность общего и уникального, случайность и необходимость в экологии водоёмов. Москва : Тов-во научных изданий КМК, 2024. 138 с. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/14434>. EDN: FCXQEX
6. Bogatov V. V., Sushchik N. N., Makhutova O. N., Kolmakova A. A., Gladyshev M. I. Allochthonous and autochthonous food sources for zoobenthos in a forest stream // Russian Journal of Ecology. 2021. Vol. 52, no. 3. P. 253–256. <https://doi.org/10.1134/S1067413621030048>. EDN: DMIPLG

7. Bogatov V. V., Sushchik N. N., Kolmakova A. A., Gladyshev M. I. Allochthonous versus autochthonous carbon subsidies in small river food webs depend on seasonality and riparian tree species // Aquatic Sciences. 2024. Vol. 86, iss. 2. Art. no. 41. <https://doi.org/10.1007/s00027-024-01060-3>. EDN: PXOGIE
8. Makhutova O. N., Zuev I. V., Mashonskaya Y. O., Andrushchenko P. Y., Sultonov S. A. Diets that do not let benthivorous salmonid fish, *Thymallus baicalensis*, realize their potential for accumulating large content of omega-3 PUFAs in muscle tissue // Food Webs. 2024. Vol. 38. Art. no e00337. <https://doi.org/10.1016/j.fooweb.2024.e00337>. EDN: HFWNEZ

УДК 911.2

Высокогорные нивально-гляциальные ландшафты верховий рек Богосского хребта (Северо-Восточный Кавказ): пространственная структура и климатическая изменчивость

Агаев З. В.^{1,2,3}

¹Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН, Махачкала, Россия

²Дагестанский государственный педагогический университет имени Р. Гамзатова, Махачкала, Россия

³Кабардино-Балкарский научный центр РАН, Нальчик, Россия

✉ zagir05@mail.ru

В статье представлен анализ современного состояния ледников Богосского хребта, расположенного на территории Восточного Кавказа. В ходе работы была изучена динамика изменения площадей ледников в сравнении с данными середины прошлого столетия. Для проведения исследования были использованы экспедиционные методы полевого изучения гляциальных комплексов в летние сезоны 2014–2024 гг., а также данные «Каталога ледников СССР». Кроме того, были задействованы космические снимки и информация, полученная с помощью дистанционного зондирования. Результаты исследования указывают на сокращение оледенения в данном регионе. Площадь ледников уменьшилась с 1965 по 2024 г., количество ледников также сократилось. Наблюдаются процессы распада более крупных ледников, отделения от них меньших ледников и уменьшения их размеров. На месте растаявших ледников образуются малые ледники и снежники, а также каменные глетчеры. Кроме того, формируются новые озёрные геосистемы.

Ключевые слова: нивально-гляциальный ландшафт, оледенение, ледник, площадь оледенения, деградация оледенения, изменения климата, Восточный Кавказ, Богосский хребет, Аварское Койсу, Андийское Койсу, метеостанция Сулак-Высокогорная

Богосский хребет представляет собой крупнейший ледниковый район в Дагестане, расположенный между реками Андийское и Аварское Койсу. С точки зрения орографии этот хребет является довольно сложным образованием; его протяжённость составляет 79 км при средней высоте 3366 м. Отроги Богоса, такие как Кад, Хемамеэр, Тлим и Росода, характеризуются наличием крупных массивов, среди которых выделяются Коготль (3808 м), Осука (4048 м), Анчобала (4111 м) и Тлим-капусли (3768 м). На Богосском хребте можно обнаружить множество вершин, высота которых превышает 4000 м. Среди них выделяются Чимис (4099 м), Бочек (4116 м), Косараку (4097 м), Беленги (4053 м), Тунсада (4013 м) и Ижена (4025 м). Самым высоким массивом в этой цепи является Аддала-Шухгельмеэр: высота его главной вершины достигает 4151 м, а восточной — 4025 м. Этот массив находится в центре мощного оледенения Богоса [10].

На Богосском хребте располагается самый крупный ледник Дагестана — ледник Беленги длиной 1,959 км и площадью 1,85 км². К ледникам Богосского узла оледенения относятся и такие крупные глетчеры, как Северо-Восточный Аддала (длина 1,922 км, площадь 1,05 км²), Осука (длина 1,902 км, площадь 0,94 км²), Большой Анцохский (длина 1,743 км, площадь 0,86 км²), Тинавчегелатль (длина 1,485 км, площадь 1,29 км²), Чакатлы (длина 1,483 км, площадь 0,32 км²), Зигитли (длина 1,396 км, площадь 0,4 км²), Бичуга (длина 1,353 км, площадь 0,55 км²), Северный Аддала (длина 1,256 км, площадь 0,63 км²) [6].

По нашим исследованиям, общая площадь современного оледенения на Богосском хребте достигает 9,97 км².

Материал и методы исследований. Исследование пространственно-временной динамики современного оледенения Богосского хребта было проведено на основе анализа топографической основы масштаба 1 : 50 000 с использованием материалов аэрофотосъёмки и дешифрования космических снимков Landsat, обработанных с помощью геоинформационных систем MapInfo и ArcGIS. В ходе полевых гляциологических исследований в летние сезоны 2014–2024 гг. были уточнены полученные материалы. Динамика оледенения была проанализирована с учётом климатических изменений на основе данных метеостанции Сулак-Высокогорная [1, 4] (см. рис. 1–3).

В период 1960–2024 гг. в высокогорных ландшафтах произошли климатические изменения, которые можно наглядно представить с помощью рис. 1–3. Они демонстрируют среднегодовые температуры воздуха (рис. 1), количество атмосферных осадков (рис. 2) и коэффициент увлажнения, являющийся производным от первых двух показателей (рис. 3). Эти данные позволяют выявить особенности сезонной и межгодовой динамики ландшафтов [7, 8].

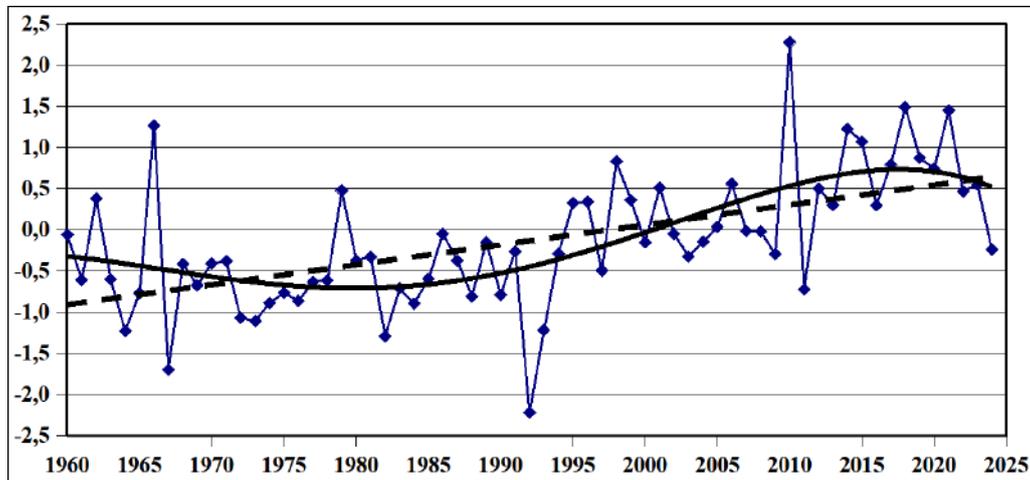


Рис. 1. Изменчивость среднегодовой температуры воздуха за 1960–2024 гг. Условные обозначения здесь и далее (на рис. 2–3): пунктирная линия — линейный тренд; сплошная — полиномиальный тренд

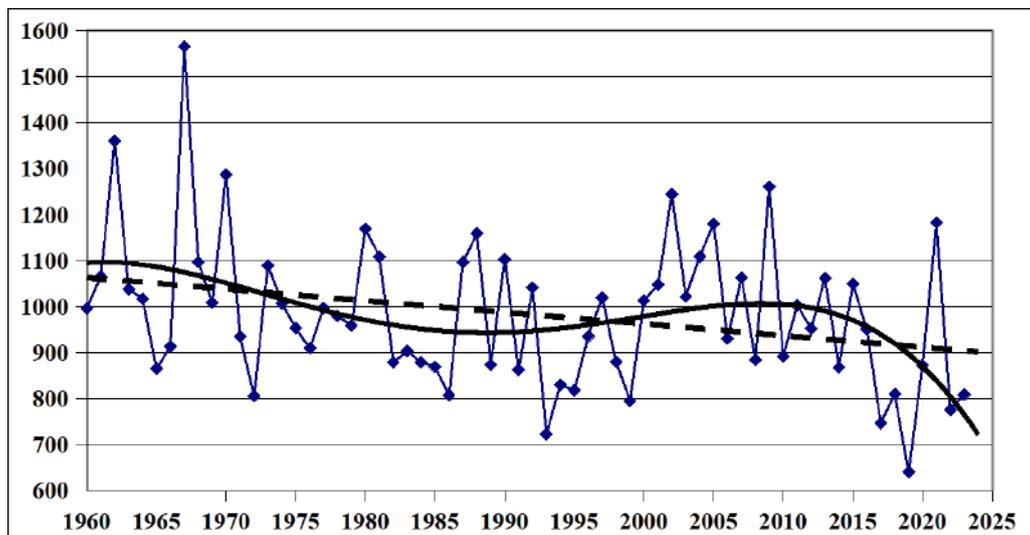


Рис. 2. Изменчивость среднегодового количества осадков за 1960–2024 гг.

Информационной базой для объективного анализа деградации ледников стали данные, представленные в «Каталоге ледников СССР» [9] и книге «Тающие горы Дагестана» [3], а также результаты личных полевых исследований автора, проведённых в период с 2014 по 2024 г. На основе этих материалов были составлены карта ледников Богосского хребта (рис. 4) и таблица, отражающая количество ледников Богосского хребта в привязке к бассейнам рек (табл. 1).

Распределение ледников по речным бассейнам. Ледники Богосского хребта расположены в области высокого водораздела, известного как Ледяной Богос, а также на его отдельных хребтах-отрогах и являются истоками рек Шаитли, Хварши и Кила в бассейне реки Андийское Койсу, а также рек Ратлубор, Чарах, Сараор и Жекода в бассейне реки Аварское Койсу.

В Богосском хребте на бассейны рек Андийское Койсу и Аварское Койсу приходится разное количество ледников. Так, в бассейне реки Андийское Койсу расположены 15 ледников и 4 каменных

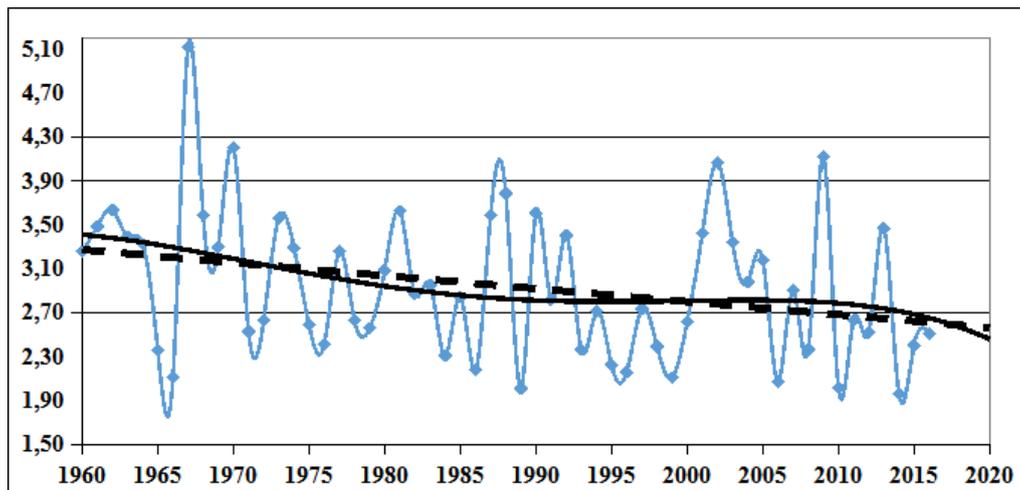


Рис. 3. Изменчивость коэффициента увлажнения за 1960–2020 гг.

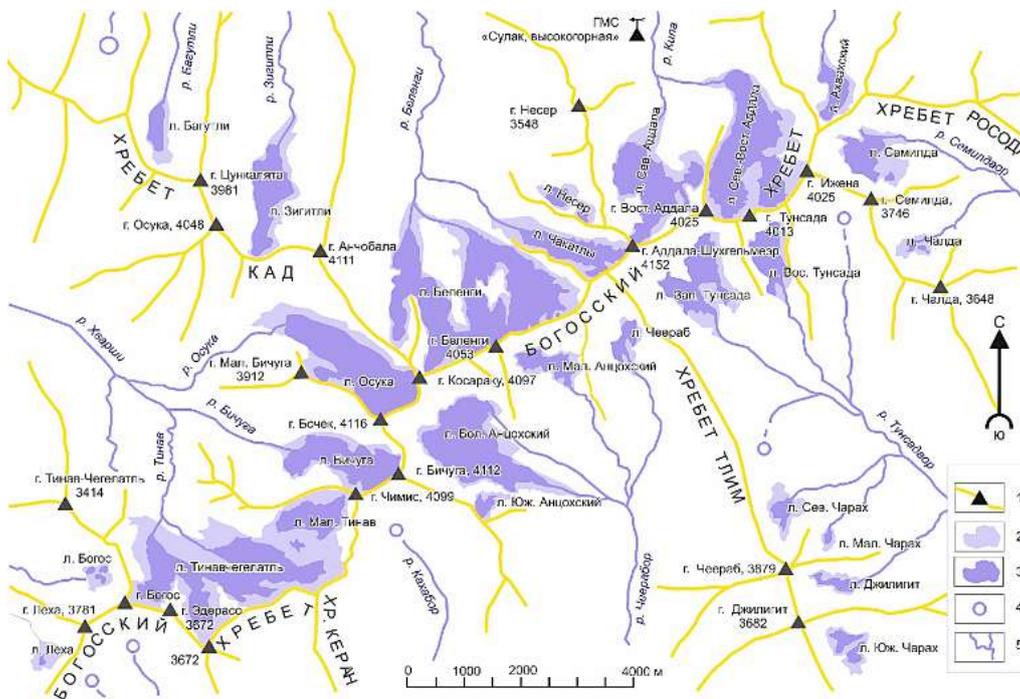


Рис. 4. Схема ледников Богосского хребта [6]: 1 — хребты, отдельные вершины; 2 — ледники (1965 г.); 3 — ледники (2024 г.); 4 — каменные глетчеры; 5 — реки

глетчера, а в бассейне реки Аварское Койсу — 16 ледников и 7 каменных глетчеров. Площадь оледенения первого бассейна равна 7,46 км², что составляет 74,82 % от общей площади, а второго бассейна — 2,51 км², что составляет 25,18 %. Это связано с экспозиционными особенностями высокогорных склонов.

В бассейне реки Андийское Койсу богосские ледники приурочены к верховьям рек Шаитли, Хварши и Кила [2].

Река Шаитли берёт своё начало из каменного глетчера Байдан, который расположен на склонах богосских вершин Жижия-Кинтли (3716 м) и Байдан (3664 м).

Река Хварши берёт своё начало от слияния рек Тинав и Бичуга, которые вытекают из ледников Тинавчегелатль и Бичуга, расположенных на северо-западном склоне Богосского хребта. Бассейн реки, ограниченный с трёх сторон хребтами Кад, Богосский и Хема, получает обширное ледниковое

Таблица 1. Распределение ледников Богосского хребта по бассейнам рек [6]

| Название реки и её притоков | Количество ледников | | | Площадь, км ² | % от общей площади |
|-------------------------------------|---------------------|----------------------|---------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| | Всего | Средних и крупных | Малых (каменные глетчеры) | | |
| Бассейн реки Андийское Койсу | 19 | 15 | 4 | 7,46 | 74,82 |
| Река Кила | 8 | 7 | 1 | 4,41 | 44,23 |
| Река Хварши | 10 | 8 | 2 | 3,05 | 30,59 |
| Река Шаитли | 1 | 0 | 1 | <0,01 | 0,00 |
| Бассейн реки Аварское Койсу | 23 | 16 | 7 | 2,51 | 25,18 |
| Река Ратлубор | 1 | 1 | 0 | 0,15 | 1,50 |
| Река Чарах | 14 | 11 | 3 | 1,20 | 12,04 |
| Река Сараор | 5 | 4 | 1 | 1,16 | 11,64 |
| Река Жекода | 3 | 0 | 3 | <0,01 | 0,00 |
| Всего на Богосском хребте | 42 | 31 | 11 | 9,97 | 100,00 |

и снеговое питание. Основные ледники района сосредоточены в верховьях реки. Среди них выделяются Тинавчегелатль площадью 1,29 км², Осука площадью 0,94 км² и Бичуга площадью 0,55 км². Из этих ледников наиболее крупным является Тинавчегелатль; его длина составляет 1,485 км. В настоящее время Тинавчегелатль, некогда единый и самый длинный ледник Дагестана, разделился на две части — собственно Тинавчегелатль (Эдерасо) и Малый Тинав, расположенный северовосточнее и имеющий длину 0,868 км.

Эти ледники расположены на северо-западной части Богоса, их область питания находится на высотах от 3800 до 4000 м. На левом притоке реки Жижия находятся два небольших ледника — каровый ледник Богос площадью 0,01 км² и висячий ледник Леха площадью 0,02 км². Ниже по течению реки Хварши находятся ещё несколько притоков, берущих начало с хребта Хемамеэр и питающихся от снега и льда. В верховьях этих притоков расположены три ледника — Коготль № 1 площадью 0,19 км², Коготль № 2 площадью 0,03 км² и Цадеиху площадью 0,02 км², — а также каменные глетчеры Зузи-1 и Зузи-2. Общая площадь современного оледенения бассейна реки Хварши составляет 3,05 км².

Река Кила берёт своё начало на стыке двух ледников, Северного Аддала и Северо-Восточного Аддала, расположенных на высоте 4151 м над уровнем моря. Через три километра после своего истока река Кила принимает приток — реку Беленги (с равной площадью водосбора). Истоки реки Беленги лежат в трёх ледниках — Беленги, Чакатлы и Несер. Самый крупный из них — ледник Беленги — имеет длину почти 2 км и площадь 1,85 км². Ледниковое питание реки Кила происходит только с левого берега, вдоль которого возвышаются гребни хребтов Богосского и Кад. Кроме упомянутых ледников, в долину реки Кила спускаются ледники Зигитли, Багутли и Атабала, который в настоящее время превратился в каменный глетчер. По расходу воды в устье Кила является наиболее полноводной рекой Богосского массива. Площадь современного оледенения бассейна реки Кила составляет 4,41 км².

В бассейне реки Аварское Койсу ледники расположены в верховьях рек Ратлубор, Чарах, Сараор и Жекода.

Река Ратлубор берёт своё начало из пологого языка карового ледника Ахвахский, который является единственным ледником Ратлубского ущелья. Он покоится в каровом цирке, образованном высокими гребнями Богосского хребта и хребта Росода. Для Ратлубского ущелья характерны засушливость и малоснежные зимы. Площадь ледника составляет 0,15 км².

Река Чарах берёт своё начало от слияния двух рек — Тунсадаор и Симилдаор. В её бассейне находится крупнейший очаг оледенения по реке Аварское Койсу; он расположен на юго-восточном склоне Богосского хребта и на его отроге — хребте Тлим. Здесь сосредоточено 11 ледников и 3 каменных глетчера. Тунсадаор — главный исток реки Чарах — берёт своё начало с каровых ледников Западный Тунсада (0,39 км²) и Восточный Тунсада (0,24 км²). До слияния с рекой Симилдаор он принимает ещё пять притоков, вытекающих из ледниковых каровых цирков. На северо-восточных склонах хребта Тлим расположены ледники Северный Чарах (0,08 км²), Малый Чарах (0,02 км²), Джилигит (0,05 км²), Южный Чарах (0,07 км²), Тлим Северный (0,01 км²), Джарачан (0,08 км²) и Череватли (0,02 км²), а также каменный глетчер Тлим Западный. Площадь оледенения Тунсадинского ущелья составляет 0,96 км². Площадь оледенения Симилдинской долины намного меньше — 0,24 км². Здесь расположены каровый ледник Семилда (0,22 км²) и висяче-каровый ледник Чалда (0,02 км²). Основными ледниками Чарахского ущелья являются Западный Тунсада, Восточный Тунсада и Симилда. Суммарная площадь современного оледенения бассейна реки Чарах составляет 1,2 км².

Река Сараор берёт своё начало из ледников Малый Анцохский и Чеерабский. До слияния с рекой Кахабор исток реки Сараор носит местное название — Чеерабор. Сток реки формируется тальми водами трёх основных ледников ущелья, которые называются Анцохскими. Это ледники Большой Анцохский (площадь 0,86 км²), Малый Анцохский (площадь 0,17 км²) и Верхний Анцохский, или Чеерабский (площадь 0,08 км²). Южнее Большого Анцохского ледника расположен висячий ледник Южный Анцохский (площадь 0,05 км²). Самым крупным ледником бассейна реки Сараор является Большой Анцохский. Река Кахабор берёт своё начало с каменного глетчера на юго-восточном склоне горы Чимис (высота 4099 м). Площадь современного оледенения бассейна реки составляет 1,16 км².

Река Жекода берёт своё начало в ледниковом глетчере, расположенном на юго-восточном склоне перевала Байдан. Этот ледник находится между вершинами Жижиа-Кинтли, высота которой составляет 3716 м, и Байдан, высота которой равна 3664 м. Левый приток Жекоды, река Баркинтарх, и правый безымянный приток также берут своё начало в ледниках. Площадь оледенения бассейна Жекоды крайне мала — менее 0,01 км².

Таким образом, распределение ледников в бассейнах рек характеризуется крайней неравномерностью. Наибольшее их количество сосредоточено в бассейне реки Чарах — 11 ледников и 3 каменных глетчера. В бассейне реки Шаитли имеется лишь 1 каменный глетчер — Байдан. Максимальная площадь оледенения наблюдается в бассейнах рек Кила (4,41 км²) и Хварши (3,05 км²); это 74,82 % от общей площади современного оледенения Богосского хребта. Оледенение в бассейнах рек Чарах, Сараор, Ратлубор, Жекода и Шаитли занимает всего 2,51 км², что соответствует 25,18 % от общей площади.

Заключение. В пределах Богосского хребта, как и в прочих ледниковых бассейнах, расположенных в пределах Большого Кавказа, наблюдается процесс сокращения оледенения. За временной промежуток 1965–2024 гг. произошло уменьшение площади оледенения на 5,51 км², что составляет 35,6 % от общей площади. Количество ледников за тот же период сократилось на 11 (это 26,2 % от общего числа ледников). Происходит распад крупных ледников, от них отчлениются более мелкие ледники, размеры которых также уменьшаются. На местах растаявших ледников возникают небольшие ледники и снежники, известные как каменные глетчеры. Сокращение площади оледенения Богосского хребта может привести к снижению водного баланса рек Андийское Койсу и Аварское Койсу, что, в свою очередь, может оказать влияние на обеспеченность населения региона водными ресурсами.

Работа представлена в рамках крупного научного проекта «Динамика геоэкологического состояния бассейнов горных рек Северо-Восточного Кавказа, Азербайджана и Ирана в условиях изменения климата и растущей антропогенной нагрузки» (соглашение № 075-15-2024-644).

Список использованных источников

1. Абдулжалимов А. А., Атаев З. В., Братков В. В. Современные климатические изменения высокогорных ландшафтов Северо-Восточного Кавказа // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2015. № 2 (31). С. 86–94. EDN: UWOLIJ

2. Акаев Б. А., Атаев З. В., Гаджиева З. Х. и др. Физическая география Дагестана : учебное пособие для студентов. М. : Школа, 1996. 384 с. EDN: [UPWTVT](#)
3. Алейников А. А., Липка О. Н. Тающие горы Дагестана. М. : Всемирный фонд природы (WWF), 2016. 108 с. EDN: [XKQRWV](#)
4. Атаев З. В. Ландшафты Высокогорного Дагестана и их современное состояние // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2007. № 1 (1). С. 90–99. EDN: [INLYHV](#)
5. Атаев З. В. Орография высокогорий Восточного Кавказа // Географический вестник. 2012. № 2 (21). С. 4–9. EDN: [PAGJTZ](#)
6. Атаев З. В. Современное оледенение Богосского хребта // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2018. Т. 12, № 2. С. 62–74. <https://doi.org/10.31161/1995-0675-2018-12-2-62-74>. EDN: [YQGZRJ](#)
7. Атаев З. В. Реакция ландшафтов Дагестана на современные климатические изменения // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2023. № 3 (94). С. 10–14. <https://doi.org/10.33580/2541-9684-2023-94-3-10-14>. EDN: [CXJBIJ](#)
8. Братков В. В., Атаев З. В. Оценка влияния современных климатических условий на природно-территориальные комплексы Северо-Восточного Кавказа (по материалам дистанционного зондирования Земли) // Мониторинг. Наука и технологии. 2017. № 2 (31). С. 6–14. EDN: [YZIGID](#)
9. Каталог ледников СССР. Т. 9. Закавказье и Дагестан. Вып. 1. Ч. 7. Бассейн левых притоков р. Кумы; Вып. 3. Дагестан. Ч. 1. Бассейн р. Сулак; Ч. 2. Бассейн р. Самур. Вып. 4. Восточное Закавказье. Ч. 1. Бассейн р. Кусарчая. Ленинград : Гидрометеиздат, 1975. 96 с.
10. Магомедов А. М., Атаев З. В. Влияние орографии на климатические условия Богосского горного массива на Восточном Кавказе // Труды Географического общества Республики Дагестан. 2005. № 33. С. 164–165.
11. Черкашин В. И., Заалишвили В. Б., Мамаев С. А., Атаев З. В., Ибаев Ж. Г., Сулейманов В. К. Геоэкологическое состояние верховьев бассейна реки Аварское Койсу // Геология и геофизика Юга России. 2024. Т. 14, № 4. С. 100–112. <https://doi.org/10.46698/VNC.2024.77.35.009>. EDN: [DIXDDG](#)

УДК 911.2

Пространственно-временная экотонность ландшафтов контактной горно-равнинной полосы российского Кавказа

Агаев З. В.^{1,2,3}

¹ Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН, Махачкала, Россия

² Дагестанский государственный педагогический университет имени Р. Гамзатова, Махачкала, Россия

³ Кабардино-Балкарский научный центр РАН, Нальчик, Россия

✉ zagir05@mail.ru

Территория российского Кавказа характеризуется большим разнообразием природных условий и, как следствие, природных ландшафтов. Большинство ландшафтоведов и авторов ландшафтных карт Кавказа и его отдельных частей выделяют здесь только две высшие классификационные единицы ландшафтов (классы) — равнинные и горные, которые соответствуют рельефным мегаформам. Однако в пределах российского Кавказа существует переходная контактная полоса от равнины к горам, которая получила название «предгорные ландшафты». Комплекс количественных и качественных параметров в сочетании со значительной пространственной мозаичностью местообитаний и временной изменчивостью климатических условий образует своеобразные экотонные черты низкогорно-предгорных ландшафтов, которые позволяют выделять их как отдельную классификационную единицу.

Ключевые слова: российский Кавказ, Большой Кавказ, Предкавказье, Северо-Восточный Кавказ, предгорный ландшафт, предгорный ландшафт-экотон, пространственная экотонность ландшафтов, временная экотонность ландшафтов

Термин «экотон» ввёл в экологию Ф. Клеменс в 1928 г. Он понимал под ним переходную полосу (зону) между двумя достаточно контрастными геосистемами. Особенности, свойства и специфика такой переходной полосы не позволяют отнести её ни к одной из смежных экосистем. Типичный пример — полоса (зона) между лесом и степью.

За прошедшие 100 лет термин «экотон» нашёл применение во многих науках о природе. В ландшафтоведении для таких полос употребляются специфические понятия: «переходная ландшафтная единица» [4], «буферная геосистема» [21], «геотон» [6], «геоэкотон» [19] и «ландшафтный экотон» [14, 18]. Ландшафтные экотоны — сферы латерального вещественно-энергетического взаимодействия и взаимопроникновения смежных геосистем путём наложения их ландшафтных геополей друг на друга.

Ландшафтный экотон — переходная полоса между смежными природными геосистемами, отличающаяся повышенной интенсивностью латерального вещественно-энергетического взаимодействия между ними.

Экотонам свойственно значительное ландшафтно-экологическое разнообразие и, как следствие, высокое разнообразие, концентрация и продуктивность биоты.

Ландшафтные экотоны играют одновременно буферную, мембранную и транзитную роль, препятствуя движению одних латеральных потоков, задерживая другие и свободно пропуская третьи (рис. 1).

Изучая на протяжении последних 40 лет предгорные ландшафты в структуре ландшафтной организованности российского Кавказа, и в частности Северо-Восточного Кавказа, мы задались целью проанализировать их на предмет «экотонности». Для достижения этой цели методично решались следующие задачи:

- анализ современных теоретических представлений о предгорных ландшафтах, факторах и процессах формирования, разработка критериев их выделения;
- сравнительный анализ геоморфологических (морфометрических) параметров ландшафтных поясов территории для выявления места предгорных ландшафтов в горно-равнинном парадинамическом комплексе;



Рис. 1. Функции ландшафтного экотона

- характеристика роли климатических факторов (в частности, изменчивости климатических параметров) в формировании предгорных ландшафтов и особенностей временной структуры последних.

Пространственная экотонность предгорных ландшафтов. Территория российского Кавказа, и в частности Северо-Восточного Кавказа, характеризуется большим разнообразием природных условий и, как следствие, природных комплексов. Отличительной чертой этой территории является своеобразная структура высотной поясности, обусловленная расширением горного сооружения в пределах Дагестана и существованием здесь наиболее обширной в пределах северного склона Большого Кавказа системы внутригорных котловин. Второй особенностью Северо-Восточного Кавказа, в том числе в пределах Дагестана, является наличие системы хребтов, окаймляющих собственно горное сооружение, — Салатау и Гимринский, Чонкатау, Карасырт, Шамхалдаг и др. Незначительная высота хребтов (до 1200–1400 м) в сочетании со своеобразным климатом приводит к формированию здесь пространственной структуры ландшафтов, отличающейся от структуры как прилегающих равнин, так и более высоких частей горного сооружения. Такие переходные участки в настоящее время принято называть экотонами и выделять в отдельную категорию природных территориальных комплексов. Однако большинство авторов [1, 7, 9–13, 23, 24 и др.], составлявших карты территории Северо-Восточного Кавказа, выделяют здесь только две наиболее высоких классификационных единицы (классы) ландшафтов — равнинные и горные, соответствующие мегаформам рельефа. Между тем в пределах Северо-Восточного Кавказа и особенно Дагестана существует переходная полоса от равнины к горам, которая и получила название «предгорные ландшафты».

Морфометрический анализ рельефа является одним из методов геоморфологических исследований, в котором количественные характеристики форм рельефа изучаются с помощью специальных измерений. Обычно измеряют абсолютную и относительную высоту отдельных форм рельефа или их комплексов, углы наклона, экспозицию склонов, площади, занятые положительными и отрицательными формами, и некоторые другие [22]. Проблемам количественного описания рельефа посвящён ряд работ [3, 20].

Морфометрический анализ рельефа сегодня осуществляется с помощью цифровой модели рельефа (далее — ЦМР). В настоящее время началось создание ЦМР разных разрешений, которые в ГИС-технологиях выполняют в известной мере функции масштабов карт. Анализ территории Северо-Восточного Кавказа проводился с использованием пакета ArcGIS на основе ЦМР. В качестве основы были использованы результаты радиолокационной съёмки Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), предназначенной для построения высокоточной сети глобальной ЦМР. Её среднеквадратическая погрешность оценивается по высоте около 16 м, а точность положения узлов трёхсекундной сетки составляет около 20 м, причём в условиях горного рельефа эти показатели становятся выше. Такая точность ЦМР соответствует требуемой для достижения целей, поставленных в работе.

Исправленный снимок SRTM с разрешением около 60 м пригоден для выполнения морфометрического анализа и построения соответствующих карт в среде ГИС. Редактирование снимка, связанное с идентификацией и последующим устранением незначительных ошибок, проведено

с использованием средств пакета ArcGIS и его модуля Spatial Analyst. Эта же программа применялась при первичных расчётах и построении карт.

Предгорья как физико-географический, или ландшафтный, экотон (по терминологии Э. Г. Коломыца [15] и В. А. Николаева [17]) характеризуются набором и сочетанием как минимум трёх геоморфологических элементов. Это:

- 1) хребты, представляющие собой локальные повышения на фоне равнинного рельефа и чаще всего являющиеся низкогорьями в геоморфологическом отношении (до 1000 м над уровнем моря);
- 2) равнинные участки, характеризующиеся незначительной крутизной (до 2–4°), чаще всего располагающиеся между хребтами или как минимум с одной стороны прилегающие к ним (то есть, по сути, являющиеся днищами котловин);
- 3) наиболее низкие хребты собственно горного сооружения Большого Кавказа, в геоморфологическом отношении являющиеся низкогорьями, а в ландшафте — низнегорьями, так как здесь начинается самый нижний высотный пояс, широколиственные леса.

Столь значительная геоморфологическая «пестрота» приводит к тому, что здесь формируется своеобразный мезоклимат, отличающийся от такового как прилегающих равнин (меньшие скорости ветра, более стабильный снежный покров и т. п.), так и гор (более высокие температуры и меньшее количество осадков). В результате геоморфологической «пестроты» и особенностей климата здесь формируется более широкий ряд местоположений и, соответственно, набор физиономических типов растительности — травяной, кустарниковой и древесной, наиболее типичной для лесостепной зоны.

Равнинные ландшафты характеризуются наличием широтной зональности ландшафтов, горные ландшафты — высотной поясности. В низкогорно-предгорных же ландшафтах в результате взаимодействия гор с прилегающими равнинами возникает своеобразная предгорная зональность, относимая к парадинамической зональности регионального уровня. Зональность предгорных ландшафтов выражается в чередовании гумидно-предгорного и аридно-теневого вариантов зональности. Кроме предгорной зональности, местами при непосредственном влиянии передовых хребтов, стоящих в виде барьера на пути движения воздушных масс, проявляется барьерно-высотная поясность ландшафтов [2, 16]. Задерживая насыщенные водяными парами воздушные массы и конденсируя их влагу на наветренных склонах, предгорные хребты создают своеобразный мезофильный ландшафт, резко отличающийся от территорий, находящихся в области барьерной тени.

Для объективного анализа и выделения равнинной, предгорной и горной частей нами [5] был проведён анализ морфометрических особенностей рельефа, так как указанные понятия относятся к категории геоморфологических. Среди большого количества морфометрических параметров наиболее подходящие для выявления ландшафтообразующей роли — абсолютная высота местности и крутизна поверхностей. Гипсометрический фактор приводит к дифференциации ландшафтов, а крутизна является тем критерием, по которому отграничиваются равнинные и горные ландшафты.

Одним из наиболее простых и достоверных критериев, по которому отделяется горная часть от равнинной, является крутизна склонов. Чаще всего признаётся, что при крутизне поверхностей или склонов более 6° начинаются горы (или их предгорья). В пределах Северо-Восточного Кавказа они занимают 35 % от всей площади. При этом на высоты до 1000 м (низкогорья в геоморфологическом понимании) приходится 17 848 км² (39,7 %), 1000–2000 м (среднегорья) — 12 192 км² (27,1 %), 2000–3000 м — 11 625 км² (25,9 %), более 3000 м — 3223 км² (7,2 %). То есть в геоморфологическом отношении на территории Северо-Восточного Кавказа более широко представлены низкогорья и высокогорья, тогда как среднегорья занимают несколько меньшую площадь. Наибольшую площадь в низкогорьях занимают высотные отметки 200–400 и 400–600 м, куда входят передовые хребты (Терский и Сунженский). Что касается среднегорий, то здесь распределение территории довольно равномерное. В высокогорьях (до 3000 м) заметно повышение доли территорий с высотами от 2500 м, что можно объяснить наличием значительных поверхностей выравнивания как на Скалистом хребте, так и во Внутригорном Дагестане. Наиболее высокие части горного сооружения занимают не столь значительную территорию.

Ландшафты предгорий, низкогорий и нижнегорий поднимаются с 200 до 1000–1200 м. Нижние ступени рельефа примерно до 600 м почти полностью заняты ландшафтами предгорий. Территории с отметками высот 600–800 м ещё тяготеют к предгорной части, а при дальнейшем увеличении абсолютной высоты низкогорья и предгорья постепенно переходят в собственно горное сооружение.

На территории Северо-Восточного Кавказа встречаются склоны с крутизной до 75°. Поверхности с крутизной до 6° занимают 10 598 км² (23,6 %). В геоморфологическом отношении они соответствуют равнинам. В горной части территории с такой крутизной склонов чаще всего отмечаются в котловинах; нередко это поверхности выравнивания в довольно возвышенных частях (горные плато). Склоны с разной степенью покатости (6–20°) занимают наибольшую площадь — до 16 503 км² (36,7 %). Следующая группа склонов — склоны средней крутизны (20–30°) — занимает 9087 км² (20,2 %). Крутые склоны (30–45°) занимают 7713 км² (17,2 %); обрывистые склоны (45–60°) — 1001 км² (2,2 %). Наконец, отвесные скалы (60–75°) занимают ничтожно малую площадь.

Что касается предгорных, низкогорных и нижнегорных ландшафтов, то здесь на склоны крутизной до 10° приходится более 50 % склонов, получивших значительное распространение на всей территории Северо-Восточного Кавказа. По мере увеличения крутизны склонов увеличивается доля территории, которая располагается в пределах горного сооружения Большого Кавказа. В целом в пределах предгорных ландшафтов ещё сохраняется довольно значительная доля склонов, имеющих крутизну до 25°, а более крутые склоны нехарактерны для категории предгорных, низкогорных и нижнегорных ландшафтов.

Ещё одной важной морфометрической характеристикой является экспозиция склонов. Для Северо-Восточного Кавказа наиболее характерными являются склоны северных румбов, суммарная доля которых составляет 42,9 %, что легко объясняется положением территории на северном макросклоне Большого Кавказа. Доля склонов южных румбов — 31,3 %. С позиции циркуляции атмосферы склоны западных румбов, которые в умеренных широтах получают максимальное количество осадков, занимают более 30 % (33,2 %), а восточные — около 40 % (39,9 %), то есть сочетание этих факторов приводит к тому, что здесь более широко представлены местоположения, в которых отмечается некоторый недостаток тепла и влаги.

Что касается предгорных, низкогорных и нижнегорных ландшафтов, то плоские поверхности абсолютно характерны лишь для предгорных ландшафтов, так как на них приходится 173 из 174 км² (99,4 %). Склоны других экспозиций занимают здесь в целом площадь, пропорциональную общей.

Следующим непосредственно связанным с рельефом параметром, который позволяет количественно оценить его вклад в формирование ландшафтной структуры региона, является карта интенсивности солнечного излучения (радиации). По распределению данного параметра низкогорно-предгорные ландшафты занимают промежуточное положение между двумя признаваемыми классами — между равнинными и горными.

Ярким подтверждением того, что переходная полоса между равнинной и горной частями характеризуется контрастными («пёстрыми») условиями, служат карты густоты горизонтального расчленения рельефа. Для создания этой карты был необходим подсчёт длин линий водотоков разных порядков (в нашем случае от 1-го порядка, элементарного, до 11-го — наиболее крупные реки). Далее были подсчитаны длины водотоков в пределах квадрата со стороной 10 км. Итоговая карта (рис. 2) была составлена путём выделения естественных групп в программе MapInfo.

Наибольшая контрастность и пестрота характерны как раз для предгорного экотона. В собственно горной части региона заметно постепенное увеличение эрозионного расчленения по мере увеличения абсолютной высоты. Именно эрозионное расчленение создаёт условия для формирования склонов разной крутизны и экспозиции.

Основой для уточнения положения предгорных ландшафтов на территории Дагестана стал проведённый нами морфометрический анализ рельефа, в частности таких его показателей, как высота и крутизна склонов.

В отношении высоты над уровнем моря при выделении предгорных ландшафтов на территории Дагестана сложилась более или менее единая точка зрения: нижняя их граница проходит на высоте примерно 100 м, верхняя — 1000–1200 м.

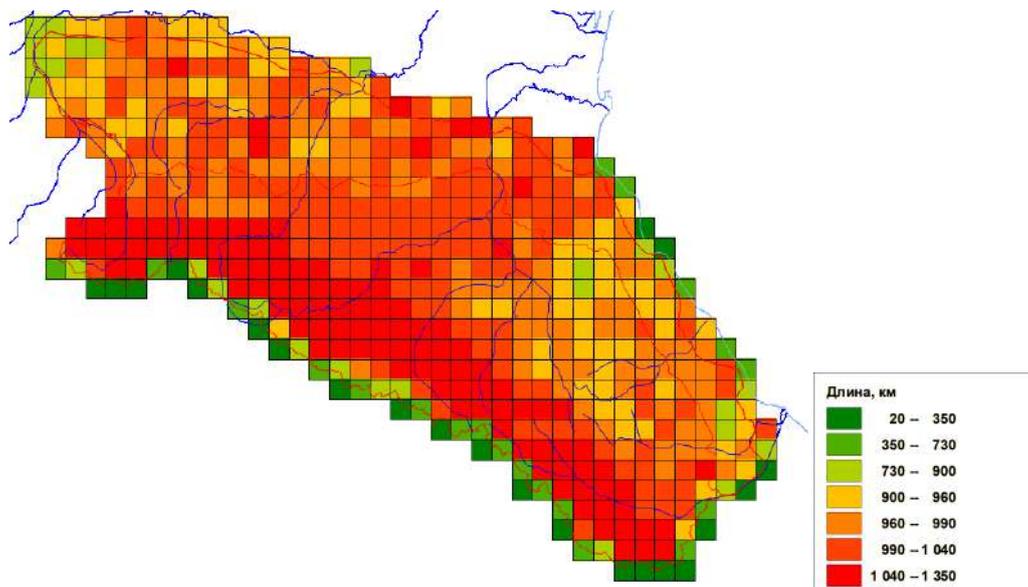


Рис. 2. Карта густоты горизонтального расчленения рельефа Северо-Восточного Кавказа [5]

Что касается крутизны склонов, то этот параметр не имеет единой трактовки. Нам представляется, что при крутизне склона более $5-6^\circ$ данный показатель начинает играть существенную роль при дифференциации растительности и почвенного покрова, особенно при усилении контрастности рельефа. Для горных условий большинство авторов сходится на том, что под пологими склонами понимаются таковые с крутизной $10-15^\circ$.

Наряду с этими параметрами, для выделения территории Предгорного Дагестана учитывался фактор связи отдельных массивов с основным сооружением Большого Кавказа.

Предгорный Дагестан — территория между Равнинным и Приморским Дагестаном с одной стороны и Внутригорным Дагестаном с другой, с высотами от 100 до 1200–1400 м, представляющая собой переход от низменностей и равнин разного гипсометрического уровня к горному сооружению Большого Кавказа с контрастным рельефом. Место Предгорного Дагестана в высотном ряду ландшафтных поясов Дагестана по гипсометрическим отметкам и крутизне склонов иллюстрируют рис. 3 и табл. 1 и 2.

Наиболее широко на территории Дагестана распространён равнинный ландшафтный ярус. Он приурочен к Прикаспийской низменности и её отдельным частям — Терско-Сулакской и Терско-Кумской низменностям. Для него характерны высоты до 100 м, а крутизна поверхностей практически нигде не превышает 2° .

Приморский Дагестан фактически представляет собой южное продолжение равнинного побережья Каспийского моря. Здесь, в отличие от собственно Равнинного Дагестана, отметки высот возрастают до 200 м, а иногда и до больших значений. Однако, несмотря на это, доля склонов крутизной более 6° не превышает 2 %, что и позволяет рассматривать эти ландшафты как собственно равнинные, а основная разница сводится к слабым количественным различиям.

Предгорный Дагестан занимает площадь 5809 км² преимущественно в интервале высот от 100 до 1200 м, хотя отдельные его части поднимаются и выше. С севера и востока он граничит с Равнинным и Приморским Дагестаном, которые, как уже отмечалось выше, представлены равнинами различного гипсометрического уровня. В пределах Предгорного Дагестана преобладают склоны с крутизной от $0-2^\circ$ до $10-15^\circ$, на которые приходится 11–17 %. Доля склонов крутизной более 15° — около 10 %, при этом в крайней западной части ареала предгорных ландшафтов заметно, что наиболее возвышенные части является одновременно и наиболее крутыми.

Внутригорный Дагестан занимает высотные интервалы от 400–600 до 2000–3000 м, однако на высотах до 1000 м располагается чуть более 12 % его территории. Основная его часть, 60 %, приурочена к высотам 1000–2000 м, а доля 2000–3000 м составляет 22 %. Наиболее часто здесь отмечаются

Таблица 1. Гипсометрические отметки ландшафтных ярусов на территории Дагестана [5]

| Высота, м | Дагестан | | | | | Итого |
|-----------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| | Равнинный | Приморский | Предгорный | Внутригорный | Высокогорный | |
| Менее 0 | 14 230 | 503 | | | | 14 733 |
| 0–100 | 7662 | 804 | 91 | | | 8557 |
| 100–200 | | 111 | 704 | | | 815 |
| 200–400 | | 61 | 2048 | | | 2124 |
| 400–600 | | | 1702 | 171 | | 1858 |
| 600–800 | | | 836 | 515 | | 1368 |
| 800–1000 | | | 278 | 920 | 68 | 1250 |
| 1000–1200 | | | 118 | 1300 | 110 | 1529 |
| 1200–1400 | | | 29 | 1497 | 182 | 1708 |
| 1400–1600 | | | 2 | 1459 | 299 | 1760 |
| 1600–1800 | | | | 1398 | 476 | 1873 |
| 1800–2000 | | | | 1399 | 691 | 2090 |
| 2000–3000 | | | | 2913 | 5636 | 8550 |
| 3000–4466 | | | | 38 | 2166 | 2204 |
| | 21892 | 1480 | 5809 | 11610 | 9629 | 50300 |

Таблица 2. Крутизна склонов в пределах ландшафтных ярусов Дагестана [5]

| Уклон, ° | Дагестан | | | | Итого |
|----------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| | Приморский | Предгорный | Внутригорный | Высокогорный | |
| 0–2 | 1299 | 805 | 141 | 32 | 23 810 |
| 2–4 | 135 | 974 | 403 | 60 | 1827 |
| 4–6 | 26 | 888 | 594 | 99 | 1636 |
| 6–8 | 10 | 782 | 732 | 139 | 1671 |
| 8–10 | 4 | 657 | 821 | 187 | 1675 |
| 10–15 | 4 | 1039 | 2239 | 740 | 4033 |
| 15–20 | 1 | 425 | 2120 | 1160 | 3716 |
| 20–25 | 1 | 151 | 1740 | 1531 | 3433 |
| 25–30 | 0 | 57 | 1268 | 1798 | 3135 |
| 30–35 | 0 | 20 | 817 | 1793 | 2639 |
| 35–40 | 0 | 6 | 443 | 1293 | 1749 |
| 40–45 | | 2 | 190 | 607 | 802 |
| 45–50 | | 1 | 66 | 157 | 225 |
| 50–60 | | 1 | 32 | 31 | 63 |
| 60–72,6 | | 0 | 3 | 2 | 5 |
| | 1480 | 5809 | 11610 | 9629 | 50300 |

склоны крутизной от 10–15 до 25–30°, их доля — 64 %. Менее крутые склоны (до 10°) представлены чаще, чем более крутые, хотя на последние приходится более 10 %.

Высокогорный Дагестан располагается преимущественно в интервале высот от 2000 до 4466 м, и на долю этого высотного интервала приходится примерно 80 % территории высокогорий; остальную же часть ландшафтного яруса занимают высокогорные котловины и долины рек. Что касается уклона, то здесь наиболее часто встречаются поверхности с уклоном от 15–20 до 35–40°, их доля составляет 78 %. Несмотря на это, здесь нередко встречаются склоны крутизной до 6–8°, однако доля наиболее крутых склонов всё же выше, чем доля более пологих.

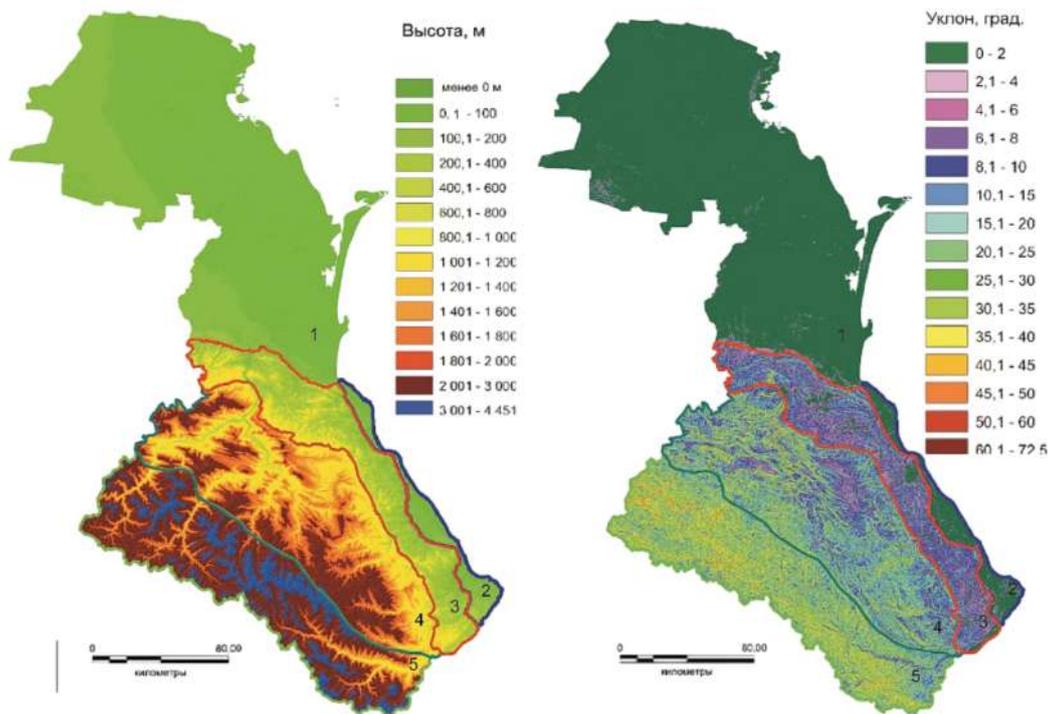


Рис. 3. Высотные отметки и крутизна склонов в пределах высотных ландшафтных ярусов Дагестана

Что касается Внутригорного и Высокогорного Дагестана, то, как и в случае с равнинной и при-морской частями, между ними заметно достаточно большое сходство. Оно проявляется в том, что эти высотные ландшафтные пояса занимают довольно близкие отметки высот; кроме того, для них характерны склоны с сопоставимыми характеристиками крутизны. В целом у них также проявляется тенденция увеличения крутизны склонов по мере увеличения абсолютной высоты. Данный факт можно объяснить особенностями геологического строения территории.

Как показал проведённый анализ, наиболее разнообразными условиями характеризуется Предгорный Дагестан: здесь широко представлены местоположения, типичные как для равнинной части, так и для горной. На наиболее низкие гипсометрические уровни (200–400 м) приходится 35 % территории; на склоны крутизной 0–6°, которые более характерны для равнин, — 46 %. Вместе с тем здесь довольно широко представлены и более крутые склоны, типичные для Внутригорного и Высокогорного Дагестана.

Временная экотонность предгорных ландшафтов. После рельефа климат выступает вторым по значимости фактором при формировании ландшафтов, особенно их высоких классификационных единиц. Однако для климата, в отличие от рельефа, характерна довольно значительная временная изменчивость, то есть в одних и тех же ландшафтах в разные месяцы, сезоны и годы могут отмечаться несколько отличные условия [8]. В этой связи нами для обоснования выделения низкогорно-предгорных ландшафтов были проанализированы не только статистические характеристики климата — средние многолетние величины температуры воздуха, количества осадков и показателя увлажнения, но и их изменения на протяжении рядов лет (рис. 4, 5).

Климатические параметры обычно осредняются за несколько десятков лет. В последнее время, когда стала дискутироваться проблема изменения климата, минимальный временной отрезок, за который проявляются наиболее типичные черты климата того или иного региона, принимается составляющим 30 лет. При этом колебания климатических условий внутри таких временных промежутков рассматриваются чаще всего в качестве ландшафтообразующих процессов. Амплитуда этих изменений весьма существенна, и изменения в разных ландшафтах различны [8]. В этой связи временная неоднородность климатических условий, накладывающаяся на разнообразие литогенной основы и местоположений, может рассматриваться не только в качестве фактора

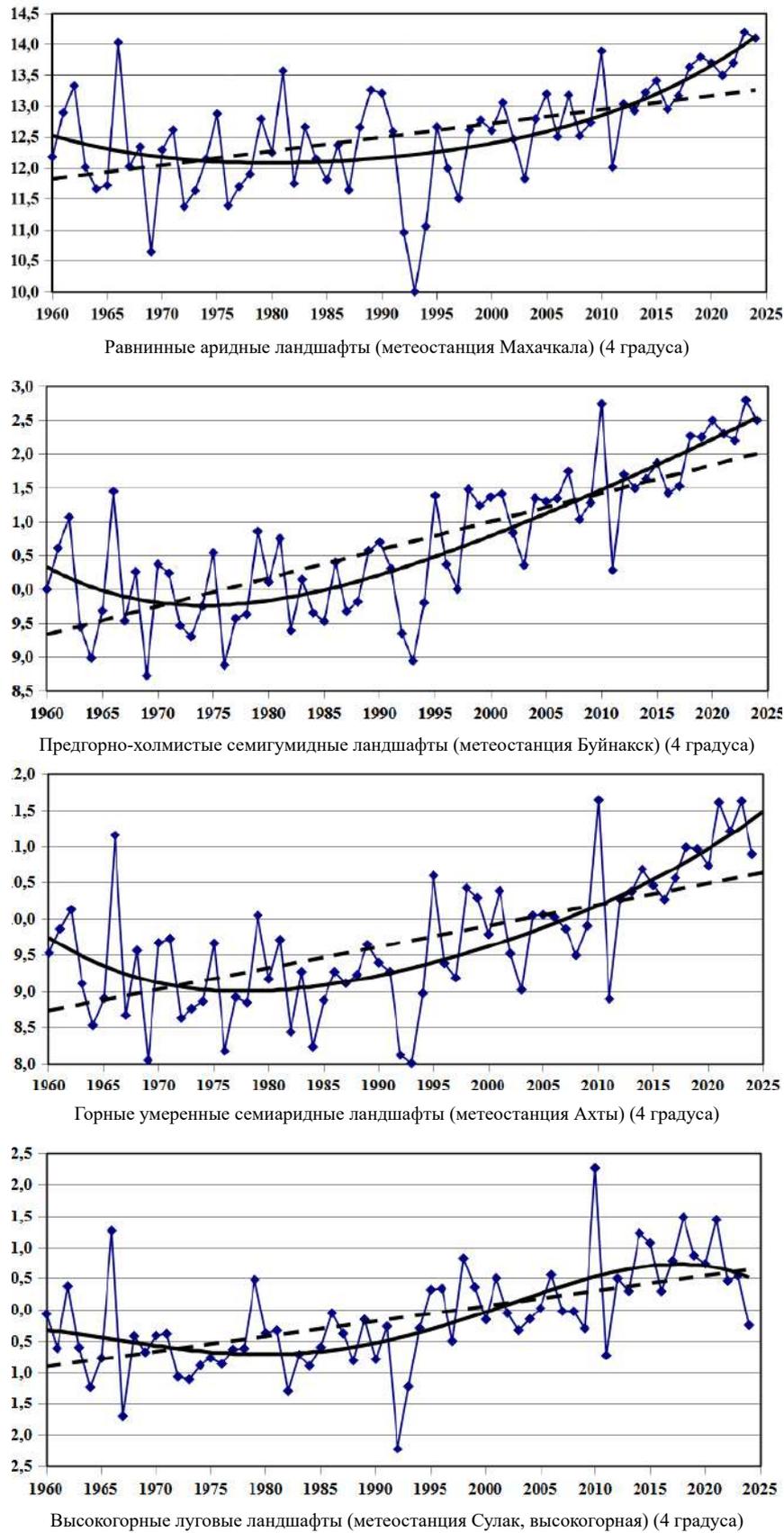


Рис. 4. Изменения среднегодовой температуры воздуха в высотных ландшафтных ярусах Дагестана

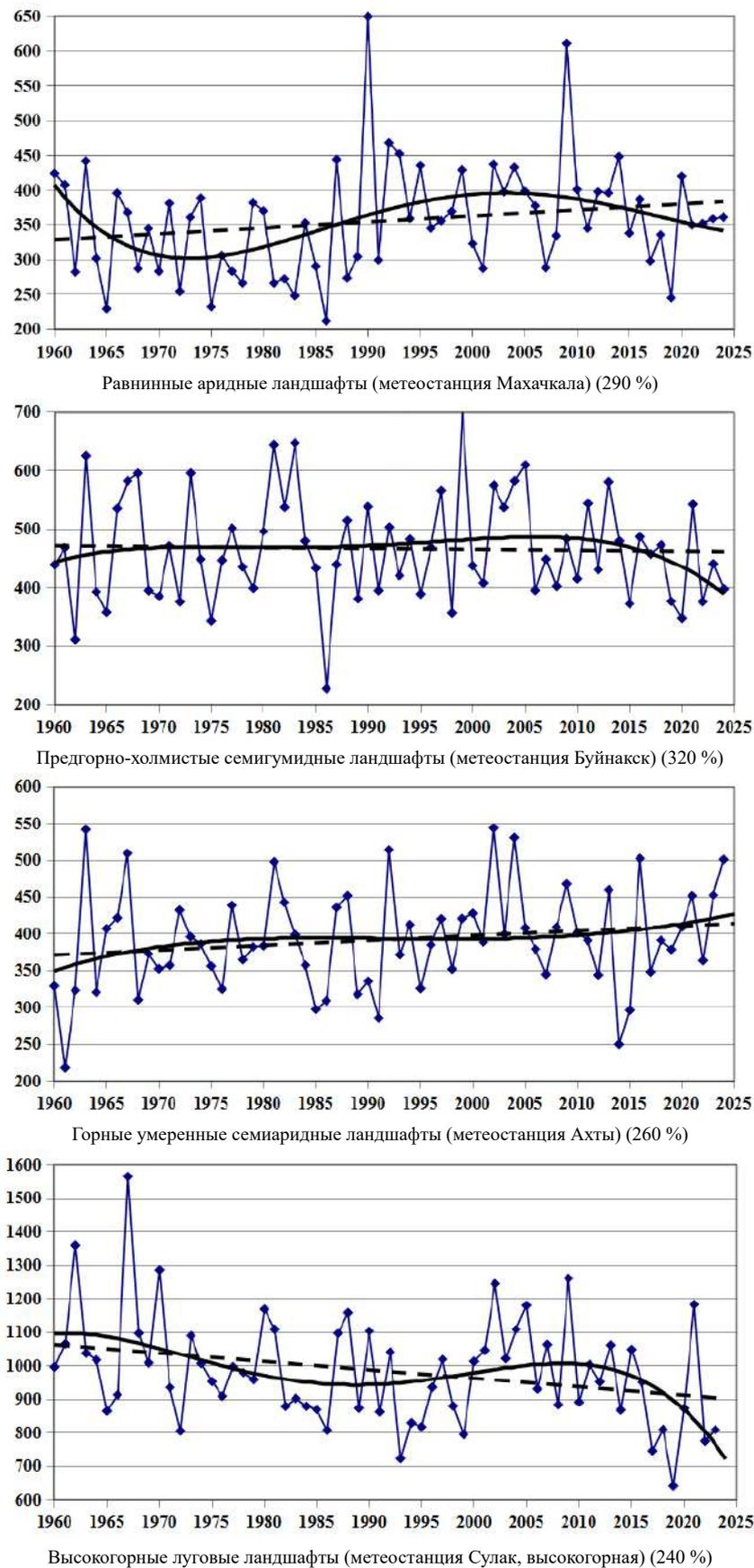


Рис. 5. Изменения годового количества осадков в высотных ландшафтных ярусах Дагестана

динамики ландшафтов, но и в качестве ландшафтообразующего фактора. Минимальный временной ряд, за который следует анализировать климатические условия, должен составлять или 30 лет, или 60 и более.

Анализ климатических параметров ландшафтов позволяет сделать вывод, что предгорные ландшафты Дагестана характеризуются большой временной неоднородностью климатических условий. Она проявляется в том, что для важнейших климатических параметров — температуры и осадков — характерна большая амплитуда колебаний, при этом изменчивость от года к году бывает сопоставима с изменчивостью за гораздо более длительный временной отрезок.

Для годовой температуры воздуха амплитуда колебания составляет около 4°, и, несмотря на существующие современные тенденции к увеличению (так называемое глобальное потепление), её неоднородность в пределах малых временных отрезков осталась такой же, как и для больших, то есть 2–3-летние вариации могут «гасить» нарастающие тенденции. Ещё большая изменчивость и неоднородность характерны для величины осадков и — в большей степени — производной от них, коэффициента увлажнения.

Годовая величина осадков изменяется в обоих случаях более чем на 300 %, тогда как в зональных ландшафтах на равнинах и в высотно-зональных в горах эта изменчивость существенно меньше. Так, климат переходных ландшафтов характеризуется величиной отношения максимального количества осадков к минимальному, всегда составляющей 300 %, а климат предгорных ландшафтов — больше 300 %.

Именно поэтому данный показатель — величина изменчивости осадков — может быть надёжным индикатором при выделении переходных ландшафтов, в нашем случае низкогорно-предгорных. Как и температуры, так и величина осадков характеризуются существенной временной неоднородностью в короткие промежутки времени, которая перекрывает низкочастотную составляющую, находящую выражение в современных климатических изменениях. Поэтому последние находят своё выражение в том, что при однонаправленных тенденциях изменения климата (выраженное на протяжении нескольких лет подряд похолодание/потепление или гумидизация/аридизация) создаются предпосылки для изменения площадей соответствующих типов растительности.

Заключение. Набор количественных и качественных параметров в сочетании со значительной пространственной мозаичностью местоположений и временной изменчивостью климатических условий формируют своеобразные черты низкогорно-предгорных ландшафтов российского Кавказа, которые следует выделять в отдельную классификационную единицу — самостоятельный ландшафтный ярус.

Результаты проведённых исследований ландшафтов российского Кавказа, и в частности Северо-Восточного Кавказа, позволяют сделать следующие выводы.

1. Географические следствия экотонности предгорных ландшафтов проявляются в том, что они характеризуются набором и сочетанием как минимум трёх геоморфологических элементов. Это:
 - а) хребты, представляющие собой локальные повышения на фоне равнинного рельефа и чаще всего являющиеся низкогорьями в геоморфологическом отношении (до 1000 м над уровнем моря);
 - б) равнинные участки, характеризующиеся незначительной крутизной (до 2–4°), чаще всего располагающиеся между хребтами или как минимум с одной стороны прилегающие к ним (то есть, по сути, являющиеся днищами котловин);
 - в) наиболее низкие хребты собственно горного сооружения Большого Кавказа, в геоморфологическом отношении являющиеся низкогорьями, а в ландшафте — низнегорьями, так как здесь начинается самый нижний высотный пояс, широколиственные леса.
2. Столь значительная геоморфологическая «пестрота» приводит к тому, что здесь формируется своеобразный мезоклимат, отличающийся от такового как прилегающих равнин (меньшие скорости ветра, более стабильный снежный покров и т. п.), так и гор (более высокие температуры и меньшее количество осадков). В результате геоморфологической «пестроты» и особенностей климата здесь формируется более широкий ряд местоположений и, соответственно, набор

физиономических типов растительности — травяной, кустарниковой и древесной, наиболее типичной для лесостепной зоны.

3. В низкогорно-предгорных ландшафтах в результате взаимодействия гор с прилегающими равнинами возникает своеобразная предгорная зональность, относимая к парадинамической зональности регионального уровня. Зональность предгорных ландшафтов выражается в чередовании гумидно-предгорного и аридно-теневого вариантов зональности. Кроме предгорной зональности, местами при непосредственном влиянии передовых хребтов, стоящих в виде барьера на пути движения воздушных масс, проявляется барьерно-высотная зональность ландшафтов. Задерживая насыщенные водяными парами воздушные массы и конденсируя их влагу на наветренных склонах, предгорные хребты создают своеобразный мезофильный ландшафт, резко отличающийся от территорий, находящихся в области барьерной тени.
4. Предгорные ландшафты в целом являются природными экотонами, поскольку здесь отмечаются более значительное, по сравнению с таковым смежных равнин и гор, разнообразие физико-географических (внутриландшафтных) условий, а также повышенная динамичность и более активный вещественно-энергетический обмен.
5. Предгорные ландшафты характеризуются значительным своеобразием. Оно проявляется в наличии более широкого спектра местоположений, чем в смежных равнинных и горных ландшафтах. Здесь представлены местоположения, типичные как для равнинных ландшафтов Предкавказья, так и для горных ландшафтных поясов Большого Кавказа.
6. Предгорные ландшафты характеризуются высокой изменчивостью и временной неоднородностью климатических условий. Положение на границе между равнинными и горными ландшафтами приводит к тому, что средняя годовая температура воздуха может соответствовать как таковой на прилегающих равнинах, для которых характерен теплоумеренный климат, так и температуре в расположенных выше горах (умеренный климат), то есть отмечается более значительная неоднородность климатических условий, чем таковая зональных (равнинных) и высотно-зональных (горных) ландшафтных поясов. Существенная нестабильность и неоднородность климатических условий отмечается также по сезонам и месяцам.
7. Аналогичная ситуация регистрируется в отношении осадков и увлажнения предгорных ландшафтов. В отличие от величины температуры воздуха, величина осадков наиболее изменчива в тёплое время года, в результате чего вегетационный период характеризуется чередованием условий, типичных для разных физиономических типов растительности.
8. Временная структура предгорных ландшафтов характеризуется относительно стабильными условиями переходных сезонов и значительным разнообразием состояний основных сезонов. В целом чередование условий, характерных для существования древесно-кустарниковой и травяной растительности, способствует наличию в контактной полосе как древесно-кустарниковых, так и травяных природных территориальных комплексов.

Работа представлена в рамках крупного научного проекта «Динамика геоэкологического состояния бассейнов горных рек Северо-Восточного Кавказа, Азербайджана и Ирана в условиях изменения климата и растущей антропогенной нагрузки» (соглашение № 075-15-2024-644).

Список использованных источников

1. Абдулаев К. А. Ландшафты горного Дагестана и их современное состояние : автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Ставрополь, 2008. 24 с. EDN: [NJGAFL](#)
2. Алибеков Л. А. Взаимодействие горных и равнинных ландшафтов (на примере Средней Азии). Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. М., 1988. 52 с.
3. Анисимов В. И. Морфометрический анализ рельефа. Сочи, 1999. 321 с.
4. Арманд Д. Л. Происхождение и типы природных границ // Известия Всесоюзного географического общества. 1955. Т. 87, № 3. С. 266–278.

5. Атаев З. В. Ландшафтный анализ низкогорно-предгорной полосы Северо-Восточного Кавказа // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2008. № 1. С. 59–67. EDN: [INLYOT](#)
6. Беручашвили Н. Л. Некоторые проблемы современной картографии. Актуальные проблемы картографии. Тбилиси : Тбилисский государственный университет, 1988. С. 22–33.
7. Братков В. В. Ландшафтно-геофизический анализ природно-территориальных комплексов Северо-Восточного Кавказа : дис. ... канд. геогр. наук. Тбилиси, 1992. 272 с.
8. Братков В. В., Атаев З. В., Байсиева Л. К. Временная неоднородность климатических условий предгорных ландшафтов Северо-Восточного Кавказа // Юг России: экология, развитие. 2013. № 1. С. 6–11. EDN: [RVQZIR](#)
9. Гвоздецкий Н. А. Физическая география Кавказа. Общая часть. Большой Кавказ. Вып. 1. Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1954. 208 с.
10. Гвоздецкий Н. А. Кавказ. Очерк природы. Москва : Географгиз, 1963. 264 с.
11. Добрынин Б. Ф. Ландшафты Дагестана // Землеведение. 1924. Т. 26, вып. 1–2. С. 93–113.
12. Добрынин Б. Ф. Ландшафтные (естественные) районы и растительность Дагестана. Москва, 1925. 42 с.
13. Добрынин Б. Ф. Физическая география СССР. Европейская часть и Кавказ. 2-е изд. Москва : Учпедгиз, 1949. 324 с.
14. Коломыц Э. Г. Ландшафтные исследования в переходных зонах: методологический аспект. Москва : Наука, 1987. 115 с.
15. Коломыц Э. Г. Экотон как объект физико-географических исследований // Известия Академии наук СССР. Серия Географическая. 1988. № 5. С. 24–36.
16. Максютков Ф. А. Ландшафты предгорий. Уфа : Изд-во Башкирск. ун-та, 1980. 76 с.
17. Николаев В. А. Предгорья Алтая – региональный ландшафтный экотон // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 1994. № 2. С. 58–65.
18. Николаев В. А. Ландшафтные экотоны // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2003. № 6. С. 3–9.
19. Преображенский В. С., Александрова Т. Д., Куприянова Т. П. Основы ландшафтного анализа. Москва : Наука, 1988. 192 с.
20. Симонов Ю. Г. Морфометрический анализ рельефа. Смоленск : СГУ, 1998. 270 с.
21. Сочава В. Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск : Изд-во Наука, Сибирское отделение, 1978. 320 с. EDN: [TARVMP](#)
22. Спиридонов А. И. Основы общей методики полевых геоморфологических исследований. Москва : Высшая школа, 1970. 458 с.
23. Федина А. Е. Физико-географическое районирование северного склона Большого Кавказа // Ландшафтное картографирование и физико-географическое районирование горных областей. Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1972. С. 6–72.
24. Шальнев В. А. Ландшафты Северного Кавказа: эволюция и современность. Ставрополь : Ставропольский гос. ун-т, 2004. 265 с. EDN: [SCUDHJ](#)

УДК 911.2

Реакция аридных ландшафтов бассейнов рек Российского Прикаспия на современные климатические изменения

Атаев З. В.^{1,2,3}

¹ Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН, Махачкала, Россия

² Дагестанский государственный педагогический университет имени Р. Гамзатова, Махачкала, Россия

³ Кабардино-Балкарский научный центр РАН, Нальчик, Россия

✉ zagir05@mail.ru

В работе приводится анализ региональных особенностей климатической динамики аридных ландшафтов бассейнов рек Прикаспийского Дагестана по данным метеостанций Кочубей, Махачкала и Дербент. Материалом исследования явились климатические показатели опорных метеостанций. Используются методы осреднения, интерполяции и экстраполяции климатических показателей. Антропогенная деятельность привела к «затуханию» этих показателей; для их анализа необходимо проведение детальных климатических исследований прикаспийских ландшафтов.

Ключевые слова: ландшафт, Прикаспийский Дагестан, глобальный климат, региональный климат, современные климатические изменения, климатическая изменчивость ландшафтов

Современные ландшафты Прикаспийского региона России представляют собой сложную и динамичную систему, которая находится под нарастающим воздействием как природных, так и антропогенных факторов [3].

Климатические изменения, наблюдаемые в последние десятилетия [9], оказывают значительное влияние на водные ресурсы Прикаспия. Увеличение температуры воздуха приводит к росту испарения, что, в свою очередь, сокращает сток рек, таких как Волга, Терек, Сулак, Самур и многие другие, и вызывает обмеление Каспийского моря. Это явление имеет серьезные экологические последствия, среди которых — ухудшение качества воды, изменение ландшафтов и угроза для биоразнообразия региона. Обмеление моря также затрагивает экономические аспекты (рыболовство и туризм), что требует комплексного подхода к решению возникших проблем [11].

Хозяйственная деятельность, включая строительство водохранилищ и ирригационных систем, также вносит свой вклад в изменение водного баланса региона. Эти гидротехнические сооружения могут как улучшать, так и ухудшать состояние водных ресурсов — в зависимости от того, как они проектируются и эксплуатируются. Важно отметить, что при планировании таких проектов не всегда учитываются экологические аспекты, что может привести к долгосрочным негативным последствиям для экосистем.

Материал и методы. Реакция ландшафтов региона на современные климатические изменения рассмотрена в работах З. В. Атаева [3]; З. В. Атаева, В. В. Браткова и Т. Р. Балгуева [2]; З. В. Атаева, В. В. Браткова и М. И. Гаджибекова [4–6]; В. В. Браткова и З. В. Атаева [7]; В. В. Браткова, М. И. Гаджибекова и З. В. Атаева [8]; И. А. Керимова, В. В. Браткова и Л. Р. Бекмурзаевой [10] и других.

Нами по данным дагестанских метеостанций Кочубей, Махачкала и Дербент были проанализированы современные климатические изменения (температуры воздуха, количества атмосферных осадков, коэффициента увлажнения и розы ветров) ландшафтов Российского Прикаспия, которые позволяют более точно оценить их влияние на гидрографическую сеть и на трансгрессивно-регрессивный режим Каспийского моря.

В работе использованы как традиционные методы мониторинга, так и современные технологии, такие как дистанционное зондирование Земли на основе разногодичных космоснимков и моделирование климатических процессов (теплооборота, влагооборота и циркуляции воздуха). Эти инструменты открывают новые горизонты для понимания сложных взаимосвязей между климатом и водными ресурсами, что является необходимым для разработки эффективных мер по защите прибрежных ландшафтов.

Результаты. Ландшафтное разнообразие территории вызвано прежде всего климатическими особенностями. Климатическая изменчивость прикаспийских ландшафтов за 1960–2024 гг. показана на рис. 1–3. Приведены среднегодовые температуры воздуха (рис. 1), количество атмосферных осадков (рис. 2) и — как производное от них — коэффициент увлажнения (рис. 3), выявляющие особенности сезонной и межгодовой динамики ландшафтов.

За рассматриваемый временной период, с 1960 по 2024 г., средняя годовая температура воздуха в Кочубее составила +12,1 °С, в Махачкале — +12,5 °С, в Дербенте — +13,3 °С. Как видно из представленных данных (рис. 1), по всей территории Прикаспийского Дагестана отмечается в разной степени выраженный рост годовой температуры воздуха. Так, на территории Терско-Кумской низменности (Кочубей, +2,2 °С) и на юге Приморской низменности (Дербент, +2,7 °С) этот процесс протекает активнее, чем на севере Приморской низменности (Махачкала, +1,5 °С). При этом максимум средней годовой температуры воздуха регистрировался в Кочубее и Махачкале в 2023 г. (+13,9 и +14,2 °С соответственно), а в Дербенте — в последнем, 2024 г. (+15,3 °С). Предыдущие всплески среднегодовой температуры воздуха наблюдались по прикаспийским ландшафтам также в 1966 г. (Кочубей — +13,4 °С, Махачкала — +14,0 °С, Дербент — +14,3 °С) и в 2010 г. (Кочубей — +13,7 °С, Махачкала — +13,9 °С, Дербент — +14,8 °С). Минимумы среднегодовой температуры воздуха приходились на 1969 г. (Кочубей — +13,7 °С, Махачкала — +13,9 °С, Дербент — +14,8 °С) и на 1993 г. (Кочубей и Махачкала — +10,0 °С, Дербент — +11,5 °С).

Показатели годового количества осадков (рис. 2) и их изменчивость не имеют столь однозначной тенденции, как температура воздуха. Она проявляется в короткопериодических (2–3 года, реже 3–5 лет) или однонаправленных изменениях (рост или сокращение количества осадков).

За рассматриваемый временной отрезок среднее годовое количество осадков в Кочубее равно 292 мм, в Махачкале — 356 мм, в Дербенте — 395 мм. В то же время наблюдается незначительное уменьшение годового количества осадков на Терско-Кумской низменности (Кочубей — –35 мм) и их небольшое увеличение на Приморской низменности (Махачкала и Дербент — по +50 мм). Максимум осадков в Кочубее выпадал в 2004 г. (549 мм), в Махачкале — в 1990 г. (650 мм), в Дербенте — в 2012 г. (615 мм). Минимум осадков приходился в Кочубее на 1994 г. (183 мм), в Махачкале — на 1986 г. (212 мм), в Дербенте — на 2019 г. (233 мм).

Что касается коэффициента увлажнения, то его тренды (рис. 3) за 1960–2024 гг. иллюстрируют ухудшение условий тепловлагообеспечения с разной степенью выраженности (Кочубей — –0,07, Махачкала — –0,03, Дербент — –0,05).

Оценивая климатические изменения, следует отметить, что для аридных ландшафтов Прикаспийского Дагестана они в целом совпадают с глобальными и региональными трендами и не осложняют общую картину. Для их оценки необходимы дальнейшие локальные ландшафтные исследования. Предстоящий анализ позволит заложить научно-методические основы для разработки критериев и показателей адаптивного землепользования в ландшафтах. Значительные социально-экономические изменения в муниципальных структурах республики и множество экологических причин «затушевали» климатические изменения ландшафтов. Именно поэтому актуально проведение детальных климатических измерений откликов ландшафтов Прикаспийского региона на современную климатическую динамику, что немаловажно для устойчивого развития территории.

Заключение. В условиях изменения климата важно не только реагировать на уже существующие проблемы, но и предвидеть возможные угрозы, разрабатывать стратегии адаптации и смягчения последствий. Это требует междисциплинарного подхода и вовлечения различных заинтересованных сторон, включая государственные органы, научные учреждения и местные сообщества.

Перспективы исследований в данной области обширны. Необходимо продолжать мониторинг изменений в гидрографической сети, а также проводить более глубокий анализ влияния климатических факторов на прикаспийские ландшафты. Важно также развивать модели, которые позволят предсказывать последствия реализации различных сценариев изменения климата и оценивать эффективность предлагаемых мер по защите водных ресурсов региона.

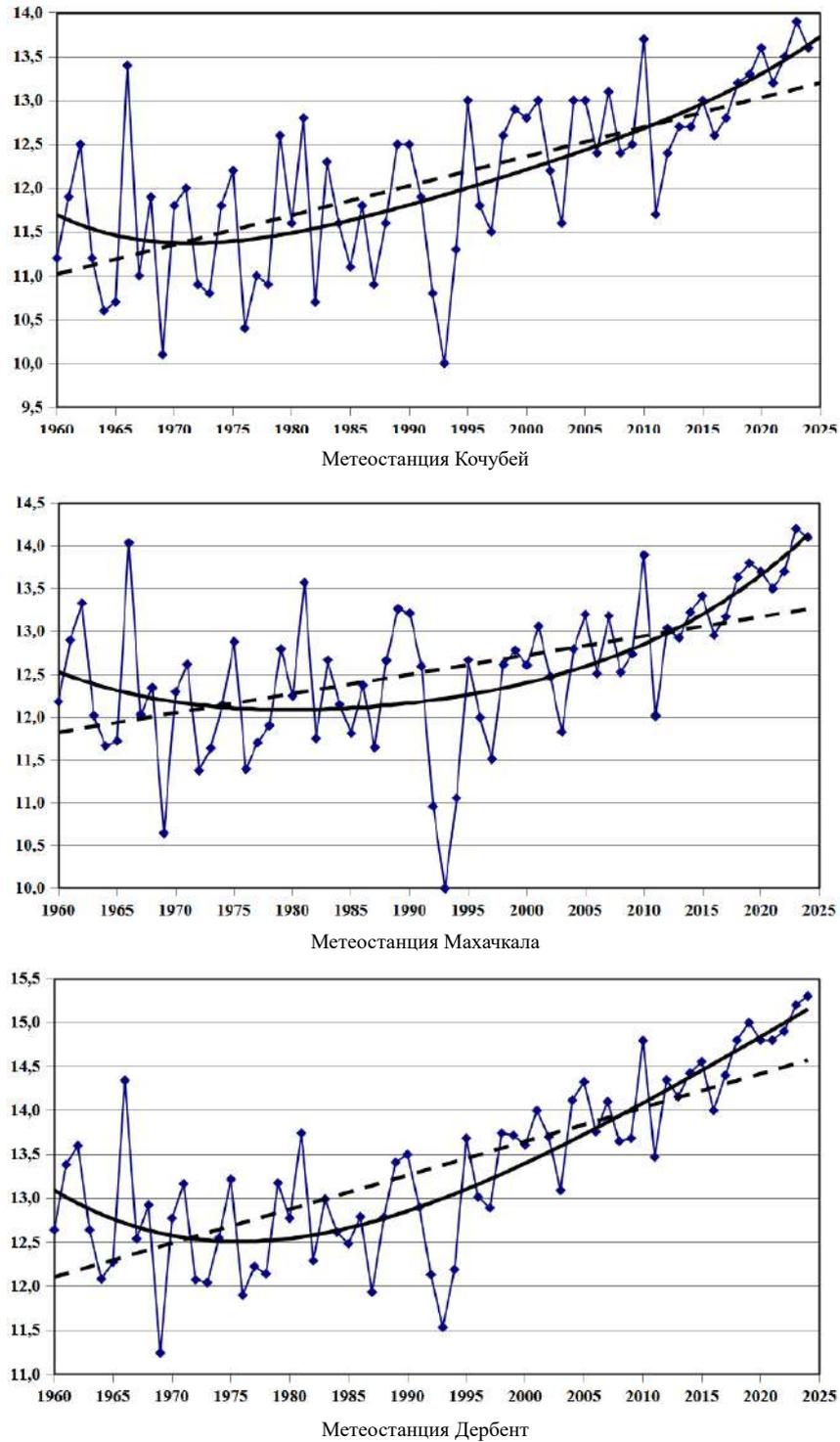


Рис. 1. Изменения средней годовой температуры воздуха за 1960–2024 гг. Условные обозначения здесь и далее (на рис. 2–3): пунктирная линия — линейный тренд; сплошная — полиномиальный тренд

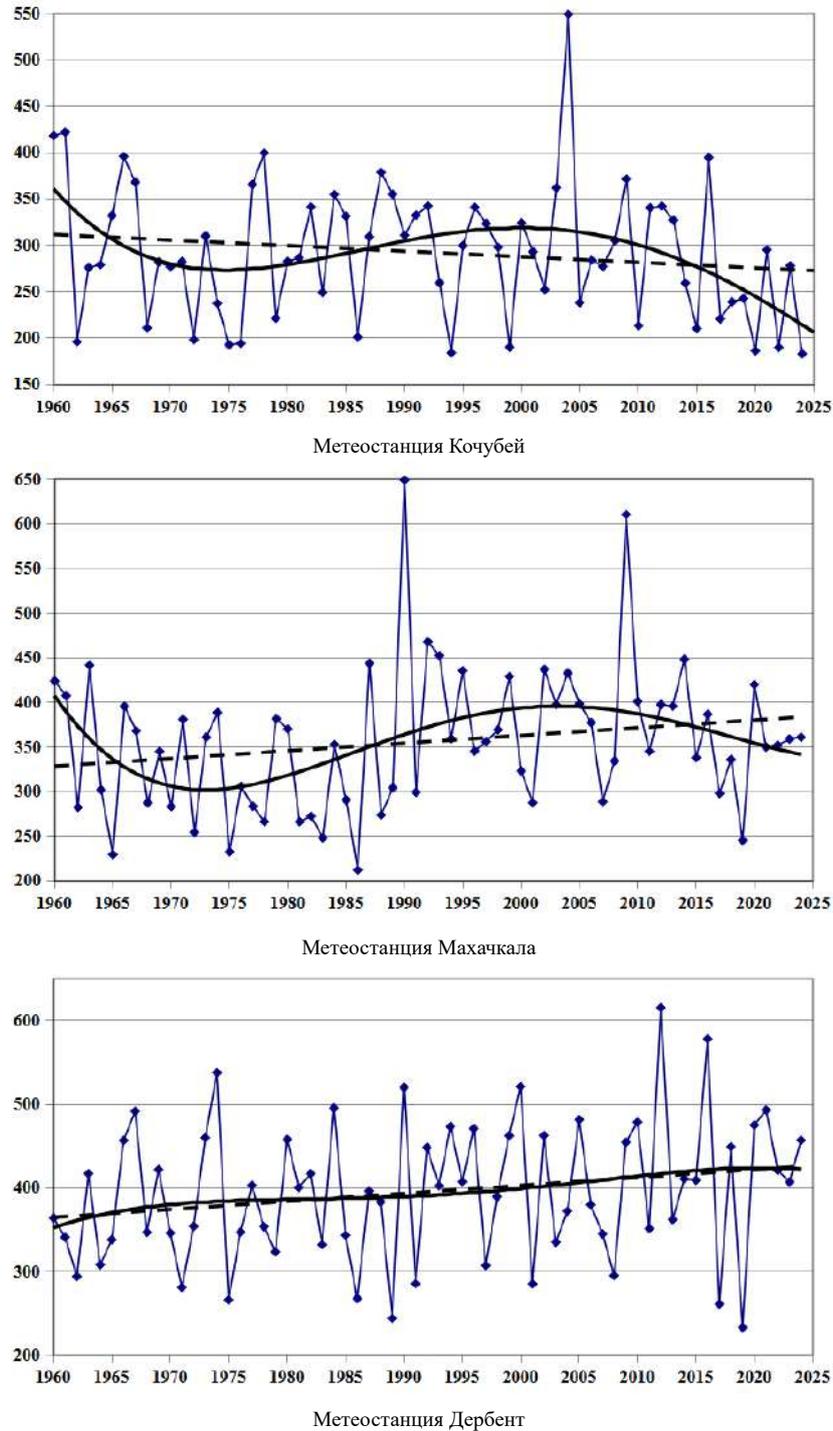


Рис. 2. Изменения годового количества осадков за 1960–2024 гг.

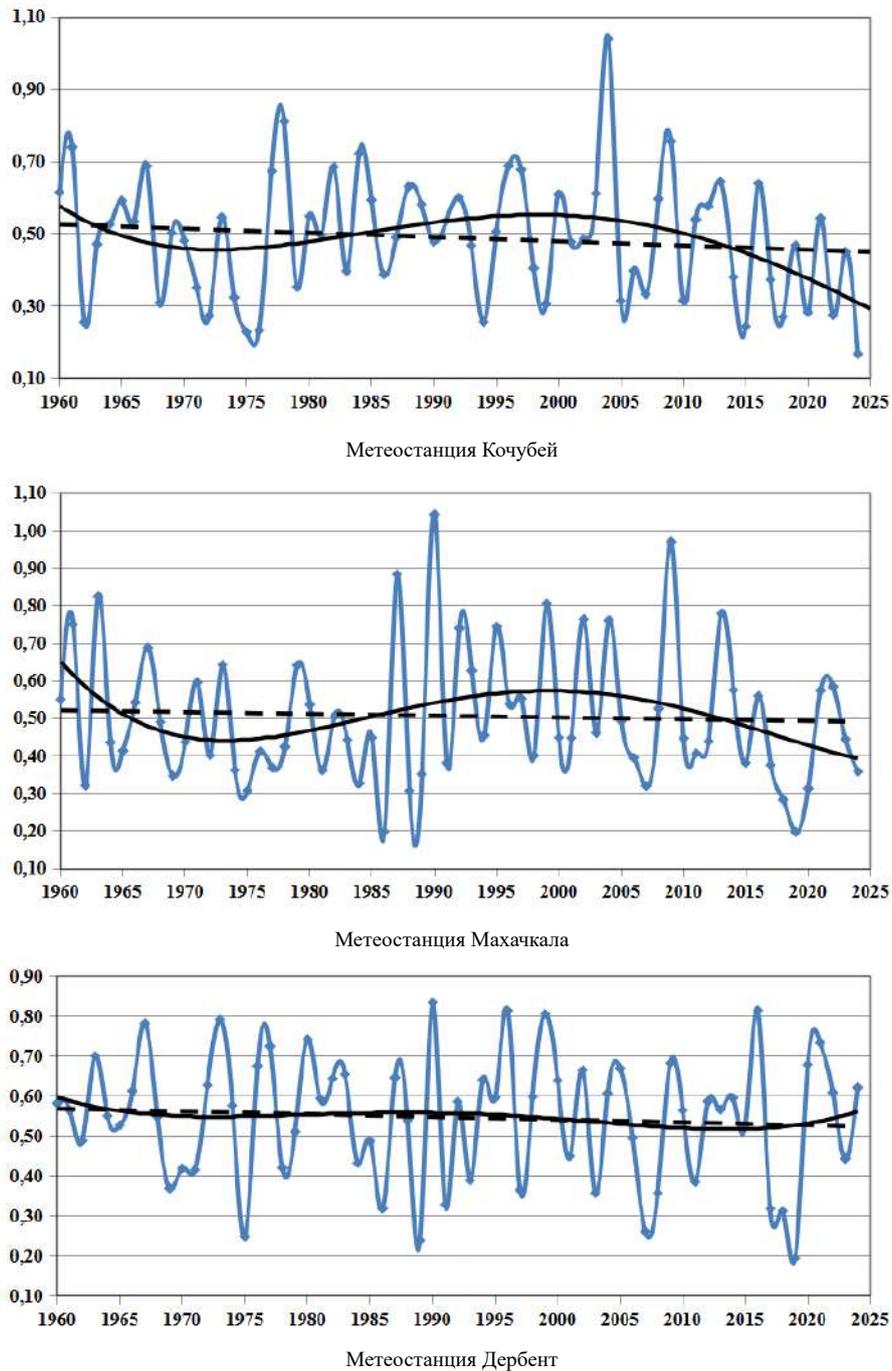


Рис. 3. Изменения коэффициента увлажнения за 1960–2024 гг.

Таким образом, работа подчёркивает важность комплексного подхода к изучению гидрографической сети ландшафтов Российского Прикаспия и её реакции на современные климатические изменения. Только совместными усилиями учёных, государственных структур и общества можно достичь устойчивого управления водными ресурсами и сохранить уникальные приморские ландшафты региона для будущих поколений.

Работа выполнена в рамках научного проекта Российского научного фонда «Пространственно-временная изменчивость приморских природных и антропогенных ландшафтов Дагестана под влиянием современных климатических изменений и колебаний уровня Каспийского моря» (соглашение № 25-17-20040).

Список использованных источников

1. Атаев З. В. Реакция ландшафтов Дагестана на современные климатические изменения // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2023. № 3 (94). С. 10–14. <https://doi.org/10.33580/2541-9684-2023-94-3-10-14>. EDN: CXJBIJ
2. Атаев З. В., Братков В. В., Балгуев Т. Р., Заурбеков Ш. Ш. Оценка геоэкологических последствий современных изменений климата полупустынных ландшафтов Северного Кавказа // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2010. № 2 (11). С. 89–94. EDN: NWFSJR
3. Атаев З. В., Братков В. В., Гаджибеков М. И. Полупустынные ландшафты Северо-Западного Прикаспия: изменчивость климата и динамика. Махачкала : ДГПУ, 2011. 123 с. EDN: GOOLSL
4. Атаев З. В., Братков В. В., Гаджибеков М. И. Реакция полупустынных ландшафтов Приморской низменности Дагестана на современные климатические изменения // Юг России: экология, развитие. 2014. Т. 9, № 4. С. 27–39. EDN: TDRIBL
5. Атаев З. В., Братков В. В., Гаджибеков М. И. Аридные ландшафты Северного Кавказа: пространственная структура, реакция на климатические изменения и антропогенная трансформация // Степи Северной Евразии : материалы VIII международного симпозиума, Оренбург, 10–13 сентября 2018 г. Оренбург : Институт степи Уральского отделения Российской академии наук, 2018. С. 123–126. EDN: VJLTWC
6. Атаев З. В., Братков В. В., Гаджибеков М. И. Сезонная и многолетняя динамика полупустынных ландшафтов Северо-Западного Прикаспия (на примере можжевельникового урочища «Буруны» Терско-Кумской низменности) // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2018. Т. 12, № 4. С. 34–48. <https://doi.org/10.31161/1995-0675-2018-12-4-34-48>. EDN: LIPDYR
7. Братков В. В., Атаев З. В. Оценка влияния современных климатических условий на природно-территориальные комплексы Северо-Восточного Кавказа (по материалам дистанционного зондирования Земли) // Мониторинг. Наука и технологии. 2017. № 2 (31). С. 6–14. EDN: YZIGID
8. Братков В. В., Гаджибеков М. И., Атаев З. В. Изменчивость климата и динамика полупустынных ландшафтов Северо-Западного Прикаспия // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2008. № 4 (5). С. 90–99. EDN: KGYCZH
9. Глобальный климат и почвенный покров России: проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидация последствий и адаптационные мероприятия (сельское и лесное хозяйство) / Р. С. Х. Эдельгериев, А. Л. Иванов, И. М. Донник и др. Москва : Издательство МБА, 2021. 700 с. <https://doi.org/10.52479/978-5-6045103-9-1>. EDN: MFABZG

10. Керимов И. А., Братков В. В., Бекмурзаева Л. Р. Изменчивость климатических условий аридных ландшафтов Северного Кавказа // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа : коллективная монография по материалам XI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа (ГЕОКАВКАЗ-2021)». Том XI. Москва : Институт истории естествознания и техники имени С. И. Вавилова РАН, 2021. С. 444–449. EDN: [YDBDAD](#)
11. Сулейманлы Д. Последствия резкого понижения уровня Каспийского моря в прибрежной зоне Азербайджанской Республики // Гидрометеорология и экология. 2025. № 1 (116). С. 38–44.

УДК 551.50

Методы обработки метеорологических данных станции Campbell с использованием библиотек языка R

Батукаев А. А., Керимов И. А.

Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова,
Грозный, Россия

✉ kerimov@ifz.ru

В статье представлены методы обработки блоков метеорологической информации, которые формируют метеостанции Campbell Scientific, установленные на карбоновом полигоне ГНТУ. Указаны технические характеристики оборудования станций. Рассмотрены особенности формируемых станций блоков данных. Приведены ключевые фрагменты сценария для обработки данных и примеры результатов работы.

Ключевые слова: R language, data.table, ggplot2, метеоданные

В работе с метеостанциями на карбоновом полигоне ГНТУ авторы столкнулись с необходимостью регулярного формирования отчётов о динамике основных климатических параметров. С учётом размеров и специфики формата данных, формируемых оборудованием, и после неудачных попыток применения MS Office Excel было принято решение о переходе на специализированное программное обеспечение. Был выбран язык R [2] и его библиотеки data.table [1, 3] и ggplot2 [4].

Использование такого программного обеспечения особенно оправдано при необходимости большого количества часто повторяющихся действий, таких как формирование отчётов по месяцам.

Технические характеристики станций. Метеостанции MesoPRO Research-Grade Mesonet Station представляют собой комплекс метеорологических датчиков и компьютер для управления аппаратурой и регистрации данных, установленные на мачте. Состав оборудования станции и технические характеристики приборов и датчиков представлены в табл. 1.

Таблица 1. Приборы и датчики станции Campbell Scientific (MesoPRO Research-Grade Mesonet Station)

| Название | Функция, назначение, характеристики |
|---|--|
| CR1000X DATA Logger | Микрокомпьютер для регистрации данных с датчиков, хранения и передачи результатов измерений |
| TB4-L Rain Gage with 8 in. Orifice | Осадкомер. Измерение объёма осадков. Фиксируются каждые 0,254 мм осадков. Погрешность $\pm 2\%$ при интенсивности осадков до $250 \text{ мм} \cdot \text{ч}^{-1}$ |
| EE181-L Temperature and Relative Humidity Probe | Термометр/гигрометр для определения температуры и относительной влажности воздуха. Диапазон измерений температуры $-40 \dots +60 \text{ }^\circ\text{C}$; погрешность $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ при $+23 \text{ }^\circ\text{C}$. Диапазон для относительной влажности $0-100\%$; погрешность $1,5-2,5\%$ |
| CS655 Soil Water Content Reflectometer | Датчик влажности, температуры и электропроводности почвы. Диапазон измерений электрической проводимости $0-8 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ с погрешностью $\pm 5\%$. Диапазон измерений для объёмного содержания влаги $0-100\%$ с погрешностью до $\pm 3\%$. Диапазон измерений температуры почвы $-50 \dots +70 \text{ }^\circ\text{C}$; погрешность $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| CS320 Digital Thermopile Pyranometer | Цифровой термобатарейный пиранометр для измерения приходящей солнечной радиации. Для приходящего солнечного излучения с длинами волн $385-2105 \text{ nm}$ измерение радиации возможно в диапазоне $0-2000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ |
| CS100 Barometric Pressure Sensor | Датчик атмосферного давления. Диапазон измерений атмосферного давления $600-1100 \text{ hPa}$; погрешность $\pm 2 \text{ hPa}$ |
| 05108-L Wind Monitor-HD | Датчик измерения скорости и направления ветра. Скорость ветра: $0-200 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$; погрешность $0,4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Направление ветра: $0-360^\circ$; погрешность $\pm 3^\circ$ |

Станция регистрирует основные климатические параметры каждые 10 с, накапливая в течение года 3,15 млн записей. Объём файла после конвертации в формат csv составляет примерно 380 Мб. В табл. 2 приведены регистрируемые параметры и единицы измерения. Общий вид данных после конвертации представлен на рис. 1.

Таблица 2. Данные, регистрируемые станцией

| Обозначение поля | Содержание, единица измерения |
|------------------|---|
| TIMESTAMP | время и дата |
| RECORD | номер записи |
| TA | температура воздуха, deg C |
| RH | относительная влажность, % |
| P | осадки, mm |
| PA | атмосферное давление, kPa |
| WS | скорость ветра, $m \cdot s^{-1}$ |
| WD | направление ветра, deg N |
| SW_IN | приходящая солнечная радиация, $W \cdot m^{-2}$ |
| SWC | влажность почвы, % |
| COND_SOIL | электропроводность почвы, $dS \cdot m^{-2}$ |
| TS | температура почвы, deg C |
| Batt_volt | напряжение, V |
| PTemp | температура логгера, deg C |

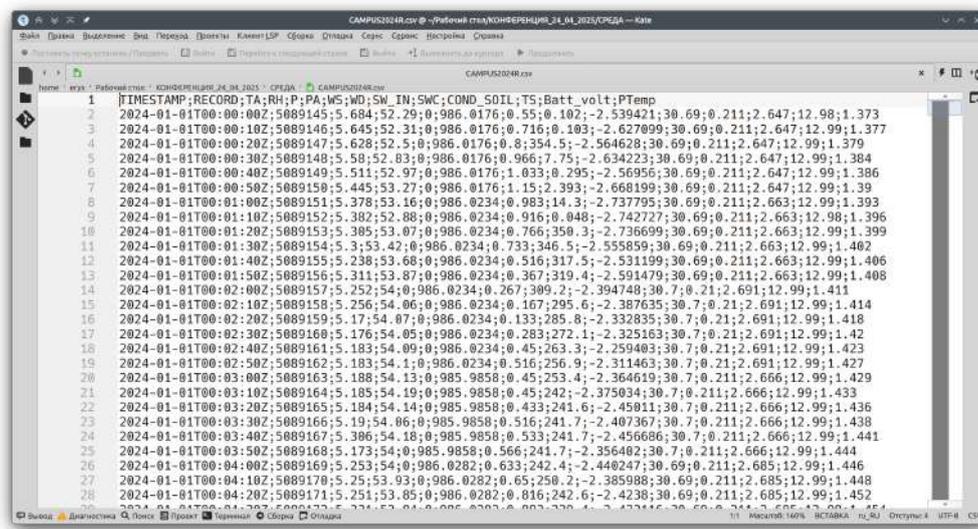


Рис. 1. Данные, конвертированные в формат csv

Для обработки данных, получаемых с метеостанций, используется интерпретатор языка R (v. 4.4) и две ключевые библиотеки (packages) — ggplot2 (v. 3.4) для создания графиков и data.table (v. 1.17) непосредственно для обработки. В качестве рабочей среды используется RStudio (v. 2024.12.1) [8]. Все работы производятся под управлением операционной системы Kubuntu 24.04 [7]. Аппаратная составляющая представлена системой на базе процессора AMD Ryzen 3, с 8 Гб ОЗУ.

Программное обеспечение и основная методика работы. R — свободный язык программирования с открытым исходным кодом. Он предоставляет мощные инструменты для работы, позволяя эффективно очищать, преобразовывать и анализировать метеорологические и иные данные.

IDE RStudio предоставляет возможность интерактивного контроля за объектами вычислений, располагает базовыми возможностями пошаговой отладки кода. В IDE RStudio встроена возможность автодополнения программного кода в процессе набора.

data.table представляет собой высокопроизводительную версию базового data.frame с улучшенным синтаксисом и функциями для простоты использования, удобства и скорости программирования. Ключевой является возможность работы с объектами размером до 100 Гб (в v. 1.17) [9]; обеспечено значительное превосходство в скорости обработки по сравнению с таковой data.frame (до 20 раз на имеющихся данных).

ggplot2 — это система для декларативного создания графиков с очень большими возможностями и списком различных типов графиков и диаграмм. Схема процесса обработки представлена на рис. 2.

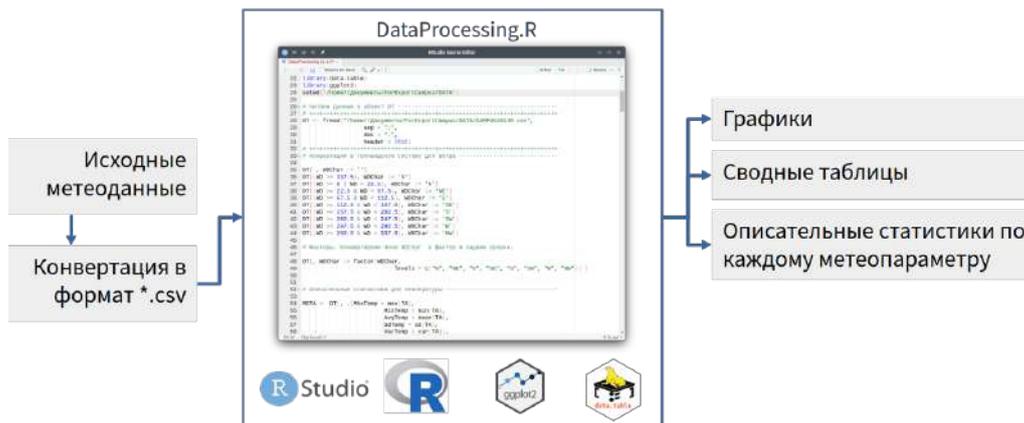


Рис. 2. Схема процесса обработки

Весь процесс от чтения файла с диска и вычислений до записи всех результатов занимает 12,8 с для системы с SSD при размере блока данных 380 Мб. Исходные данные нуждаются в конвертации в формат csv. Сценарий на языке R с комментариями занимает 430 строк.

После чтения данных на первом этапе обрабатываются направления ветра (см. рис. 3). Значения в градусах (0–360) преобразовываются в восемь категорий, обозначенных в голландской системе (см. листинг 1).

```

1 DT[, WDChar := '']
2 DT[(WD >= 337.5), WDChar := 'N']
3 DT[(WD >= 0 | WD < 22.5), WDChar := 'N']
4 DT[(WD >= 22.5 & WD < 67.5), WDChar := 'NE']
5 DT[(WD >= 67.5 & WD < 112.5), WDChar := 'E']
6 DT[(WD >= 112.5 & WD < 157.5), WDChar := 'SE']
7 DT[(WD >= 157.5 & WD < 202.5), WDChar := 'S']
8 DT[(WD >= 202.5 & WD < 247.5), WDChar := 'SW']
9 DT[(WD >= 247.5 & WD < 292.5), WDChar := 'W']
10 DT[(WD >= 292.5 & WD < 337.5), WDChar := 'NW']
    
```

Листинг 1. Конвертация в голландскую систему для направлений ветра

На следующем этапе производится агрегация данных по суткам. Для каждого суток вычисляются основные статистики. В качестве примера — расчёт для температуры воздуха на листинге 2.

```

1 MDTA <- DT[, .(MaxTemp = max(TA),
2   MinTemp = min(TA),
3   AvgTemp = mean(TA),
4   SdTemp = sd(TA),
5   VarTemp = var(TA),
6   Q75 = quantile(TA, 0.75)),
7   by = .(Date = format(TIMESTAMP, "%Y-%m-%d"))]
    
```

Листинг 2. Описательные статистики для температуры воздуха

| | TIMESTAMP | RECORD | TA | RH | P | PA | WS | WD | SW_IN | SWC | COND_SOIL | TS | Batt_volt | PTemp | WDChar |
|----|---------------------|---------|-------|-------|---|----------|-------|---------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|--------|
| 1 | 2024-01-01 00:00:00 | 5089145 | 5.684 | 52.29 | 0 | 986.0176 | 0.550 | 0.102 | -2.539421 | 30.69 | 0.211 | 2.647 | 12.98 | 1.373 | N |
| 2 | 2024-01-01 00:00:10 | 5089146 | 5.645 | 52.31 | 0 | 986.0176 | 0.716 | 0.103 | -2.627099 | 30.69 | 0.211 | 2.647 | 12.99 | 1.377 | N |
| 3 | 2024-01-01 00:00:20 | 5089147 | 5.628 | 52.50 | 0 | 986.0176 | 0.800 | 354.500 | -2.564628 | 30.69 | 0.211 | 2.647 | 12.99 | 1.379 | N |
| 4 | 2024-01-01 00:00:30 | 5089148 | 5.580 | 52.83 | 0 | 986.0176 | 0.966 | 7.750 | -2.634223 | 30.69 | 0.211 | 2.647 | 12.99 | 1.384 | N |
| 5 | 2024-01-01 00:00:40 | 5089149 | 5.511 | 52.97 | 0 | 986.0176 | 1.033 | 0.295 | -2.569560 | 30.69 | 0.211 | 2.647 | 12.99 | 1.386 | N |
| 6 | 2024-01-01 00:00:50 | 5089150 | 5.445 | 53.27 | 0 | 986.0176 | 1.150 | 2.393 | -2.668199 | 30.69 | 0.211 | 2.647 | 12.99 | 1.390 | N |
| 7 | 2024-01-01 00:01:00 | 5089151 | 5.378 | 53.16 | 0 | 986.0234 | 0.983 | 14.300 | -2.737795 | 30.69 | 0.211 | 2.663 | 12.99 | 1.393 | N |
| 8 | 2024-01-01 00:01:10 | 5089152 | 5.382 | 52.88 | 0 | 986.0234 | 0.916 | 0.048 | -2.742727 | 30.69 | 0.211 | 2.663 | 12.98 | 1.396 | N |
| 9 | 2024-01-01 00:01:20 | 5089153 | 5.305 | 53.07 | 0 | 986.0234 | 0.766 | 350.300 | -2.736699 | 30.69 | 0.211 | 2.663 | 12.99 | 1.399 | N |
| 10 | 2024-01-01 00:01:30 | 5089154 | 5.300 | 53.42 | 0 | 986.0234 | 0.733 | 346.500 | -2.555859 | 30.69 | 0.211 | 2.663 | 12.99 | 1.402 | N |
| 11 | 2024-01-01 00:01:40 | 5089155 | 5.238 | 53.68 | 0 | 986.0234 | 0.516 | 317.500 | -2.531199 | 30.69 | 0.211 | 2.663 | 12.99 | 1.406 | NW |
| 12 | 2024-01-01 00:01:50 | 5089156 | 5.311 | 53.87 | 0 | 986.0234 | 0.367 | 319.400 | -2.591479 | 30.69 | 0.211 | 2.663 | 12.99 | 1.408 | NW |
| 13 | 2024-01-01 00:02:00 | 5089157 | 5.252 | 54.00 | 0 | 986.0234 | 0.267 | 309.200 | -2.394748 | 30.70 | 0.210 | 2.691 | 12.99 | 1.411 | NW |
| 14 | 2024-01-01 00:02:10 | 5089158 | 5.256 | 54.06 | 0 | 986.0234 | 0.167 | 295.600 | -2.387635 | 30.70 | 0.210 | 2.691 | 12.99 | 1.414 | NW |
| 15 | 2024-01-01 00:02:20 | 5089159 | 5.170 | 54.07 | 0 | 986.0234 | 0.133 | 285.800 | -2.332835 | 30.70 | 0.210 | 2.691 | 12.99 | 1.418 | W |
| 16 | 2024-01-01 00:02:30 | 5089160 | 5.176 | 54.05 | 0 | 986.0234 | 0.283 | 272.100 | -2.325163 | 30.70 | 0.210 | 2.691 | 12.99 | 1.420 | W |
| 17 | 2024-01-01 00:02:40 | 5089161 | 5.183 | 54.09 | 0 | 986.0234 | 0.450 | 263.300 | -2.259403 | 30.70 | 0.210 | 2.691 | 12.99 | 1.423 | W |
| 18 | 2024-01-01 00:02:50 | 5089162 | 5.183 | 54.10 | 0 | 986.0234 | 0.516 | 256.900 | -2.311463 | 30.70 | 0.210 | 2.691 | 12.99 | 1.427 | W |
| 19 | 2024-01-01 00:03:00 | 5089163 | 5.188 | 54.13 | 0 | 985.9858 | 0.450 | 253.400 | -2.364619 | 30.70 | 0.211 | 2.666 | 12.99 | 1.429 | W |
| 20 | 2024-01-01 00:03:10 | 5089164 | 5.185 | 54.19 | 0 | 985.9858 | 0.450 | 242.000 | -2.375034 | 30.70 | 0.211 | 2.666 | 12.99 | 1.433 | SW |

Рис. 3. Чтение данных и конвертация направления ветра в буквенное обозначение. Поле WDChar с символьными обозначениями для сторон света

В этом примере создаётся промежуточный data.table, содержащий значения максимума и минимума температуры, средние значения, стандартные отклонения (SD), Q75 и дисперсию на каждые сутки для годового блока наблюдений. В дальнейшем результат промежуточных вычислений используется для построения графиков изменения за год (см. рис. 4).

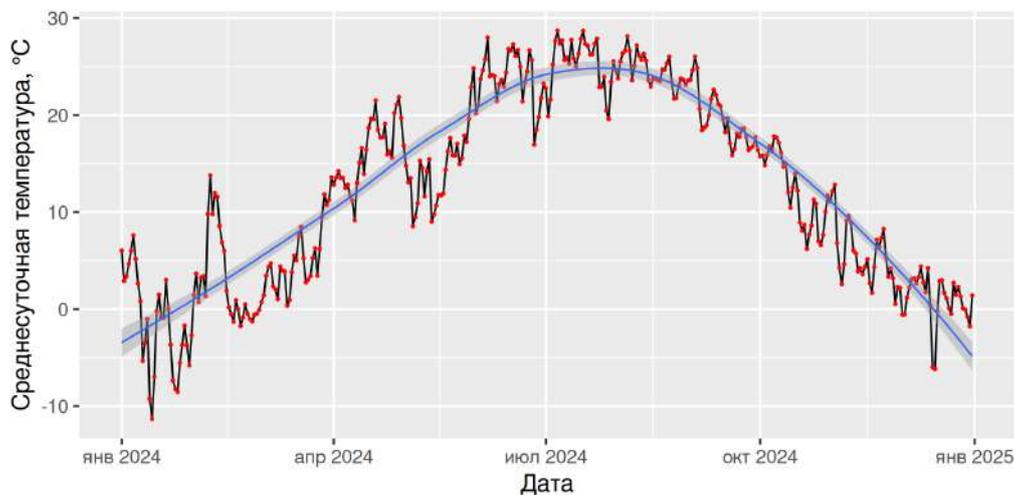


Рис. 4. График среднесуточных температур за 2024 г.

Для сводных таблиц диапазон агрегации устанавливается в 1 месяц. Они строятся аналогичным образом (см. листинг 3). Пример сводной таблицы с данными по месяцам см. на рис. 5.

```

1 MDTA.month <- DT[, .(MaxTA = max(TA) ,
2   MinTA = min(TA) ,
3   AvgTA = mean(TA) ,
4   SdTA = sd(TA) ,
5   VarTA = var(TA) ) ,
  by = .(Date = format(TIMESTAMP, "%Y-%m")) ]
    
```

Листинг 3. Построение сводной таблицы с результатами за каждый месяц; max, min, mean и SD для температуры воздуха

| | Date | MaxTA | MinTA | AvgTA | SdTA | VarTA |
|----|---------|--------|---------|------------|----------|-----------|
| 1 | 2024-01 | 11.650 | -14.730 | -1.5086396 | 5.410760 | 29.276326 |
| 2 | 2024-02 | 20.420 | -5.759 | 3.0078900 | 5.299792 | 28.087793 |
| 3 | 2024-03 | 18.910 | -5.037 | 5.0506861 | 4.020113 | 16.161312 |
| 4 | 2024-04 | 28.650 | 5.278 | 16.0924903 | 4.940995 | 24.413435 |
| 5 | 2024-05 | 31.820 | 6.787 | 14.6125345 | 4.859517 | 23.614908 |
| 6 | 2024-06 | 35.260 | 13.550 | 23.7141409 | 4.812652 | 23.161619 |
| 7 | 2024-07 | 36.060 | 15.530 | 25.3215750 | 4.691011 | 22.005582 |
| 8 | 2024-08 | 35.820 | 15.790 | 24.5972398 | 4.325780 | 18.712370 |
| 9 | 2024-09 | 33.130 | 9.110 | 19.5355198 | 4.324451 | 18.700877 |
| 10 | 2024-10 | 25.140 | 1.275 | 12.2372216 | 4.587651 | 21.046539 |
| 11 | 2024-11 | 19.290 | -2.800 | 5.4408558 | 3.576608 | 12.792124 |
| 12 | 2024-12 | 7.971 | -10.500 | 0.9813893 | 2.789748 | 7.782691 |

Рис. 5. Сводная таблица с данными температуры воздуха по месяцам

Для ветровых данных применяется тот же принцип, но для агрегации используется направление ветра, ранее конвертированное в символьный вид (см. листинг 4).

```

MDWS.by.WD <- DT[, .(MaxWS = max(WS),
2   AvgWS.by.WD = mean(WS),
3   SdWS = sd(WS),
4   Q75 = quantile(WS, 0.75),
5   Q90 = quantile(WS, 0.90)),
6   by = .(Direction = WDChar)]
    
```

Листинг 4. Расчёт max, min, mean, SD, Q75 и Q90 для каждого направления

Сводную таблицу за год см. на рис. 6.

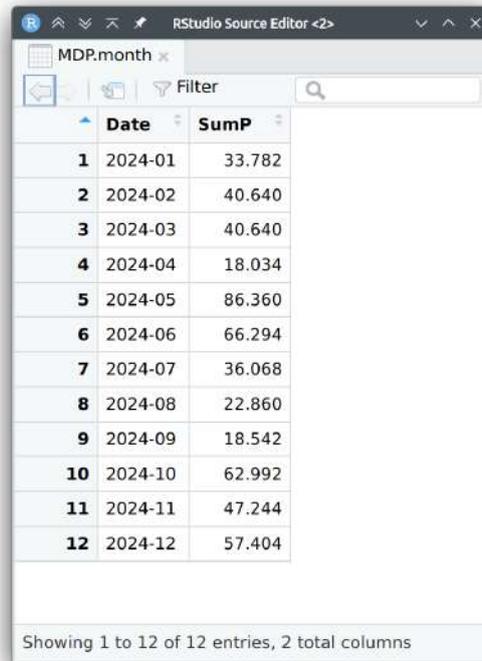
| | Direction | MaxWS | AvgWS.by.WD | SdWS | Q75 | Q90 |
|---|-----------|-------|-------------|-----------|-------|-------|
| 1 | N | 10.58 | 1.1998218 | 0.9960642 | 1.799 | 2.549 |
| 2 | NW | 11.96 | 1.0628675 | 1.0718765 | 1.616 | 2.532 |
| 3 | W | 11.30 | 1.0607038 | 1.0875276 | 1.533 | 2.482 |
| 4 | SW | 14.11 | 1.1474996 | 0.9592399 | 1.599 | 2.366 |
| 5 | S | 10.78 | 1.0637591 | 0.9652543 | 1.499 | 2.299 |
| 6 | SE | 9.46 | 0.8877481 | 0.8508601 | 1.316 | 2.016 |
| 7 | E | 8.93 | 1.3882274 | 0.9773615 | 1.966 | 2.682 |
| 8 | NE | 9.71 | 1.5245337 | 1.0330444 | 2.149 | 2.882 |

Рис. 6. Сводная таблица для скоростей ветра за год по каждому направлению

Так же осадки суммируются за каждый месяц (см. листинг 5). Сводная таблица представлена на рис. 7.

```
MDP.month <- DT[, .(SumP = sum(P)), by = .(Date = format(TIMESTAMP, "%Y-%m"))]
```

Листинг 5. Суммы осадков по месяцам



| | Date | SumP |
|----|---------|--------|
| 1 | 2024-01 | 33.782 |
| 2 | 2024-02 | 40.640 |
| 3 | 2024-03 | 40.640 |
| 4 | 2024-04 | 18.034 |
| 5 | 2024-05 | 86.360 |
| 6 | 2024-06 | 66.294 |
| 7 | 2024-07 | 36.068 |
| 8 | 2024-08 | 22.860 |
| 9 | 2024-09 | 18.542 |
| 10 | 2024-10 | 62.992 |
| 11 | 2024-11 | 47.244 |
| 12 | 2024-12 | 57.404 |

Рис. 7. Сводная таблица сумм осадков за каждый месяц

Аналогично строятся сводные таблицы по каждому метеорологическому параметру. Затем для тех же параметров строятся графики изменения за год. Для этого используется библиотека `ggplot2`. На листинге 6 приведён код для построения графика, представленного на рис. 4, и для его сохранения в формате `png` [5].

```
1 MDTA[, Date := as.Date(x = Date)]  
2 ggplot(MDTA, aes(x = Date, y = AvgTemp)) +  
3   geom_line(linewidth = 0.4) +  
4   geom_point(size = 0.3, color = "red") +  
5   geom_smooth(linewidth = 0.4) +  
6   labs(y = "Среднесуточная температура, °C", x = "Дата")  
7  
8 ggsave(filename = paste0("Температуры", ".png"), device = "png",  
9         height = 5.5,  
10        width = 11,  
11        units = "cm",  
12        dpi = 300,  
13        scale = 1.5)
```

Листинг 6. Создание графика среднесуточных значений температуры воздуха и сохранение на диске в формате `png`

Графики и диаграммы строятся по всем метеопараметрам. Все сводные таблицы сохраняются на диск в формате `csv`.

Перечень сводных таблиц и графиков, формируемых по результатам обработки:

- зафиксированный максимум и минимум температуры воздуха;
- максимальное зафиксированное значение солнечной радиации;

- таблица средних температур воздуха за каждый месяц;
- таблица средних температур почвы за каждый месяц;
- таблица сумм осадков за каждый месяц;
- таблица значений атмосферного давления;
- таблица значений относительной влажности;
- таблица максимальных зафиксированных скоростей ветра по каждому направлению;
- таблица влагосодержания почвы за каждый месяц;
- график годового хода среднесуточных значений, максимумов и минимумов температуры воздуха;
- график годового хода суточных максимумов приходящей солнечной радиации;
- график годового хода среднесуточных значений влагосодержания почвы;
- график годового хода среднесуточных температур почвы;
- график годового хода среднесуточных скоростей ветра;
- гистограмма сумм осадков по месяцам;
- гистограмма максимальных скоростей ветра по каждому направлению;
- гистограмма продолжительности ветра в сутках по направлениям.

Выводы. Использование специализированных библиотек — `data.table` — существенно ускоряет как процесс обработки, так и написание кода сценария. Синтаксис пакета упрощает восприятие программного кода и делает его более лаконичным.

Ориентированность языка R на работу с векторами данных позволяет обходиться без операторов цикла и условия при решении ряда задач, что также упрощает написание программного кода.

Использование сценариев упрощает выполнение рутинных, часто повторяющихся операций, таких как формирование отчётов за заданные интервалы времени.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта «Динамика геоэкологического состояния бассейнов горных рек Северо-Восточного Кавказа, Азербайджана и Ирана в условиях изменения климата и растущей антропогенной нагрузки» (соглашение № 075-15-2024-644).

Список использованных источников

1. <https://bookdown.org/ronsarafian/IntrotoDS/datatable.html>
2. <https://cran.r-project.org/>
3. <https://cran.r-project.org/web/packages/data.table/index.html>
4. <https://cran.r-project.org/web/packages/ggplot2/index.html>
5. <https://ggplot2-book.org/>
6. <https://ggplot2.tidyverse.org/>
7. <https://kubuntu.org/>
8. <https://posit.co/download/rstudio-desktop/>
9. <https://rdatatable.gitlab.io/data.table/articles/ru/datatable-intro.html>

УДК 631.416(665.2)

Сезонные изменения содержания тяжёлых металлов в почвах бассейна реки Фатала (Гвинейская Республика)

Братанов Н. С.¹, Фам К. Н.¹, Горбунов Р. В.¹, Горбунова Т. Ю.¹, Camara A. I.², Sow B. B.², Фаерман А. В.¹, Табуницик В. А.¹, Diallo A. I. P.², Keita I.²

¹ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», Севастополь, Россия

²Marine and Coastal Research Center of Guinea (CEREMAC-G), Conakry, Guinea

✉ bratanov@ibss-ras.ru

Проведена оценка уровня загрязнения верхних горизонтов почв бассейна реки Фатала (Западная Африка, Гвинейская Республика) тяжёлыми металлами и микроэлементами. В ходе исследования выявлены значительные сезонные колебания концентраций Cd, Cu, Pb, Zn и As. В сухой сезон наблюдалось среднее повышение показателя валового содержания тяжёлых металлов и микроэлементов по сравнению с таковым во влажный сезон. Для оценки экологической ситуации на исследуемой территории были рассчитаны коэффициенты концентрации (K_c) и коэффициент опасности (K_o). Установлено, что наибольшее влияние оказывают мышьяк и никель, для которых $K_o > 1$. Результаты анализа содержания тяжёлых металлов и микроэлементов в почвах свидетельствуют о комплексном воздействии на их валовые концентрации природных факторов — геохимических особенностей исследуемой территории (она совпадает с бокситоносной провинцией Фута-Джаллон) — и антропогенной деятельности. Подчёркивается необходимость регулярного мониторинга для разработки эффективных мер по управлению экологическими рисками в регионе.

Ключевые слова: Западная Африка, река Фатала, почвы, тяжёлые металлы, загрязнение

Уровни встречающихся в природе металлов в почвах зависят от преобладающих геогенных и антропогенных факторов, которые могут значительно различаться [1]. Тем не менее иногда их концентрации могут превышать фоновые экологические нормы качества почвы без антропогенного влияния [2]. Для оценки риска для экологии и человека крайне важно понимать количество и причины естественной изменчивости.

Именно в верхних слоях почвы, а не в других почвенных горизонтах, обычно регистрируют более высокие уровни тяжёлых металлов в результате деятельности человека — сжигания ископаемого топлива, утилизации электрического и электронного оборудования, красок и пестицидов, сжигания бытовых отходов, разливов моторных масел, выхлопных газов автомобилей, атмосферных отложений от промышленной деятельности и увеличения органических веществ [4, 5].

Несмотря на значимость территории Гвинейской Республики как центра добычи и первичной переработки полезных ископаемых для развитых экономик, изучение содержания тяжёлых металлов в стране остаётся недостаточным. Между тем важно иметь представление не только об общих уровнях металлов антропогенного и природного происхождения в поверхностном слое почвы, но и об экологическом риске антропогенных и природных форм этих металлов для человека. Некоторые виды деятельности могут обусловить накопление в почвах токсичных металлов, представляющих большую опасность для местных жителей [3]. Цель данной работы — оценка уровней загрязнения почв на территории бассейна реки Фатала в соответствии с нормативными документами Российской Федерации. Полученная информация о химическом составе исследуемых объектов позволит проанализировать загрязнение почв различными химическими элементами и выявить их источники.

Пробы отобраны в сухой и влажный сезоны года. Территория исследования охватывала бассейн реки Фатала (205 км²). На неизменённых участках местности были выделены 18 ключевых, наиболее репрезентативных участков (Ф1–Ф18). Они охватывали пойменные части бассейна реки и участки склоновых поверхностей рельефа в его верхних, средних и нижних частях, что позволило проследить горизонтальные миграции тяжёлых металлов и микроэлементов. Было проанализировано содержание тяжёлых элементов в почвах в зависимости от сезонного увлажнения. Отмечено, что концентрация исследованных элементов в сухой сезон в большинстве рассмотренных

случаев выше значений для влажного сезона (рис. 1). Выявлено, что для большей части территории исследования во влажный сезон 2024 г. характерно общее снижение уровня содержания тяжёлых металлов в верхних слоях почвы в сравнении с уровнем, зарегистрированным в ходе исследований в сухой сезон 2023 г. В частности, для ряда участков показатель содержания некоторых тяжёлых металлов в верхних слоях почвенных горизонтов оказался ниже предела обнаружения прибора.



Рис. 1. Содержание тяжёлых металлов и микроэлементов, $\text{мг} \cdot \text{кг}^{-1}$

Нами отмечены превышения для ряда элементов значений кларка концентрации и ПДК РФ для сухого или влажного сезона, а также для двух сезонов сразу. Анализ содержания исследованных элементов в органогенных горизонтах почв приведён ниже.

Содержание кадмия в почве. Содержание кадмия в валовых формах было исследовано во всех пробах. Значение в сухой сезон составило $1,26\text{--}13,97 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$, в то время как во влажный сезон зафиксировано значение ниже предела обнаружения (limit of detection, LOD) — $0,10 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$. Среднее содержание Cd в сухой сезон — $10,73 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$, во влажный сезон — $0,09 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$. Согласно значениям ПДК РФ по кадмию, отмечено превышение в сухой сезон (во всех точках). Кроме того, содержание Cd в почве в сухой сезон превышает значение кларка.

Содержание меди в почве. Содержание меди в валовых формах также было исследовано во всех пробах. В сухой сезон зафиксировано значение в диапазоне 2,52–37,81 мг·кг⁻¹, а в влажный сезон зарегистрировано значение ниже LOD — 0,93 мг·кг⁻¹. Среднее содержание Cu в сухой сезон составило 26,77 мг·кг⁻¹, во влажный сезон — 28,39 мг·кг⁻¹. Превышение значений ПДК РФ не отмечено в сухой сезон ни в одном исследованном горизонте, а во влажный сезон превышение значений ПДК зафиксировано в двух точках — Ф3 и Ф18. В точках Ф3, Ф9 и Ф18 содержание меди во влажный сезон выше, чем в сухой, и превышает значение кларка. В то же время в сухой сезон содержание Cu выше, чем во влажный сезон, и превышает значение кларка в точках Ф2, Ф4, Ф13 и Ф17.

Содержание свинца в почве. Содержание валовых форм свинца исследовано во всех пробах. Значение в сухой сезон составило 2,62–35,99 мг·кг⁻¹, LOD к концу влажного сезона — 48,65 мг·кг⁻¹. Среднее содержание свинца в сухой сезон — 11,27 мг·кг⁻¹, во влажный — 18,03 мг·кг⁻¹. Ни в сухой сезон, ни во влажный превышение ПДК РФ не зафиксировано ни в одном из изученных органомных горизонтов. Во влажный сезон содержание Pb превышает значение кларка в точках Ф1, Ф3, Ф7, Ф9 и Ф13, в сухой — только в точке Ф17.

Содержание цинка в почве. Содержание цинка в валовых формах также было исследовано во всех пробах. В сухой сезон выявлено значение в диапазоне 6,46–887,63 мг·кг⁻¹, а LOD во влажный сезон составил 88,94 мг·кг⁻¹. Среднее содержание Zn в сухой сезон — 194,44 мг·кг⁻¹, во влажный — 37,60 мг·кг⁻¹. В органомных горизонтах в точках Ф12–Ф17 в сухой сезон отмечено превышение ПДК РФ в 1,04–8,07 раза. Во влажный сезон превышение ПДК не зафиксировано ни для одного из органомных горизонтов. Содержание цинка в точках Ф12–Ф17 в сухой сезон выше, чем содержание Zn во влажный сезон и чем значение кларка.

Содержание мышьяка в почве. Содержание мышьяка в валовых формах было исследовано во всех пробах. В сухой сезон зарегистрированы концентрации в диапазоне 1,61–19,15 мг·кг⁻¹, а во влажный — 0,32–68,78 мг·кг⁻¹ по всем изученным горизонтам. Среднее содержание As в сухой сезон составило 15,53 мг·кг⁻¹, что превышает ПДК РФ (5,0 мг·кг⁻¹) в 3–3,83 раза (кроме точки Ф18). Среднее содержание мышьяка во влажный сезон — 17,15 мг·кг⁻¹. Превышение ПДК РФ в 1,09–13,76 раза отмечено в точках Ф1, Ф3, Ф4, Ф7–Ф10, Ф12–Ф14, Ф17 и Ф18. Содержание мышьяка во влажный сезон ниже значения кларка в точках Ф5, Ф6, Ф10–Ф13 и Ф15–Ф17. В сухой сезон содержание As выше, чем значение кларка (кроме точки Ф18).

Несмотря на влияние сезонных изменений, выделяются участки с повышенным содержанием химических элементов. Основное воздействие на распределение тяжёлых металлов может оказывать антропогенная деятельность, связанная как с локальными факторами загрязнения (расположение на исследуемой территории населённых пунктов, экстенсивные формы земледелия, наличие объектов инфраструктуры и объектов горнодобывающей промышленности), так и с переносом химических элементов воздушными массами с других территорий. Кроме того, высокое содержание ряда тяжёлых металлов может быть обусловлено природными геохимическими особенностями, которые определяются геологическим строением региона и его расположением в крупнейшей в мире бокситоносной провинции — Фута-Джаллон.

Установленное содержание элементов позволило рассчитать коэффициенты техногенной концентрации (K_c). Для фоновых территорий этот показатель не отражает напрямую степень антропогенного загрязнения, но указывает на сопоставимый с техногенным загрязнением уровень. K_c позволяют проанализировать особенности накопления тяжёлых металлов в почве. Опасность загрязнения почв тем выше, чем больше K_c превосходит 1 [6]. Изучаемые элементы нами разделены на две группы. В первую мы отнесли тяжёлые металлы, для которых $K_c < 1$: Cu в точках Ф1, Ф2, Ф5, Ф7, Ф8, Ф10–Ф12 и Ф14–Ф16; Zn во всех точках, кроме Ф9; Cd во всех точках, кроме Ф3; Pb во всех точках, кроме Ф1, Ф3, Ф7, Ф9, Ф13 и Ф14. Во вторую группу отнесён As, для которого $K_c > 1$: значения в точках составили 1,04–14,33 (кроме Ф2, Ф6, Ф11, Ф15 и Ф16).

Существует значительная вариация в концентрациях различных элементов в зависимости от местоположения точки, в которой были взяты образцы почвы. Это указывает на то, что её состав подвержен влиянию различных факторов. Для ряда элементов — Cu, Zn и As — зарегистрированы

относительно высокие концентрации в нескольких образцах почвы, что может свидетельствовать о техногенном загрязнении.

Сравнение K_c для различных фаций показывает, что в целом наблюдается как улучшение, так и ухудшение показателей по различным элементам. Значение K_c для Cd в сухой сезон выше, чем во влажный, на всех фациях. K_c для As в сухой сезон также выше, чем во влажный, за исключением фаций Ф3, Ф8 и Ф18. K_c для Pb во влажный сезон выше, чем в сухой, на фациях Ф4, Ф6 и Ф8; для Zn — на фациях Ф4, Ф8 и Ф12–Ф17; для Cu — на фациях Ф4–Ф6 и Ф14–Ф16. Некоторые элементы — Zn и Pb — демонстрируют значительное увеличение концентрации, что требует дополнительного мониторинга и анализа.

Анализ коэффициента опасности (K_o) показывает, что для анализа территории бассейна реки Фатала химические элементы можно разделить на две группы. Первая — тяжёлые металлы, содержание которых не превышает ПДК. Сюда относятся Zn, Cd и Pb, для которых средние значения K_o составляют 0,33; 0,09 и 0,26 ПДК соответственно. Cu имеет $K_o < 1$ во всех точках, кроме Ф18, где значение K_o составляет 1,42. Вторая группа — тяжёлые металлы и микроэлементы, для которых $K_o > 1$. Сюда относятся Ni с K_o в диапазоне 1,52–20,77 (кроме Ф15) и As с K_o в диапазоне 1,09–13,76 (кроме Ф2, Ф5, Ф6, Ф11, Ф15 и Ф16). Таким образом, в отношении свинца можно говорить об ухудшении ситуации и о росте рисков в 2024 г., особенно во влажный сезон. Медь, цинк и мышьяк показывают смешанные результаты — с улучшениями для одних фаций и ухудшениями для других. Что касается кадмия, то тут зафиксировано значительное улучшение — с устранением угроз для всех фаций.

Суммарный показатель загрязнения (Z_c) отражает степень загрязнения почв как химическими веществами, так и тяжёлыми металлами. Уровень загрязнения при $Z_c = 0...16$ считается низким; при $Z_c = 16...32$ — средним (умеренно опасное загрязнение); при $Z_c = 32...128$ — высоким (опасное); при $Z_c > 128$ — очень высоким (чрезвычайно опасное) [7]. Большая часть анализируемой территории во влажный сезон характеризуется низкими значениями: Z_c составляет от 1,21 до 14,67. В точке Ф1 $Z_c = 20,74$; в точке Ф14 $Z_c = 19,02$ (средний уровень загрязнения). Точки Ф15 и Ф16 можно охарактеризовать как чистые: Z_c здесь меньше 0. Сравнение Z_c для влажного и сухого сезона показывает существенное снижение значений для большинства фаций, что указывает на улучшение ситуации. Имеющиеся исключения (например, в точке Ф18 значение Z_c достигло 12,43) требуют внимания экологов и специалистов по охране окружающей среды. В целом снижение показателей загрязнения указывает на грамотное управление экологическими рисками.

Выводы. Проведённое исследование выявило значительные сезонные колебания в содержании тяжёлых металлов и микроэлементов в почвах бассейна реки Фатала — более высокие концентрации в сухой сезон, чем во влажный. Эти результаты подтверждают влияние сезонного увлажнения на уровень загрязнения почвы, что может быть связано с процессами вымывания и с изменением условий окружающей среды. Превышение ПДК для кадмия, мышьяка и цинка в сухой сезон указывает на потенциальную экологическую опасность и на необходимость дальнейшего мониторинга. Несмотря на улучшение ситуации во влажный сезон, некоторые участки бассейна реки всё ещё характеризуются повышенными уровнями загрязнения, что требует внимания экологов и специалистов по охране окружающей среды. Анализ коэффициентов техногенной концентрации (K_c) и коэффициентов опасности (K_o) показывает: определённые участки подвержены большому антропогенному воздействию, что может быть связано с рядом факторов, включая наличие локальных источников загрязнения и природные геохимические особенности региона. Значения суммарного показателя загрязнения (Z_c) также подтверждают тенденцию к улучшению состояния почв в большинстве исследуемых фаций во влажный сезон, однако на территории бассейна реки Фатала остаются участки с умеренно опасным уровнем загрязнения, что требует дальнейшего изучения и управления экологическими рисками. В целом результаты исследования подчёркивают важность регулярного мониторинга почв для оценки их состояния и для разработки эффективных мер по охране окружающей среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Российской Федерации в лице Минобрнауки России — гранта в форме субсидий в соответствии с п. 4 ст. 78.1 Бюджетного кодекса Российской Федерации (соглашение № 075-15-2023-592 по теме № 13.2251.21.0216), а также в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Изучение особенностей функционирования и динамики субтропических и тропических прибрежных экосистем в условиях изменения климата и антропогенной нагрузки с использованием методов дистанционных исследований, технологий облачной обработки информации и машинного обучения для создания научных основ их рационального использования» (№ гос. регистрации 124030100030-0).

Список использованных источников

1. Rencz A. N., Garrett R. G., Kettles I. M., Grunsky E. C., McNeil R. J. Using soil geochemical data to estimate the range of background element concentrations for ecological and human-health risk assessments : [Report]. [Halifax], Canada : Nature Research Canada, 2011. 22 p. (Geological Survey of Canada, Current Research (online) ; 2011-9). <https://doi.org/10.4095/288746>
2. Richardson G. M. Determining natural (background) arsenic soil concentrations in Yellowknife NWT, and deriving site-specific human health-based remediation objectives for arsenic in the Yellowknife area : Final report, submitted by Risk logic. Yellowknife, 2002. 34 p. (Scientific Services Inc. to the Yellowknife Arsenic Soils Remediation Committee (YASRC)).
3. Asamoah B. D., Asare A., Okpati S. W., Aidoo P. Heavy metal levels and their ecological risks in surface soils at Sunyani magazine in the bono region of Ghana // Scientific African. 2021. Vol. 13. Art. no. e00937 (10 p.). <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00937>. EDN: IJVBHV
4. Amusan A. A., Bada S. B., Salami A. T. Effect of traffic density on heavy metal content of soil and vegetation along roadsides in Osun state, Nigeria // West African Journal of Applied Ecology. 2023. Vol. 4, no. 1. P. 107–114.
5. Fashola M. O., Ngole-Jeme V. M., Babalola O. O. Heavy metal pollution from gold mines: Environmental effects and bacterial strategies for resistance // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2016. Vol. 13, iss. 11. Art. no. 1047 (20 p.). <https://doi.org/10.3390/ijerph13111047>. EDN: XZJPJX
6. Закруткин В. Е., Шишкина Д. Ю. Методика оценки опасности загрязнения почв подвижными формами тяжёлых металлов на территории угледобывающих предприятий : учеб.-метод. пособие. Ростов-на-Дону : Южный федеральный университет, 2011. 54 с. EDN: SBQXBX
7. Методические указания по определению тяжёлых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. Москва, 1992. 62 с.

УДК 556.3

История изучения климата Северного Кавказа в XVIII–XX вв.

Гагаева З. Ш., Керимов И. А.

Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова,
Грозный, Россия

✉ kerimov@ifz.ru

В работе рассмотрены вопросы истории исследования климата Северного Кавказа, охватывающей период с XVIII по XX в. Проведён анализ работ по изучению климата региона за указанный период. Показано, как менялось содержание исследований климата. Обозначен вклад отдельных учёных в развитие исследований о климате Северного Кавказа.

Ключевые слова: Кавказ, климат, история изучения, исследования, регион

История изучения климата России насчитывает ряд этапов — от первых наблюдений за погодой и климатом в рамках научных экспедиций и до современных исследований, направленных на понимание глобальных изменений климата и их последствий. Изучение климата Северного Кавказа тесно связано как с развитием метеорологии и климатологии как наук, так и с практическими потребностями сельского хозяйства, энергетики и других отраслей экономики региона.

В истории изучения климата Северного Кавказа с XVIII по XX в. можно выделить три этапа:

1. Наблюдения в рамках географических экспедиций. Первые систематические наблюдения за погодой и климатом на территории России проводились в рамках географических экспедиций, участники которых изучали обширные пространства страны. Эти наблюдения носили преимущественно описательный характер и были связаны с изучением природных условий различных регионов.
2. Создание сети метеорологических станций. Важным этапом стало создание сети метеорологических станций, которое началось в XIX в. и активно продолжилось в XX в. На станциях проводили регулярные наблюдения за температурой, осадками, давлением и другими метеорологическими параметрами.
3. Развитие метеорологии и климатологии как наук. В XX в. были разработаны теоретические основы климатологии, созданы модели климата, начаты исследования циркуляции атмосферы и других климатообразующих факторов.

Вопросы изучения климата Северного Кавказа нашли своё отражение в различных трудах исследователей XVIII–XIX вв. Многие работы этого периода, содержащие сведения о климате, связаны в основном с изучением растительности, животных, почв, минеральных источников и пр. Во второй половине XIX в. и в начале XX в. наметилась тенденция к целенаправленному изучению климата Северного Кавказа. Это подтверждается тем, что отдельные работы или разделы в работах посвящены климату региона [4, 11, 19].

Существующие представления о природе Северного Кавказа — результат многовековых наблюдений. До нашего времени дошли также представления античных географов о климате Кавказа. Значительный вклад в получение сведений о климате Северного Кавказа внесли научные экспедиции XVIII в. Академические экспедиции XVIII в. заложили основы для научного анализа природы малоизученных территорий страны, в том числе Северного Кавказа. В описаниях местностей маршрутов экспедиций имеются отрывочные сведения о климате.

В рапорте Гюльденштедта «В Императорскую академию наук Репорт № XVIII из Кизляра от 26 марта 1771 года» в сведениях о магометанской мечети и захоронениях имеются упоминания о жарком климате, сухом и постоянно движущемся воздухе, из-за чего останки захоронений скоро высыхают и не гниют [14]. У Гмелина в материалах отправления его экспедиции в Мазандрон есть такие упоминания о климате: «Я разговаривал с одним [с долгожителем], которому отроду 130 лет,

и со многими другими более ста лет живущими, однако климат при Тереке не можно почесть между сдоровейшими, потому что близость Каспийского моря, Кавказские горы и лесистая страна весьма уподобляют оной тому, какой в персидских провинциях Гилян и Мазандеран свидетельствует, чего ради болотистые места найдены уже способными для посева сорочинского пшена...» [15]. Наиболее подробные сведения о климате появились в XIX в., уже после присоединения новых земель на юге страны.

Активно освещаются научные сведения и события, касающиеся Кавказа, в записках и известиях Кавказского отдела Императорского Русского географического общества (КОИРГО) в XIX в. Публикуется информация об особенностях климата отдельных областей Северного Кавказа. Например, даётся характеристика железноводского климата: «Окружённый лесом и подверженный двум ветрам: сухому — восточному и влажному — западному, он не имеет ни резкости, ни сухости открытых нагорных стран, ни излишней сырости низменных долин» [4]. В разделе, который посвящён изучению атмосферных осадков Кавказа, приведены детальные сведения о летних и весенних осадках в Кубанской, Ставропольской, Терской, Дагестанской областях Кавказа вместе с картами среднего количества осадков за весну (март — май 1894 г., масштаб 45 вёрст в дюйме), весенних осадков (1894 г.), среднего количества осадков за лето (июнь — август 1894 г., масштаб 95 вёрст в дюйме) и летних осадков на Кавказе (1894 г.) [6].

В своей работе, посвящённой климатологии, русский инженер и писатель Б. И. Стагковский (1825–1898 гг.) предложил ряд мероприятий по улучшению и сохранению природы, по учреждению многочисленных метеостанций для наблюдения за погодой и предупреждения возможных природных аномалий [16].

Заметный вклад в изучение климата Северного Кавказа внесли известные российские учёные. Первый русский климатолог — доктор физической географии Императорского Московского университета А. И. Воейков (1842–1916 гг.) — представил научному сообществу свой труд, в котором привёл общие сведения о климатах земного шара и России. Там он отметил заметные контрасты между юго-западным склоном Кавказского хребта (Мингрия, Имеретия и Сванетия), где выпадает много осадков, и Дагестаном, где наблюдается сухой климат и куда не доходят влажные воздушные массы [8].

Выдающийся исследователь, основоположник научного почвоведения В. В. Докучаев (1846–1903 гг.) в своих работах, посвящённых изучению почв Кавказа, приводит сведения о климатических особенностях Кавказа (в том числе Северного Кавказа). На основе изучения природно-климатических условий и особенностей рельефа В. В. Докучаев сформулировал мировой закон географической зональности [12].

Российский географ, картограф и геодезист А. А. Тилло (1839–1899 гг.) в конце XIX в. подготовил атлас распределения атмосферных осадков на речных бассейнах Европейской России по месяцам и за год. В основу были положены результаты 20-летних наблюдений [2, 3].

Также исследованием климатов Кавказа занимался известный метеоролог, климатолог И. В. Фигуровский [19, 20].

В XX в. изучение климата Северного Кавказа перешло на новую стадию. Это было вызвано потребностями развития экономики и хозяйства страны. Появились очерки о климате Северного Кавказа (Северо-Кавказского края) и республик региона, а также климатические справочники [1, 7, 9, 10, 13, 17, 18 и др.].

Можно сделать следующие основные выводы:

- Изучение климата Северного Кавказа в XVIII и XIX вв. носило в основном описательный характер (на уровне регионов) и отчасти обобщающий (на уровне масштаба страны). Но при этом имеющиеся результаты наблюдений заложили основу для комплексного изучения климата.
- Важный вклад в изучение климата внёс Кавказский отдел Императорского Русского географического общества, представивший научному сообществу возможность ознакомиться с пионерными исследованиями климата Северного Кавказа.

- Целенаправленно региональные исследования климата региона, как и во многих других частях России, начались лишь после Октябрьской революции, когда появился соответствующий запрос от развивающегося сельского хозяйства и экономики страны.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта «Динамика геоэкологического состояния бассейнов горных рек Северо-Восточного Кавказа, Азербайджана и Ирана в условиях изменения климата и растущей антропогенной нагрузки» (соглашение № 075-15-2024-644).

Список использованных источников

1. Апостолов Л. Я. Климат Северо-Кавказского края. Ростов-на-Дону : Книгоиздательство «Северный Кавказ», 1931. 96 с.
2. Атлас распределения атмосферных осадков на речных бассейнах Европейской России по месяцам и за весь год на основании двадцатилетних наблюдений 1871–1890 / сост. А. А. Тилло. Санкт-Петербург, 1897. 1 атл. (VI с., 14 карт).
3. Атлас из 69 карт распределения атмосферного давления на пространстве Российской Империи и Азиатского материка на основании наблюдений с 1836 по 1885 г. / сост. Алексей Тилло. Санкт-Петербург, 1890. 1 атл. (XIII с.).
4. Весь Кавказ. Иллюстрированный справочно-литературный сборник, посвящённый детальному и всестороннему исследованию Кавказского края во всех отношениях. № 1. Тифлис : Электропечатня «Грузинского издат. товарищества», 1903.
5. Заметки о флоре Пятигорского края // Известия КОИРГО. 1872. Т. I, № 6. С. 234.
6. Записки КОИРГО. Кн. XVIII. Тифлис, 1896. 447 с.
7. Оболенский Н. Н. Климат Северо-Кавказского края. Орджоникидзе : [б. и.], 1936. С. 70–204.
8. Климаты земного шара, в особенности России / [Соч.] А. И. Воейкова, д-ра физ. географии Имп. Моск. ун-та, д-ра философии Геттинген. ун-та, доц. физ. географии в Имп. С.-Петерб. ун-те. Санкт-Петербург : Картогр. заведение А. Ильина, 1884. 640 с.
9. Коростелев Н. А. Климат Дагестана; Даг. ССР. Нар. ком. зем. План. комиссия (Земплан). Москва ; Ленинград : Сельхозгиз, 1930. 150 с.
10. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Вып. 13. Волгоградская, Ростовская, Астраханская области, Краснодарский, Ставропольский края, Калмыцкая, Кабардино-Балкарская, Чечено-Ингушская, Северо-Осетинская АССР. Ленинград : Гидрометеиздат. 1990. 724 с.
11. О климате России // Соч. К. Веселовского, Имп. Акад. наук э.-орд. акад., д. чл. имп. о-в Рус. геогр. и Моск. испытателей природы... Санкт-Петербург : Имп. Акад. наук, 1857. 410, 327 с.
12. Путешествия и экспедиции В. В. Докучаева / И. и Л. Крупениковы. Москва : Гос. изд-во геогр. лит., 1949. 128 с.
13. Санин А. Г. Опыт климатического районирования Восточного Предкавказья. Владикавказ : Издание Водного комитета бассейна р. Терека, 1926. 47 с.
14. СПбФ АРАН. Ф. 3. Оп. 33. Д. 1. Л. 12. Физическая экспедиция проф. Гильденштедта 1768–1775 гг.
15. СПбФ АРАН. Ф. 3. Оп. 34. Д. 16. Л. 139. Дела по экспедиции г. Академика Гмелина об отправлении его в Мазандрон.
16. Статковский Б. И. Задачи климатологии Кавказа : (читано в заседаниях Кавказского общества любителей естествознания 20, 21 и 29 марта 1878 г.). СПб. : Русская Скоропечатня П. С. Нахимова, 1878. 285 с.

17. Темникова Н. С. Климат Северного Кавказа и прилежащих степей / под ред. проф. О. А. Дроздова. Ленинград : Гидрометеорол. изд-во, 1959.
18. Федоров Е. Е., Баранов А. И. Климат Равнины Европейской части СССР в погодах // Труды Института географии. Вып. XLIV. Москва ; Ленинград : Изд-во Акад. наук СССР, 1949. 412 с.
19. Фигуровский И. В. Климаты Кавказа (Предварительный очерк. С 12 рис. в тексте и 1 картой) // Записки КОИРГО. Кн. XXIX. Вып. 5 (последн.). Тифлис : Типография насл. К. П. Козловскаго, 1919. 95 с.
20. Фигуровский И. В. Опыт исследования климатов Кавказа. Т. 1. СПб. : Издание Николаевской главной физической обсерватории, 1912. 317 с.

УДК 911.2(234.3)

Бассейн реки Гумс: условия и особенности формирования растительных поясов

Гайрабеков У. Т.^{1,2}, Музаев И. Х.^{1,2}

¹Академия наук Чеченской Республики, Грозный, Россия

²Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова, Грозный, Россия

✉ gairabekov_u@mail.ru

Работа посвящена характеристике растительных поясов бассейна реки Гумс, которая протекает в юго-восточной части Чеченской Республики, пересекая Лесистый хребет и Чеченскую наклонную равнину. Как отмечает А. И. Галушко, смена растительного покрова на территории Чеченской Республики, а следовательно, и в бассейне реки Гумс, происходит не от изменения гидротермических условий в зависимости от широты местности, а в зависимости от изменения высоты над уровнем моря. Соответственно, уместно именовать сменяющиеся зоны растительного покрова не зонами, а высотными поясами. Исходя из этого в бассейне реки Гумс с севера на юг выделены три растительных пояса с подробной характеристикой флористических сообществ.

Ключевые слова: растительный покров, гидротермические условия, коэффициент увлажнения, границы ландшафтных зон, пояс лесостепной растительности, пояс лесной растительности

Бассейн реки Гумс расположен в юго-восточной части Чеченской Республики в высотных пределах от 70 м на севере (место впадения в реку Гумс её правого притока, реки Мичик) до 1800,9 м на юге (вершина горы Тюрье-Лам).

Условия формирования растительного покрова. Растительный покров бассейна реки Гумс весьма разнообразен, что обусловлено различиями природно-климатических условий в разных частях её территории [2]. При этом, как отмечает академик А. А. Гроссгейм [5], из всех природных условий и факторов, влияющих на формирование растительного покрова, несомненно, наиболее важное значение имеет климат, то есть гидротермические условия. Под гидротермическими условиями понимают не только количество тепла и влаги, но и их соотношение, так как эти два фактора взаимосвязаны и взаимодействуют.

Среди количественных показателей климата наибольшее распространение в России получили коэффициент увлажнения Г. Н. Высоцкого [1] и гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова [10, 12].

Н. Н. Иванов в своих работах показал [7], что границы ландшафтных зон (при достатке для растений тепла) обусловлены определёнными величинами коэффициента увлажнения. Этот коэффициент упоминается как коэффициент увлажнения Высоцкого — Иванова и определяется по соотношению $K = P / EO$, где KU — коэффициент увлажнения; P — годовая сумма осадков, мм; EO — годовая сумма испаряемости, мм [1]. Таким образом, коэффициент увлажнения Высоцкого — Иванова представляет собой отношение годового количества осадков к годовой величине испаряемости для данного ландшафта и является показателем соотношения тепла и влаги. На границах ландшафтных зон (а значит, и растительных зон) коэффициент увлажнения по Иванову имеет следующие значения:

- между лесной и лесостепной зоной — 1,0;
- между лесостепной и степной зоной — 0,6.

В пределах бассейна реки Гумс с севера на юг на относительно небольшом расстоянии значительно возрастает высота над уровнем моря (н. у. м.) и увеличивается коэффициент увлажнения (с 0,6 до 1,0). Соответственно, гидротермические условия бассейна позволили сформироваться на этой территории различным типам растительных поясов. А. И. Галушко в монографии «Растительный покров Чечено-Ингушетии» отмечает [4]: «В связи с тем, что смена растительного покрова с севера

на юг на рассматриваемой территории происходит не от изменения гидротермических условий в зависимости от широты местности, а в зависимости от изменения высоты н. у. м., правильнее будет именовать сменяющиеся зоны растительного покрова не зонами а высотными поясами [4]. Исходя из этого на территории бассейна реки Гумс с севера на юг можно выделить несколько растительных поясов:

- 1) пояс степной и лесостепной растительности;
- 2) пояс лесной растительности;
- 3) пояс горно-луговой растительности (рис. 1).

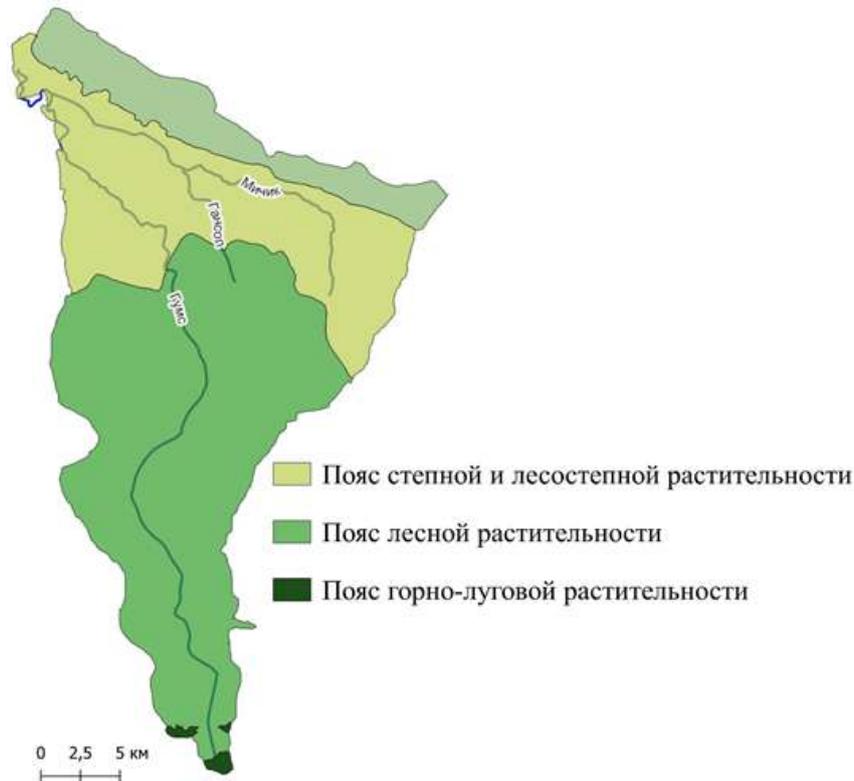


Рис. 1. Пояса растительности бассейн реки Гумс

Пояс степной и лесостепной растительности бассейна реки Гумс занимает территорию Чеченской наклонной равнины, начиная от подножия южного макросклона Гудермесского хребта. Здесь распространены злаковые, разнотравно-злаковые и злаково-бородачёвые степи. Разнотравно-злаковые степи приурочены к более увлажнённым местам. В южной части пояса они переходят в лугостепи. **Лугостепи** в прошлом широко использовались под посевы сельскохозяйственных культур. В настоящее время они используются как пастбища и подвержены зарастанию кустарником [2, 6]. На водоразделе Гудермесского хребта произрастают широколиственные леса, которые в средней части южного макросклона сменяются мелколесьем (дубравы с дубом черешчатым) и кустарниками (держидерево, боярышник мелколистный, слива колючая (тёрн), шиповник острозубый, свидина южная и др.).

Пояс лесостепной растительности в пределах бассейна реки Гумс расположен в южной части Чеченской наклонной равнины и простирается до подножия Чёрных гор. В прошлом лесостепной пояс был представлен в основном дубовыми лесами с примесью граба и карагача. За последние 200 лет этот пояс кардинально изменился. К настоящему времени здесь на возвышенностях невысоких хребтов и в понижениях по долинам реки Гумс сохранились лишь малопродуктивные пойменные леса. Вырубка лесов привела к изменению увлажнения почв и грунтов, а также к остепнению растительного покрова. Антропогенное воздействие обусловило формирование и широкое распространение

разнотравно-бурьяновой растительности и лугово-степных группировок со свиноем. На месте сведённых лесов сохранились кустарниковые заросли с участием боярышника, тёрна, шиповника, христовой колочки и держидерева. Небольшие участки молодого леса, нередко порослевого характера, состоят из дуба черешчатого, ясеня обыкновенного, клёна татарского и груши кавказской. В подлеске этих лесов кизил, боярышник, тёрн, лещина и свидина [2, 9]. По долинам рек сохранились пойменные леса байрачного типа [6, 8].

Пояс лесной растительности бассейна реки Гумс охватывает северный макросклон Чёрных гор (Лесистый хребет). Большую часть площади лесов Чёрных гор занимают буковые (бук восточный) и буково-грабовые леса. Буковые леса покрывают северные макросклоны Чёрных гор и имеют широкие высотные пределы распространения. Их нижняя граница начинается с высоты 200–3000 м н. у. м., а верхняя поднимается до 1500 м и более. Высотные пределы распространения букового леса зависят главным образом от степени увлажнения местности: на сухих склонах бук поднимается выше. Буковые леса самые древние, в них произрастает наибольшее число третичных видов (клён красивый и тис ягодный) и встречаются реликты (бересклет широколистный и рябина глоговина). Также в буковых лесах встречаются осина обыкновенная (тополь дрожащий), ясень обыкновенный, липа сердцелистная, дуб черешчатый и др. В поясе лесной растительности дубовые леса расположены отдельными участками на склонах южных экспозиций. Дубовые леса на нижних частях склонов имеют в своём составе много граба кавказского. Промежуточное положение между дубовыми лесами и буковыми занимают грабовые леса. Они покрывают нижнюю и частично среднюю часть склонов Чёрных гор, распространены прерывистой полосой. Граб менее требователен к влажности почвы и воздуха и занимает вместе с дубом в основном склоны южной экспозиции. Из плодовых деревьев и кустарников здесь распространены груша кавказская, яблоня лесная, мушмула германская, свидина южная, алыча (слива растопыренная), шиповник лесной, боярышник чёрный и кроваво-красный, калина обыкновенная [2, 9].

В травяном покрове под буковыми лесами произрастают ясменник душистый, кислица обыкновенная, черемша (медвежий лук), толстянка широколистная, зубянка пятилистная, колокольчик молочноцветковый, адамов корень, копытень грузинский и различные виды папоротников. В местах сведения лесов сформировались сельскохозяйственные поля и послелесные вторичные луга, представленные горно-луговым разнотравьем [6, 8].

Пояс горно-луговой (субальпийской) растительности бассейна реки Гумс представлен высокогорными лугами, состоящими из разнотравно-злаковых и осоковых лугов. Здесь широко распространены овсяница пёстрая, костёр пёстрый и вейник тростниковый. Красочный фон в течение лета создают буквица крупноцветковая, пиретрум розовый, девясил восточный, щавель альпийский, скабиоза кавказская, лютик кавказский, много видов первоцветов и колокольчиков [4, 6]. В прошлом эти луга широко использовались как сенокосы и пастбища для отгонного животноводства. Благоприятные агроклиматические условия горных лугов создают широкие возможности для развития животноводства — разведения крупного и мелкого рогатого скота. Однако в настоящее время богатые сочными травами горные луга бассейна реки Гумс должным образом не используются.

Заключение. Растительный покров бассейна реки Гумс весьма разнообразен, что обусловлено резкими различиями в характере рельефа, климата, почв и других элементов ландшафта в разных частях территории.

Амплитуда гидротермических условий бассейна реки Гумс позволила сформироваться здесь различным типам растительных поясов. Разнообразие ориентировки горных хребтов, экспозиций склонов, почв и гидрологических особенностей субстрата ещё более детализировали географию растительного покрова исследуемого района. В бассейне реки Гумс с севера на юг сформировались три растительных пояса — пояс степной и лесостепной растительности, пояс лесной растительности и пояс горно-луговой растительности.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта «Динамика геоэкологического состояния бассейнов горных рек Северо-Восточного Кавказа, Азербайджана и Ирана в условиях изменения климата и растущей антропогенной нагрузки» (соглашение № 075-15-2024-644).

Список использованных источников

1. Высоцкий Г. Н. Избранные труды. Москва : Сельхозгиз, 1960. 435 с.
2. Гайрабеков У. Т., Гайрабекова М. Т. Структура и особенности природных ландшафтов Чеченской Республики // Вестник Чеченского государственного университета имени А. А. Кадырова. 2014. № 1. С. 159–166. EDN: [TIWWCL](#)
3. Гайрабеков У. Т. Проблемы рационального использования и охраны водных ресурсов бассейна р. Гумс // Толстовские чтения : тезисы докладов региональной научной конференции. Грозный : ЧИГУ, 1991. С. 192–193.
4. Галушко А. И. Растительный покров Чечено-Ингушетии. Грозный : Чеч.-Инг. кн. изд-во, 1975. 118 с.
5. Гроссгейм А. А. Растительный покров Кавказа. Москва : МОИП, 1948. 267 с.
6. Гуня А. Н., Петрушина М. Н., Лысенко А. В., Гайрабеков У. Т., Гагаева З. Ш., Караев Ю. И., Гакаев Р. А., Эльмурзаев Р. С. Физико-географическая дифференциация территории Чеченской Республики (по результатам работ на трансекте) // Северо-Кавказская комплексная экспедиция : сборник трудов. Вып. 1. Грозный : ЧГУ, 2019. С. 28–48. EDN: [YNUDWA](#)
7. Иванов Н. Н. Зоны увлажнения земного шара // Известия Академии наук СССР. Серия географическая и геофизическая. 1941. № 3. С. 261–288.
8. Керимов И. А., Гайрабеков У. Т., Махмудова Л. Ш. Карбоновый полигон Чеченской Республики: I. Ландшафтные особенности и структура // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2021. Т. 6, № 3 (25). С. 35–47. <https://doi.org/10.25744/genb.2021.28.73.004>
9. Прибытков Н. В. К характеристике растительного покрова Чечено-Ингушской АССР. Грозный : Чеч.-Инг. кн. изд-во, 1981. 84 с.
10. Селянинов Г. Т. О сельскохозяйственной оценке климата // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. 1928. Вып. 20. С. 165–177.
11. Гуня А. Н., Петрушина М. Н., Гайрабеков У. Т., Махмудова Л. Ш. Современное состояние ландшафтов эталонных участков карбонового полигона Чеченской Республики // Рациональное природопользование: традиции и инновации : материалы III Международной конференции, Москва, 20–22 октября 2022 г. Москва : Изд-во «Наука», 2022. С. 170–174. EDN: [HNGWUW](#)
12. Шумова Н. А. Количественные показатели климата в приложении к оценке гидротермических условий в Республике Калмыкия // Аридные экосистемы. 2021. Т. 27, № 4 (89). С. 13–24. EDN: [LLMGYM](#)

УДК [556.11:504.5](282.247.444.7)

Геоэкологическое состояние реки Сунжа: аналитический обзор

Гелагаев А. Ш.

Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова,
Грозный, Россия

✉ gelagaev223344@mail.ru

Проведён аналитический обзор научных исследований по оценке качества вод в реке Сунжа. Показаны основные физико-географические характеристики реки. Рассмотрены её геоэкологическое состояние и негативные последствия антропогенного воздействия на воды. В частности, проанализированы данные мониторинга по источникам загрязнения от хозяйственной и промышленной деятельности и степени их воздействия на качественные показатели речной системы.

Ключевые слова: река, Сунжа, бассейн, загрязнение, оценка, воздействие

Загрязнение водных объектов в ходе антропогенного воздействия является весьма актуальной проблемой при оценке качества окружающей среды в регионе. Сбросы недостаточно очищенных сточных вод приводят к снижению качественных показателей водных ресурсов. В связи с этим возникает необходимость оценки и анализа влияния антропогенной деятельности на водные объекты. Река Сунжа — один из главных притоков Терека — долгое время находилась под серьёзной антропогенной нагрузкой.

Чеченская Республика является одним из наиболее обеспеченных водными ресурсами субъектов РФ. Основной производственно-экологический потенциал республики сконцентрировался в междуречье Сунжи и Терека [5].

Река Сунжа — последний приток первого порядка реки Терек, впадающий в 177 км от её устья, и главная водная артерия Республики Ингушетия. Длина реки составляет 278 км, общая площадь водосбора — 11 212 км². Исток Сунжи находится на территории Северной Осетии: река берёт начало из родников в районе Чёрных гор, на водоразделе рек Асса и Камбилеевка, в западной части передовых отрогов Лесистого хребта [8].

Верхний участок Сунжи, от истока до города Карабулак, имеет характер горной реки. В Карабулаке река меняет направление на восточное и начинает течь по тальвегу Чеченской котловины, на 5–8 км южнее Сунженского хребта. Поскольку Сунжа протекает вдоль хребта, она лишена притоков с левой стороны и имеет низкие уклоны: средневзвешенный уклон её русла — 2,2 %. Пойма реки отличается значительной извилистостью; русло на большую глубину покрыто аллювиальными отложениями [9, 10].

Сунжа в пределах Чеченской предгорной наклонной равнины имеет с правой стороны большое количество притоков. Самые большие и многоводные — реки Аргун, Асса и Гумс. С левого берега, как было сказано, притоков нет (рис. 1), если не считать речку Нефтянку. Это связано в том числе с тем, что атмосферные осадки не создают сток: значительная их часть идёт на испарение [8, 9].

Физико-химические характеристики воды в реке определяются климатическими условиями и литологической спецификой берегов. Водам в реке Сунжа присуща тенденция к нарастанию минерализации и усложнению химического состава.

Серьёзное антропогенное воздействие на окружающую среду в ходе двух военных кампаний на территории Чеченской Республики привело к масштабной экологической нагрузке. Компоненты окружающей природной среды — водные объекты и почвенный покров — были загрязнены токсичными веществами, нефтепродуктами и тяжёлыми металлами.

Анализ литературных данных по регулярным наблюдениям за качеством вод Терека и Сунжи в период с 1990-х гг. показал: на территории Чечни длительное время наибольшее загрязнение происходило за счёт нефтепродуктов, которые попадали в реки в результате аварий на магистральных нефтепроводах, а также утечек из коммуникаций и нефтехранилищ. Причинами являлись разрывы



Рис. 1. Карта-схема гидрографической сети Чеченской Республики (источник — https://avatars.mds.yandex.net/i?id=419af089682e8bfff1085df0c806d31_sr-4074279-images-thumbs&n=13)

и повреждения крупных трубопроводов, аварии, разрушения нефтехранилищ и нефтедобывающих установок, в том числе во время ведения военных действий. Особый вред экологической обстановке в бассейнах Сунжи и Терека был нанесён нелегальной частной добычей конденсата и его переработкой. С 1995 г. антропогенная нагрузка была связана с массовой нелегальной добычей и перекачкой кустарной нефти [1, 5].

Результатом становилась интенсивная загрязнённость почв, грунта всей прибрежной части и, соответственно, растительности, а далее (по системе экологических пищевых цепей) — различных групп организмов прибрежной и водной зоны Сунжи и затем Терека.

В дальнейшем загрязнение этих двух рек нефтепродуктами существенно сократилось по сравнению с загрязнением в предыдущие десятилетия — от показателей в 400 ПДК в начале XXI в. до 4 ПДК в последние годы. Уменьшение концентрации загрязняющих веществ в реке Сунжа наблюдается с 2005 г. [9].

Широкомасштабные исследования уровня загрязнённости водных объектов на территории Чеченской Республики ведутся с 2009 г. Выявлено, что в воде рек Терек и Сунжа повышены концентрации нефтепродуктов, железа и сульфатов: значения превосходят ПДК в 2,10–2,32 раза [10].

На территории Чеченской Республики многие компоненты ландшафтного комплекса находятся в загрязнённом состоянии, а порой их загрязнение продолжается, что приводит к существенному росту содержания канцерогенов (сульфатов, ионов железа и нефтепродуктов). Так, значения в Сунже превышают ПДК в несколько раз, а по некоторым веществам — и в десятки раз.

В настоящее время загрязнение Сунжи нефтепродуктами на территории Чеченской Республики значительно сократилось. Это произошло в результате процессов политической стабилизации и восстановления инфраструктуры, а также из-за отсутствия нефтепереработки.

Между тем в регионе до сих пор функционируют предприятия нефтекомплекса, к которым относятся цеха ОАО «Грознефтегаз». Согласно плану социально-экономического развития Чеченской Республики, промышленность начинает активно развиваться. Предполагается, что в ближайшее время будут разработаны проекты и созданы новые транспортные и перерабатывающие структуры нефтяного комплекса. Следует опереженно продумать и сформировать программу охраны водной среды и различных природных компонентов экосистемы бассейнов рек, в том числе

провести полную реконструкцию и оптимизацию систем очистки сточных вод. В противном случае в дальнейшем вновь может возникнуть ситуация значительной загрязнённости бассейнов Сунжи и Терека [5].

Республика по-прежнему находится под негативным воздействием, связанным с поступлением загрязняющих веществ со сбросами сточных вод и с поверхностными смывами. Наибольшее количество загрязнённых сточных вод поступает в реки от объектов жилищно-коммунального хозяйства.

Исследования поверхностных вод Терека и Сунжи показали: они по гидрохимическому индексу загрязнения характеризуются значениями 2,082 и 2,023 соответственно и относятся к категории «загрязнённые» (IV класс качества). Связано это с неудовлетворительным состоянием и изношенностью очистных и распределительных сетей, а также с расположением большинства населённых пунктов по берегам рек и сбросом их отходов в воду. Сложившаяся ситуация, характерная для многих очистных сооружений, наносит значительный ущерб водным объектам республики. Однако проведение многочисленных работ по улучшению состояния реки, в том числе на территории Чеченской Республики, несколько поспособствовало положительному изменению экологического состояния вод Сунжи.

Кроме того, в связи с интенсивными несанкционированными рубками реликтовых буковых и других лесов в горных районах Чечни в кризисные годы в среднегорье и низкогорье усилилась склоновая и овражная эрозия. Также заметно сократился водосток притоков Сунжи.

На территории Республики Ингушетия ухудшение качественных показателей реки Сунжа обусловлено деятельностью населённых пунктов, различных предприятий и организаций, особенно в предгорно-равнинной местности. Исходя из современных требований, можно сказать, что степень загрязнения ими рек своими отходами становится недопустимой. Именно поэтому и в Ингушетии ключевой аспект экологической ситуации, требующий самого пристального внимания и срочного решения, — неприемлемая степень загрязнённости основных рек, в первую очередь Камбилеевки, Сунжи и Назранки. Так, Сунжа является водосборной системой большинства рек, протекающих по равнинной, наиболее заселённой и промышленно освоенной части республики; она вбирает в себя содержание этих рек — все поверхностные воды и стоки. Приводятся сведения, что её воды значительно загрязнены смывами органических и неорганических веществ и нефтепродуктов в концентрациях 8,8–9 ПДК [5].

В 2017 г. Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Чеченской Республики провело исследование содержания в воде Сунжи на территории региона растворённого кислорода, нитратов, хлоридов и сульфатов. Также специалисты проанализировали биологическое потребление кислорода (БПК₅) и перманганатную окисляемость, определили концентрации нефтепродуктов и тяжёлых металлов и дали оценку органолептических показателей (запаха, вкуса и мутности). Результаты проведённого анализа указывают на то, что многие показатели качества вод реки соответствовали санитарно-гигиеническим нормативам. Тяжёлые металлы (ртуть, свинец и кадмий) в пробах воды выявлены в крайне малых концентрациях. Что касается органолептических показателей, то вода Сунжи не имела запаха и вкуса. Однако по мутности наблюдалось приближение к ПДК [2].

На сегодняшний день, согласно данным ГБУ «Лаборатория экологического контроля» Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Чеченской Республики, воды реки Сунжа относятся к категории «умеренно загрязнённые» (III класс качества), а воды реки Аргун — к категории «чистые» (II класс качества) [7].

Меры, принимаемые для охраны водных объектов и предотвращения их загрязнения, засорения и истощения, способствуют оздоровлению вод в бассейне реки Сунжа. Необходимо продолжать экологический мониторинг и регулярно проводить оценку качества воды: полученные данные помогут при разработке комплекса мер по сокращению сбросов загрязняющих веществ в воды Сунжи.

Заключение. Проведённый анализ антропогенной нагрузки и оценка качества водных ресурсов реки Сунжа позволили получить следующие результаты:

- бассейн Сунжи находился под серьёзным негативным антропогенным воздействием из-за активной хозяйственной и промышленной деятельности;

- масштабные мероприятия по оздоровлению и улучшению состояния бассейнов рек Терек и Сунжа поспособствовали улучшению геоэкологической ситуации;
- сокращение сбросов недостаточно очищенных сточных вод с промышленных предприятий уменьшило количество поступающих вредных веществ в воды Сунжи, однако воздействие от сброса сточных вод остаётся актуальной проблемой;
- в связи с продолжающейся антропогенной нагрузкой на воды бассейна реки необходимо продолжать геоэкологический мониторинг состояния и качества водных ресурсов Сунжи, чтобы разработать меры по улучшению качества водных ресурсов и по сокращению уровня негативного антропогенного воздействия.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта «Динамика геоэкологического состояния бассейнов горных рек Северо-Восточного Кавказа, Азербайджана и Ирана в условиях изменения климата и растущей антропогенной нагрузки» (соглашение № 075-15-2024-644).

Список использованных источников

1. Асхабова Х. Н., Оздыханов М. С., Ильхаева З. С. Гидрохимический анализ воды рек Терека и Сунжи // 6-я ежегодная итоговая конференция профессорско-преподавательского состава Чеченского государственного университета, Грозный, 2 марта 2017 г. Грозный : Чеченский государственный университет имени А. А. Кадырова, 2017. С. 104–107. EDN: [YOFBFZ](#)
2. Асхабова Х. Н., Оздыханов М. С., Солтамурадов Г. Д. Экологический контроль загрязнения реки Сунжа на территории Чеченской Республики // Успехи современного естествознания. 2019. № 3-2. С. 111–116. EDN: [ZEUHNH](#)
3. Асхабова Х. Н., Оздыханов М. С., Ильхаева З. С. Экологические проблемы малых рек Чеченской Республики и способы их решения // Проблемы региональной экологии. 2013. № 6. С. 42–44. EDN: [RZPOLH](#)
4. Байраков И. А. Геоэкологическая оценка водно-ресурсного потенциала Чеченской Республики // Геология, география и глобальная энергия. 2022. № 3 (86). С. 118–125. EDN: [PQBKNS](#)
5. Батжиев А. М., Джамалова А. З., Дударова Х. Ю. Река Терек в пределах Чеченской Республики и Республики Ингушетия: проблемы экологической безопасности и пути их решения // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2023. Т. 8, № 1. С. 69–74. <https://doi.org/10.25744/genb.2023.89.21.007>. EDN: [LTWNXW](#)
6. Бахтиев А. М., Автаева Т. А., Кушалиева Ш. А., Каимов М. Г. Комплексная программа мониторинга экосистемы реки Терек в Чеченской Республике // Известия Тульского Государственного университета. Науки о Земле. 2024. № 2. С. 3–13. EDN: [BGKZLZ](#)
7. Государственный доклад МПР и ООС ЧР [электронный ресурс]. URL: <https://chechnya.gov.ru/respublika/ekologiya/> [дата обращения: 15.04.2025].
8. Орцухаева З. Ш., Магомадова Л. И. Гидрологические характеристики реки Сунжа (в период 2000–2022 гг.) // Современные проблемы геологии, геофизики, и геоэкологии Северного Кавказа (ГЕОКАВКАЗ-2023) : материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Владикавказ, 04–08 октября 2023 г. Москва : Институт истории естествознания и техники имени С. И. Вавилова РАН, 2023. С. 588–592. EDN: [RWGCCW](#)
9. Панов В. Д., Базелюк А. А., Лурье П. М. Река Терек: гидрография и режим стока. Ростов-на-Дону : Донской издательский дом, 2015. 606 с. EDN: [UTQGRJ](#)
10. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Терек (российская часть бассейна) [электронный ресурс]. URL: <http://zkbvu.ru/documents/skiovo-ndv.php> [дата обращения: 15.04.2025].

УДК 528.7+629.78

Особенности формирования цифровых моделей поверхности различного масштаба и точности в условиях сложной структуры рельефа

Голубев Ф. М., Глухов А. А., Капинус Э. Ю.

ФГБНУ «Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела», Донецк, Россия

✉ ranimi@ranimi.org

В статье рассматриваются особенности формирования цифровых моделей поверхности различного масштаба и точности в условиях сложной структуры рельефа. Анализируются современные методы сбора пространственных данных, включая космическую съёмку, лазерное сканирование, геодезическую съёмку и трансформацию топографических карт. На основании проведённого анализа оценивается эффективность использования наземного лазерного сканирования для оптимизации трудозатрат и для достижения удовлетворительной точности при формировании моделей поверхности. Обсуждаются преимущества и ограничения каждого метода, а также их применение в проектных, строительных и геодезических задачах.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, интерполяция, лазерное сканирование, космическая съёмка, геодезические работы, точность, облако точек, векторизация, снимок

Создание цифровой модели рельефа (далее — ЦМР) является ключевым этапом инженерных изысканий для строительных и проектных работ. Применение ЦМР существенно ускоряет процессы выполнения предпроектных и проектных работ, поскольку требует меньших временных затрат, чем традиционные методы получения данных с топографических карт.

Проектные организации применяют цифровые модели для разработки новых проектов и реконструкции существующих, таких как дороги, трубопроводы и инженерные сооружения; строительные компании и заказчики — для контроля хода строительства и оценки соответствия выполненных работ проектной документации; эксплуатирующие организации — для отслеживания состояния местности и объектов инфраструктуры.

Для формирования ЦМР необходимо изучить методологические и технологические основы формирования геоинформационного пространства, а также вопросы применения геоинформатики и геоинформационных систем в рациональном недропользовании. В результате анализа можно выделить следующие методы сбора пространственных данных для формирования ЦМР:

- космическая съёмка земной поверхности;
- трансформация существующих топографических карт и снимков земной поверхности;
- лазерное сканирование;
- геодезическая съёмка.

Каждый из перечисленных методов предполагает определённый алгоритм обработки информации (рис. 1).

Наиболее доступным методом для обработки при проведении предпроектных работ на первый взгляд представляется оцифровка существующих топографических планов. Однако практика их обработки показывает, что векторизация вручную на компьютере 1 дм² изображения занимает у оператора около 1 ч. Следовательно, для перевода в векторный формат одного планшета карты масштаба 1 : 100000 потребуется не менее 25 ч рабочего времени.

Автоматизированная векторизация горизонталей с растрового изображения реализуется с помощью специализированного программного обеспечения — WinToro, EasyTrace, Trace (в составе Corel Photo-Paint) и др. Несмотря на высокую скорость автоматической обработки, этот метод имеет существенный минус: векторизации подвергаются не только горизонталы, но и все остальные линии

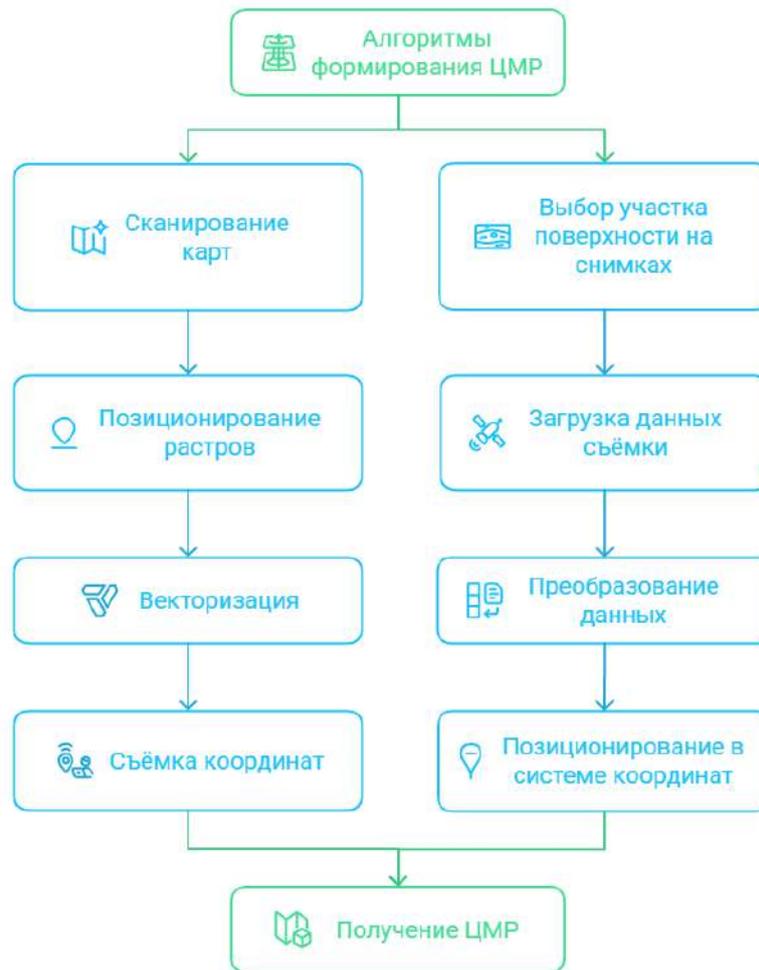


Рис. 1. Алгоритмы формирования ЦМР по топографическим планам и данным спутниковой съёмки

и контуры на изображении. Это создаёт значительное наложение линий, относящихся к различным типам объектов. Отбор необходимых горизонталей из этого перегруженного набора требует существенных временных затрат, что в конечном счёте делает автоматическую векторизацию карт масштаба 1 : 100000 по трудоёмкости и времени сравнимой с ручной векторизацией.

С учётом имеющегося опыта более предпочтительной представляется технология формирования ЦМР, основанная на использовании космических снимков. Источников их получения достаточно много. Из них наиболее широко известны данные мультиспектрального сканера ASTER, полученные со спутника Terra, а также результаты радиолокационной (Shuttle Radar Topography Mission, SRTM) съёмки топографической миссии радара Shuttle, карта высот Кристофа Хорманна и др.

Технология формирования ЦМР по космическим снимкам предполагает в упрощённом виде выбор необходимого участка, загрузку данных радиолокационной космической съёмки, преобразование загруженных данных в цифровой вид, позиционирование в необходимой системе координат и создание сеточной модели высот [3]. Все перечисленные манипуляции для планшета масштаба 1 : 10000 возможно выполнить на общедоступном программном обеспечении QGIS в течение 6–8 ч, что позволяет более чем в 3 раза сократить трудозатраты по сравнению с таковыми на обработку топографических планов.

Стоит отметить, что шаг точек в получаемой фактической сетке зачастую находится в интервале от 30 до 60 м. Промежуточные значения определяются методами интерполяции, которые, в свою очередь, могут существенно влиять на характер получаемой в результате модели.

К наиболее распространённым среди реализованных в популярном программном обеспечении методов интерполяции могут быть отнесены:

- kriging (кригинг);
- nearest neighbor (метод ближайшего соседа);
- natural neighbor (естественное соседство);
- local polynomial (локальный полином);
- radial basis function (радиальная базисная функция);
- triangulation with linear interpolation (триангуляция с линейной интерполяцией);
- inverse distance to a power (обратное расстояние до мощности);
- minimum curvature (минимальная кривизна);
- modified Shepard's method (модифицированный метод Шепарда);
- polynomial regression (полиномиальная регрессия);
- moving average (скользящая средняя).

Для сравнительного анализа этих методов по точности интерполяции производилось сопоставление результатов обработки спутниковых снимков с результатами натурных наблюдений (рис. 2). При анализе представленного графика можно сделать вывод, что лучшие результаты показали методы кригинга и радиальной базисной функции. Заслуживает внимания следующее: первый метод более популярен, однако второй показал гораздо меньшую дисперсию и среднеквадратическое отклонение от факта, что доказывает его более высокую точность.

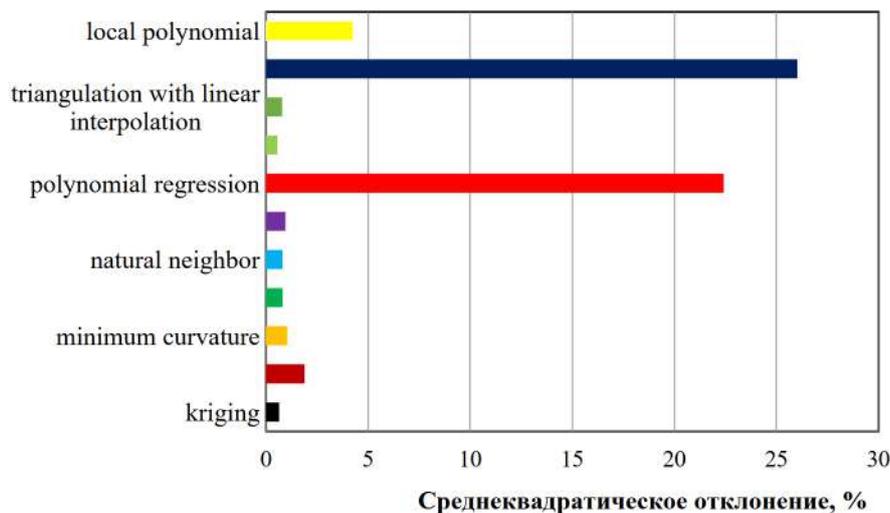


Рис. 2. График показателей среднее квадратическое отклонение результатов интерполяции спутниковых снимков от фактических наблюдений

Такие подходы позволяют получать информацию в пределах субметровой точности, что допустимо для ряда задач навигации и кадастра, однако не даёт возможности решать локальные проектные задачи, возникающие при геодезических и маркшейдерских работах. Для уточнения существующих моделей ЦМР и для оперативного получения моделей с субдециметровой точностью уместно использовать наземное лазерное сканирование.

Наземное лазерное сканирование (далее — НЛС) революционизировало геодезию: оно предоставило возможность решения всего спектра геодезических задач с точностью, сравнимой с таковой традиционных оптических методов, а зачастую и превосходящей её. НЛС характеризуется рядом очевидных преимуществ, однако процесс создания полноценной трёхмерной модели сопряжён с рядом сложностей, особенно на этапе объединения отдельных облаков точек, полученных с разных

позиций сканирования. Эта задача — одна из самых трудоёмких и критически важных для получения достоверного результата. Процесс обработки данных НЛС, как описывается в [1], включает три основных этапа:

- 1) точное позиционирование каждого отдельного облака точек в пространстве;
- 2) трансформацию этих облаков в единую, заранее заданную систему координат;
- 3) создание на основе объединённого облака точек трёхмерной модели, будь то ЦМР, поверхность или более сложная solid-модель (в зависимости от поставленных задач).

Качество полученной модели напрямую зависит от точности выполнения каждого из этих этапов. Существует несколько методик объединения облаков точек, описываемых, например, в [4]. Наиболее простые из них — визуальное совмещение и совмещение по характерным точкам — часто оказываются недостаточно точными, не обеспечивая требуемого уровня геометрической корректности конечной модели.

Для достижения высокой точности и надёжности результатов обработки данных НЛС необходимо проведение ряда предварительных геодезических работ. Эти работы включают развёртывание геодезической сети, высокоточные измерения координат контрольных точек, проверку и уточнение полученных данных. Затраты времени и ресурсов на проведение таких работ значительно — порой в несколько раз — превосходят затраты времени на само сканирование. Это обусловлено необходимостью обеспечения высокой точности определения местоположения каждой точки сканирования, чтобы исключить накопление погрешностей при объединении отдельных облаков точек в единую модель. Несоблюдение этих требований может привести к недопустимым искажениям полученной трёхмерной модели, а следовательно, и к неправильным выводам и решениям на её основе. Поэтому, хотя НЛС и кажется простым, обеспечение качества данных требует комплексного подхода и высокой квалификации специалистов: они должны обладать знаниями как в области лазерного сканирования, так и в области геодезии [2].

Этот подход существенно упрощается при использовании в качестве характерных точек тахеометрических призм, которые легко идентифицируются на облаке точек за счёт высокой интенсивности отражения сигнала (рис. 3).

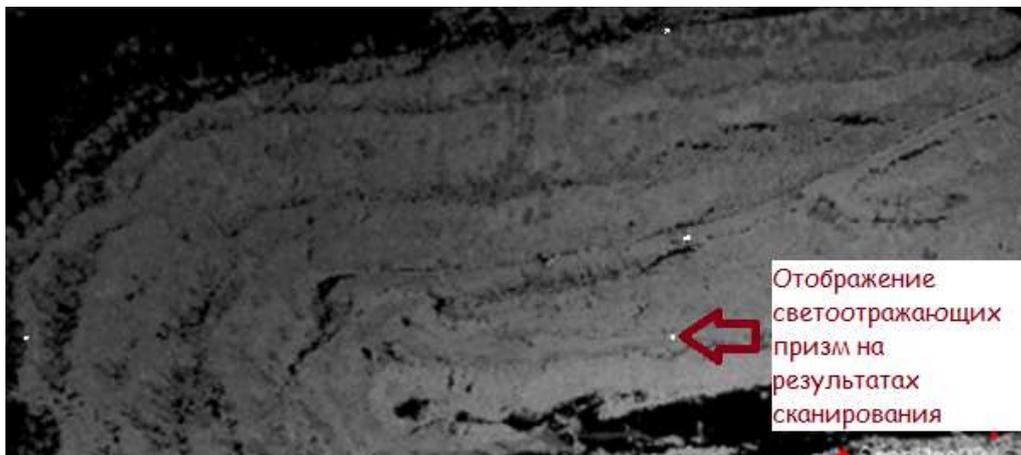


Рис. 3. Пример точечной модели техногенно изменённого участка поверхности

Вывод. В результате проведённого анализа существующих подходов к формированию цифровых моделей рельефа выделены наиболее перспективные направления исследований и установлены условия их эффективного применения. Доказано, что для адекватного формирования цифровых моделей рельефа по спутниковым снимкам самым подходящим методом интерполяции является радиальная базисная функция. Создание же и позиционирование геодезических моделей наиболее рационально выполнять с применением наземного лазерного сканирования и использованием в качестве опорных точек тахеометрических призм.

Список использованных источников

1. Барина Т. А., Катрич А. Е. Наземное лазерное сканирование // Научные достижения и открытия современной молодёжи : сборник статей победителей международной научно-практической конференции, в 2 ч. Пенза, 17 февраля 2017 г. Пенза : «Наука и просвещение» (ИП Гуляев Г. Ю.), 2017. Ч. 1. С. 1569–1571. EDN: [XXSPMN](#)
2. Комиссаров, А. В. Лазерное сканирование и трёхмерное моделирование : учебно-методическое пособие. Новосибирск : СГУГиТ, 2020. 58 с., ил.
3. Чермошенцев А. Ю. Технология обработки данных дистанционного зондирования : учебно-методическое пособие. Новосибирск : СГУГиТ, 2020. 80 с.
4. Щенявская Л. А., Шалая А. А. Технология объединения пространственных данных, полученных по результатам наземного лазерного сканирования, цифровой аэрофотосъёмки и ручного лазерного сканирования // Молодёжная наука. Сборник лучших научных работ молодых учёных : материалы LI студенческой научной конференции, Краснодар, 29 февраля — 21 апреля 2024 г. Краснодар : Кубанский государственный технологический университет, 2024. С. 509–515. EDN: [UCRUHR](#)

УДК 551.583

Изменение температуры воздуха в бассейнах рек Каспийского моря (1961–2023 гг.)

Дрыгваль П. В.^{1,2,3}, Дрыгваль А. В.²

¹ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», Севастополь, Россия

²Карадагская научная станция имени Т. И. Вяземского — природный заповедник РАН — филиал ФИЦ ИнБЮМ, Феодосия, Россия

³ФГУП НТЦ Радиационно-химической безопасности и гигиены ФМБА России, Москва, Россия

✉ drygval-pv@ibss-ras.ru

Проведено исследование изменения температур приземного воздуха в пределах бассейнов малых и средних рек южной и западной части водосбора Каспийского моря — Горган (Иран), Карачай (Азербайджан), Атачай (Азербайджан), Сулак (Россия), Сунжа (Россия), Уллучай (Россия) и Хераз (Иран) — за три временных периода (1961–1981, 1982–2004 и 2005–2023 гг.). Результаты включают анализ пространственного распределения средней многолетней температуры воздуха в пределах рассматриваемых бассейнов рек. На основе полученных данных были созданы карты, а также выявлены основные тенденции изменения этого метеопараметра в исследуемом регионе за период с 1961 по 2023 г.

Ключевые слова: *емпература воздуха, бассейны рек, Каспийское море, изменение климата*

С целью адаптации к возможным изменениям климата необходимо глубокое понимание текущих и будущих климатических условий территории такого уникального района, как Каспийский регион. Анализ климатических данных за значительный временной период позволяет выявить климатические циклы и закономерности на изучаемой территории. В данной работе рассмотрен вопрос изменения среднегодовой температуры приземного воздуха в пределах некоторых бассейнов рек водосбора Каспийского моря.

Для оценки изменений температуры воздуха в бассейнах рек водосбора Каспийского моря были взяты бассейны семи рек. Это Горган (Иран), Карачай (Азербайджан), Атачай (Азербайджан), Сулак (Россия), Сунжа (Россия), Уллучай (Россия) и Хераз (Иран). С целью оценки изменения средней многолетней температуры воздуха были сгенерированы ряды данных реанализа ERA5 [1, 2]; также были использованы доступные данные метеорологических наблюдений, которые проводятся на метеорологических станциях Северо-Восточного Кавказа (28 метеостанций). Температурные данные с метеостанций были доступны за период с 1961 по 2023 г. Соответственно, данные реанализа для всей изучаемой территории были взяты для того же временного периода. Для выявления динамики изменений в распределении среднегодовых температур воздуха ряды данных с метеорологических станций были разделены. Выделить три временных периода позволила полиномиальная линия тренда хода температуры воздуха в течение всего времени с 1961 по 2023 г., которая довольно плавно показывает основной курс изменения температуры воздуха за 63 года наблюдений (рис. 1). В целом выделяются три основных временных промежутка со своими трендами изменения метеорологических параметров: 1-й период — 1961–1981 гг.; 2-й период — 1982–2004 гг.; 3-й период — 2005–2023 гг.

Для использования данных реанализа и оценки изменений температуры воздуха были вычислены коэффициенты корреляции и детерминации между показателями метеорологических станций и данными реанализа ERA5 за 63 года. Установлено, что существует очень высокая корреляция (0,99) между данными реанализа и метеорологических станций по среднегодовой температуре воздуха, что позволяет с высокой степенью доверия рассматривать разработанные модели распространения этого метеопараметра в пространственно-временном распределении по исследуемой территории (рис. 2).

Распределение средней многолетней температуры воздуха за установленные три периода времени в пределах изучаемых бассейнов рек отображены на рис. 3–5. Экстремумы значений средней многолетней температуры воздуха представлены в табл. 1.



Рис. 1. Выделение временных промежутков для оценки метеорологических данных в период с 1961 по 2023 г. по среднегодовым значениям (по данным метеорологических станций)

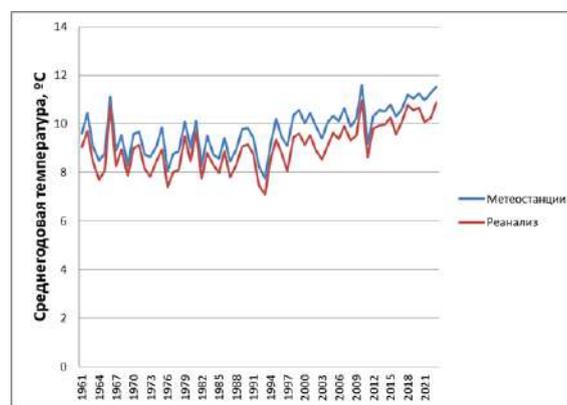


Рис. 2. Сравнение среднегодовой температуры по данным метеорологических станций и реанализа в период 1961–2023 гг.

Таблица 1. Градация средних многолетних значений температур в пределах бассейнов рек (по данным реанализа [2])

| Период | Min, °C | Max, °C | Mean, °C |
|---------------|---------|---------|----------|
| 1961–1981 гг. | –2,7 | +17,9 | +7,8 |
| 1982–2004 гг. | –2,7 | +18,4 | +8,0 |
| 2005–2023 гг. | –2,1 | +19,6 | +9,1 |

Распространение приземной температуры воздуха за три временных периода меняется — увеличивается площадь более тёплых зон по сравнению с таковой в предыдущий временный промежуток. При этом участки, где средняя многолетняя температура выше +15 °C, встречаются только в пределах бассейнов двух рек, Горган и Хераз, которые расположены на южном побережье Каспийского моря. Наиболее холодные участки, со средней многолетней температурой воздуха ниже 0 °C, приурочены к высокогорным районам Кавказских гор.

Минимальные и максимальные значения средней многолетней температуры воздуха в пределах бассейнов рассматриваемых рек также планомерно меняются в сторону увеличения: минимально потеплело на 0,6 °C, а максимально — на 1,7 °C.

Рассматриваемые бассейны рек водосбора Каспийского моря за 63 года имеют тенденцию к увеличению температуры воздуха (средние многолетние значения температуры выросли в среднем на 1,3 °C). При этом наиболее интенсивно температура повысилась в последние 19 лет, в 2005–2023 гг. (средние многолетние температуры увеличились на 1,1 °C).

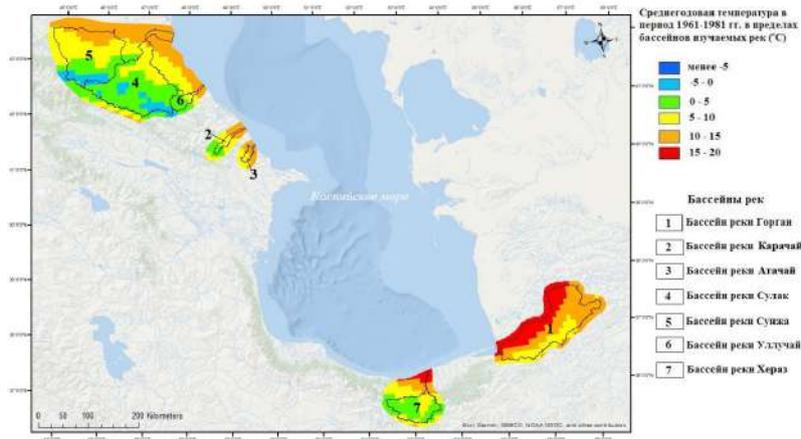


Рис. 3. Пространственное распределение средних многолетних температур в период 1961–1981 гг. в пределах бассейнов изучаемых рек (по данным реанализа [2])

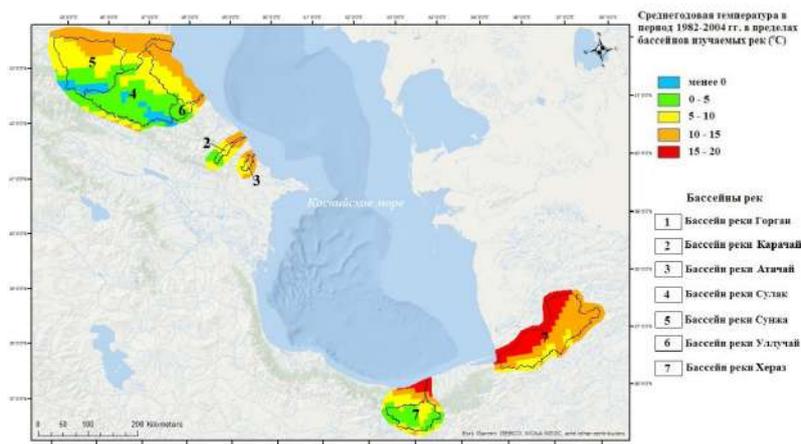


Рис. 4. Пространственное распределение средних многолетних температур в период 1982–2004 гг. в пределах бассейнов изучаемых рек (по данным реанализа [2])

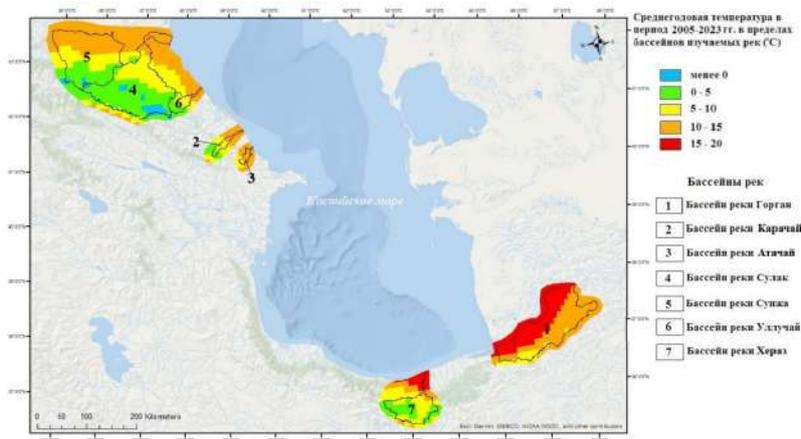


Рис. 5. Пространственное распределение средних многолетних температур в период 2005–2023 гг. в пределах бассейнов изучаемых рек (по данным реанализа [2])

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта «Динамика геоэкологического состояния бассейнов горных рек Северо-Восточного Кавказа, Азербайджана и Ирана в условиях изменения климата и растущей антропогенной нагрузки» (соглашение № 075-15-2024-644).

Список использованных источников

1. Earth Engine Data Catalog. ERA5-Land Daily Aggregated – ECMWF Climate Reanalysis. URL: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/ECMWF_ERA5_LAND_DAILY_AGGR#bands [дата обращения: 01.08.2024].
2. ECMWF Reanalysis v5 (ERA5). URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5> [дата обращения: 01.08.2024].

УДК 379.8+504.062

Гидрорекреационный потенциал горного региона (на примере Чеченской Республики)

Забураева Х. Ш.¹, Забураев Ч. Ш.¹, Шаипова А. А.^{1,2}

¹Комплексный научно-исследовательский институт имени Х. И. Ибрагимова РАН, Грозный, Россия

²Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова, Грозный, Россия

✉ eveggne@mail.ru

В статье исследована роль гидрорекреационного потенциала в структуре рекреационного потенциала горного региона. Обоснованы предпосылки для развития в Чеченской Республике различных направлений туризма и рекреации на основе использования гидрорекреационных ресурсов. Основной акцент сделан на экотуризме как экологически ориентированной рекреационной деятельности, в наибольшей степени отвечающей концепции сбалансированного природопользования, и в частности водопользования.

Ключевые слова: гидрорекреационный потенциал, ландшафт, рекреация, туризм, предпосылки, горный регион, рекреационные ресурсы

Как показывает мировой опыт, рекреационная деятельность в условиях горных стран (регионов) — оптимальная и высокодоходная отрасль экономики, хотя в числе приоритетных направлений выделяют также аграрное и индустриальное. Развитие туристско-рекреационной сферы — одно из приоритетных направлений, обозначенных Стратегией социально-экономического развития Чеченской Республики до 2035 г.

В современной научной литературе прослеживаются различные подходы к трактовке понятия «рекреационный потенциал» в зависимости от цели исследования. Однако при всём их многообразии, характеризуя различные грани рекреационного потенциала, в качестве его основополагающей составляющей практически все исследователи определяют природные рекреационные ресурсы [6, 7, 12]. В общем виде, помимо способности природной территории оказывать на человека положительное физическое, психическое либо социально-психологическое воздействие, связанное с отдыхом, рекреационный потенциал включает всю совокупность природных, культурно-исторических и социально-экономических предпосылок для рекреационной деятельности [5].

Гидрорекреационный потенциал — составная часть рекреационного потенциала, который формируется водотоками, озёрами, водопадами, минеральными источниками и другими водными ресурсами, пригодными для развития туристско-рекреационной отрасли. Пригодность водных ресурсов для рекреационной деятельности определяется: температурой воды и её изменениями в течение года, характеристикой берегов (пляжи, скалы, обрывы и др.), глубиной водоёмов, степенью безопасности водоёма для купания (отсутствие участков быстрого течения, омутов, водорослей, различных опасных предметов на дне и др.), а также особенностями прибрежных ландшафтов.

Водный туризм во многих странах мира (США, Великобритания, Канада, Австралия и др.) динамично развивается, выступает в качестве основного источника дохода населения и в целом способствует развитию социально-экономической сферы [8]. В США водный туризм интегрирован как в индустрию рекреации, так и в транспортную сеть и даже в систему образования: основные туристические маршруты, как правило, предполагают наличие образовательных центров, в которых проводятся лекции, мастер-классы и иные мероприятия для туристов и местных жителей [10]. Речной туризм, в частности, широко распространился как отрасль экотуризма. В Иране, к примеру, реки относятся к числу важных ресурсов экотуризма [9]. Последний именуют также зелёным, познавательным, устойчивым или ответственным туризмом. В целом речной туризм играет существенную роль на мировом туристском рынке [11].

Рекреационный потенциал горных регионов Кавказа в целом и Чеченской Республики в частности достаточно разнообразен и ёмок [3]. Здесь гармонично сочетаются равнинные, горные и высокогорные ландшафты, распространены минеральные источники с широким диапазоном целебных свойств, лечебные грязи, памятники природы, истории и культуры. Гидрорекреационный потенциал исследуемого региона формируется густой речной сетью (преимущественно в предгорной и горной частях), озёрами, водопадами и минеральными источниками, что в целом создаёт предпосылки для развития широкого спектра рекреационной деятельности.

В Чеченской Республике (далее — ЧР) насчитывается свыше 3 тыс. рек суммарной протяжённостью более 6,5 тыс. км [1], однако большинство из них представляют собой небольшие водотоки, длиной менее 10 км. Все реки относятся к системам крупнейших рек бассейна Каспийского моря — Терек и Сулака. По протяжённости лидируют Терек (218 км), Сунжа (205 км), Аргун (125 км), Белка (83 км), Джалка (83 км) и др. В зависимости от источника питания их делят на два типа. К первому отнесены реки, имеющие преимущественно ледниковое и снеговое питание [Терек, Сунжа (ниже впадения Ассы), Асса и Аргун], а ко второму — реки, для которых характерно родниковое питание [Валерик, Гехи, Марган, Гойта, Джалка, Белка, Аксай и др.]. На горных реках республики немало живописных водопадов [2].

Ряд гидрологических объектов ЧР объявлен памятниками природы (см. табл. 1). В их числе Вашиндаройский водопад высотой 10 м и шириной до 2 м, объявленный памятником природы в 1980 г. [5]. Он находится на юго-восточной окраине села Вашиндарой в долине притока Чанты-Аргуна (река Варанда). Водопад легко доступен, и до 1990-х гг. его часто посещали туристы. В правобережье реки Шаро-Аргуна вблизи села Улус-Керт расположен Буккузинский водопад, поражающий своей красотой: вода падает по отвесной скале с высоты примерно 80 м. Рядом с ним находится несколько серных источников [12]. Буккузинским гидрологическим объектам отводится важная рекреационная и бальнеологическая роль (к примеру, в лечении болезней желудочно-кишечного тракта, опорно-двигательного аппарата и др.).

Для рекреационных целей особое значение имеют Нихалойские водопады, расположенные в районе древнего поселения Чечни (село Нихалой) на правом притоке реки Чанты-Аргуна. Они представляют собой каскад из 12 водопадов от небольших потоков воды, высотой 2–10 м, до мощных водопадов, высотой 12–32 м. Аттрактивность горных ландшафтов достаточно велика. Здесь гармонично сочетаются живописные горные массивы, густые леса, глубокие каньоны и др. Недалеко от водопадов функционирует база отдыха. В числе других, не менее важных рекреационных гидрологических объектов — Нохчи-Келойский водопад высотой 74 м, расположенный в 1 км к востоку от одноимённого селения в Шатойском районе.

В структуре гидрорекреационного потенциала ЧР важная роль отводится озёрам, которые используются (либо могут быть использованы) для целей оздоровительного отдыха и водного туризма. В регионе встречаются озёра различного происхождения (запрудные, карстовые, оползневые, ледниковые и др.). Они зачастую привлекают рекреантов своей близостью к населённым пунктам и быстрой прогреваемостью, однако следует учитывать степень их экологической уязвимости в сравнении с таковой крупных водных объектов.

Самый крупный высокогорный водоём на Северном Кавказе — озеро Кезеной-Ам, площадь которого составляет около 2 км². В 1978 г. озеро включили в список памятников природы регионального значения. Оно расположено на склоне Андийского хребта у границы Чечни с Дагестаном, на высоте 1870 м над уровнем моря (н. у. м.), в зоне горных лугов и степей. Озеро не имеет поверхностного стока. Здесь была олимпийская база сборной СССР по академической гребле.

Примером древнего озера служит Безеной-Ам, расположенное на склоне долины реки Шаро-Аргуна (на высоте 1500 м н. у. м.) возле села Дай. Озеро имеет овальную форму. Его площадь составляет менее 2 га, а глубина не превышает 4 м. Определённый интерес с позиций развития туристско-рекреационной сферы представляют карстовые озёра, встречающиеся на Ялхоройском и Андийском хребтах (Арж-Ам, Ейопи и др.). Их средняя глубина варьирует в пределах 3–4 м.

Таблица 1. Гидрологические памятники природы Чеченской Республики

| № | Название | Год создания | Административный район |
|--|--|--------------|------------------------|
| Озёра | | | |
| 1 | Безеной-Ам | 1978 | Шатойский |
| 2 | Галанчоожское | 1978 | Урус-Мартановский |
| 3 | Кезеной-Ам | 1978 | Веденский |
| 4 | Капустино | 1980 | Наурский |
| 5 | Майорское | 1980 | Наурский |
| 6 | Карьерное | 1982 | Шелковской |
| 7 | Урочище «Стенная жемчужина» | 2006 | Шелковской |
| Водопады | | | |
| 8 | Вашиндаройский | 1980 | Шатойский |
| 9 | Харачойский | 1982 | Веденский |
| 10 | Тумсойский | 2020 | Шатойский |
| 11 | Башинкалинский | 2020 | Итум-Калинский |
| Минеральные источники и родники | | | |
| 12 | Чанты-Аргунский пресный источник | 1982 | Шатойский |
| 13 | Минеральные источники Чанты-Аргуна | 2006 | Шатойский |
| 14 | Минеральные воды курорта Серноводск-Кавказский | 1982 | Серноводский |
| 15 | Брагунские минеральные источники | 1980 | Гудермесский |
| 16 | Минеральный источник Нефтяной горячий | 1980 | Гудермесский |
| 17 | Минеральный источник Мелчхи | 1980 | Гудермесский |
| 18 | Минеральный источник Эпхе | 1980 | Гудермесский |
| 19 | Нефтяной источник Симсир | 2006 | Ножай-Юртовский |
| 20 | Солёный родник | 1982 | Урус-Мартановский |
| 21 | Зебир-Юртовские минеральные источники | 2020 | Надтеречный |

Примечание: по данным Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды ЧР.

Примером озера с котловиной тектонического происхождения, связанного с разрывами и разломами земной коры, является Галанчоожское, расположенное в верховьях бассейна реки Гехи на высоте 1530 м н. у. м. Глубина в центре озера достигает 31 м, а источником питания служат родники и атмосферные осадки.

На севере ЧР в пределах Терско-Кумской полупустыни находятся эоловые озёра с характерными округлой и овальной формами и размерами, не превышающими, как правило, в поперечнике нескольких десятков метров. Питаются озёра грунтовыми водами и атмосферными осадками. В долинах Терека, Сунжи и Джалки встречаются пойменные озёра.

На территории ЧР известны минеральные источники различного химического состава — от углекислых соляно-щелочных, сульфатно-кальциевых сероводородных, сероводородно-хлоридно-натриевых до щелочных сероводородных термальных, обладающих целебными свойствами [5]. Первая группа приурочена к верховьям реки Чанты-Аргуна; два из них — Куройский и Басхойский — с 1978 г. имеют статус памятников природы. О существовании здесь целебных горячих серных вод было известно ещё в XVII в. [4]. В восточной части северного склона Брагунского хребта открыты Брагунские источники сульфатно-хлоридно-гидрокарбонатно-натриевого состава. Их температура достигает +96 °С. На базе этих источников до 1938 г. функционировал небольшой санаторий (на 100 коек).

В число целебных минеральных источников входят и Исти-Суйские, открытые в 1987 г. в пределах северного склона Гудермесского хребта. Их температура варьирует в пределах +72...+75 °С. Целебные свойства источников позволяют использовать их для лечения заболеваний нервной системы,

желудочно-кишечного тракта, опорно-двигательного аппарата и др. [12]. Бальнеологическими свойствами обладают также Чишкинские и Чанты-Аргунские источники. Это создаёт благоприятные предпосылки для создания в регионе широкой сети санаторно-курортных комплексов.

Наряду с многочисленными естественными (природными) гидрологическими объектами в ЧР встречаются и искусственные водоёмы. Наиболее крупный по масштабам из них — Чернореченское водохранилище (или Грозненское море), которое сформировано плотиной, перегораживающей реку Гойтинку в юго-западной части города Грозного на площади более 100 га. Здесь функционирует республиканский реабилитационный центр, а также туристический комплекс, включающий отдельные пляжи для мужчин и женщин, плавучий ресторан, отели, дельфинарий, спортивно-оздоровительный центр и другие объекты. В летний период горожан и туристов привлекает уникальный светомузыкальный фонтан на воде. В числе искусственных водоёмов значатся также Джалкинское и Карьерное озёра, Червленский и Шелковской пруды и др.

Гидрорекреационный потенциал нельзя рассматривать изолированно от других составляющих природных систем. Горные ландшафты ЧР в целом обладают значительным лечебным и оздоровительным потенциалом. Важный рекреационный ресурс — рельеф, характеризующийся большим разнообразием, сочетающий мощные горные поднятия, возвышенности и низменности. В комбинации с другими природными факторами он определяет высокую туристско-рекреационную привлекательность региона, в частности для развития горного туризма. Здесь с севера на юг сменяют друг друга зоны полупустынь (с отрицательными абсолютными отметками высот), степей, лесостепей, горных лесов и альпийских лугов, а также нивальная зона. Высокая расчленённость рельефа является результатом мощных молодых поднятий и сочетается с высоко приподнятыми плоскими выровненными поверхностями, свидетелями древних этапов развития рельефа. Некоторые вершины Бокового хребта поднимаются более чем на 4 тыс. м н. у. м.; это Тебулосмта (4493 м) и Диклосмта (4285 м).

Согласно официальным статистическим данным, за последние годы туристский поток в ЧР возрос в 2–3 раза. Основным интерес у туристов вызывают мечеть «Сердце Чечни», ансамбль высотных зданий «Грозный-Сити», озеро «Кезеной-Ам» и курорт «Ведучи». Вместе с тем на территории республики немало природных объектов, которые могут представлять повышенный интерес для туристов, приезжающих из разных регионов России, ближнего и дальнего зарубежья.

Позитивные тенденции последних лет всё ещё не обеспечили использование рекреационного потенциала ЧР на достаточном уровне. В регионе в настоящее время не приходится говорить даже об удовлетворении внутренних рекреационных потребностей. Многие жители республики вынуждены проходить реабилитацию в других регионах Российской Федерации. К основным факторам, сдерживающим развитие туристско-рекреационной сферы Чечни, можно отнести: неразвитость и износ рекреационной инфраструктуры; нехватку учреждений санаторно-курортного лечения населения; высокую стоимость услуг (стоимость авиаперевозок, проживания в гостиницах и других средствах размещения и др.); низкий уровень сервиса, комфортности и качества рекреационных и туристских услуг; дефицит квалифицированных кадров и др.

На данном этапе часть рекреационных ресурсов, включая гидрорекреационные, стихийно используется местным населением. Неорганизованная рекреация, в свою очередь, может послужить причиной деградации ландшафтов либо их компонентов. Развитие водного туризма не должно вызывать ухудшения геоэкологического состояния водных экосистем, что указывает на необходимость постоянного геоэкологического мониторинга с целью отслеживания химических, микробиологических и иных показателей [11]. При разработке стратегии развития водного туризма и управления водными ресурсами приоритет следует отдавать формам управления, обеспечивающим более устойчивое (рациональное) использование этого стратегически важного ресурса [8]. В планировании развития горных территорий приоритет следует отдавать шадящим формам туризма, в частности экологическому туризму.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 23-17-00218 «Экологический туризм и рекреационное природопользование на Северо-Восточном Кавказе»).

Список использованных источников

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Чеченской Республики в 2023 году». Грозный, 2024. 136 с.
2. Даукаев А. А., Гацаева Л. С., Абумуслимов А. А., Гацаева С. С.-А. Малые реки Чеченской Республики: особенности распределения и проблемы рационального использования // Известия Русского географического общества. 2024. Т. 156, № 4. С. 256–267. <https://doi.org/10.31857/S0869607124040025>. EDN: MOYNRQ
3. Забураева Х. Ш. Горные регионы Кавказа и их рекреационный потенциал // География в школе. 2014. № 7. С. 18–24. EDN: QOSGKO
4. Забураева Х. Ш. История рекреационного природопользования на Северо-Восточном Кавказе // Вестник Академии наук Чеченской Республики. 2023. № 1 (60). С. 86–92. <https://doi.org/10.25744/vestnik.2023.60.1.011>
5. Забураева Х. Ш., Даукаев А. А. Гидрорекреационный потенциал Чеченской Республики // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2016. № 2 (2). С. 15–21. EDN: YFUCML
6. Литвинов А. Е. Оценка рекреационного потенциала водных объектов горно-предгорных ландшафтов // Стратегия устойчивого развития регионов России. 2011. № 7. С. 187–192. EDN: RQAGSR
7. Перминова Д. Н. Автоматизированная модель оценки рекреационного потенциала водных объектов региона // Научному прогрессу – творчество молодых. 2024. № 1. С. 573–575. EDN: JPUGXP
8. Gössling S., Hall C. M., Scott D. Tourism and Water. Bristol : Channel View Publication, 2015, 190 p.
9. Kaaristo M., Rhoden S. Everyday life and water tourism mobilities: Mundane aspects of canal travel // Tourism Geographies. 2017. Vol. 19, iss. 1. P. 78–95. <https://doi.org/10.1080/14616688.2016.1230647>
10. River Tourism / B. Prideaux, M. Cooper (Eds). Wallingford : CABI, 2009, 288 p.
11. Strathmann M., Horstkott M., Koch C., Gayer U., Wingender J. The River Ruhr – an urban river under particular interest for recreational use and as a raw water source for drinking water: The collaborative research project "Safe Ruhr microbiological aspects // International Journal of Hygiene and Environmental Health. 2016. Vol. 219, iss. 7, pt B. P. 643–661. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2016.07.005>
12. Zaburaeva K. S., Gatsaeva L. S., Sarsakov M. S., Daukaev A. A., Abumuslimov A. A., Abumuslimova I. A. Hydro Potential Assessment on the Territory of the Chechen Republic for Recreational Purposes // International scientific and practical conference "AgroSMART – Smart Solutions for Agriculture", KnE Life Sciences. 2019. P. 497–506. <https://doi.org/10.18502/kls.v4i14.5637>. EDN: GCUDXW

УДК 579.26:631.46

Изучение сезонной динамики бактериального разнообразия почв бассейна реки Фатала (Гвинейская Республика) методом метагеномного анализа

Игнатъева Д. А.¹, Горбунова Т. Ю.¹, Алексеев Я. И.², Горбунов Р. В.¹, Монахова Ю. А.²,
Шварцев А. А.², Братанов Н. С.¹, Keita I.³, Diallo A. I. P.³

¹ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», Севастополь, Россия

²ООО «НПФ Синтол», Москва, Россия

³Marine and Coastal Research Center of Guinea (CEREMAC-G), Conakry, Guinea

✉ da_ignateva@ibss-ras.ru

Методом массового параллельного секвенирования переменных участков V3–V4 гена 16S рРНК на платформе Illumina проведено комплексное исследование структуры и состава почвенных микробных сообществ бассейна реки Фатала (Гвинейская Республика) в сухой и влажный сезоны. В сезон дождей отмечается понижение альфа-разнообразия ($p < 0,05$) и численности Planctomycetes, Verrucomicrobia, Tenericutes и Armatimonadetes ($q < 0,05$). Выявлены сезонные колебания 87 операционных таксономических единиц (OTU). Выделены индикаторные таксоны; наиболее сильными индикаторами для сухого периода являются *Bacillus anthracis* и *Frankia casuarinae*, для влажного — *Rubrobacter xylanophilus* и *Bacillus thuringiensis*. Полученные результаты важны для понимания сезонной динамики почвенной микробиоты в условиях тропического климата.

Ключевые слова: микробиом, бактериальный состав, экология, сухой сезон, влажный сезон, индексы видового разнообразия, почва, бассейн реки, река Фатала, Гвинейская Республика

Состояние наземных экосистем, в том числе растительных сообществ, значительно зависит от уровня влажности в регионе. Небольшое количество осадков способно снижать продуктивность растений, замедлять восстановление лесов, повышая их восприимчивость к патогенным микроорганизмам, что может привести к гибели деревьев. В засушливых местообитаниях свойства почв зависят от объёма осадков в регионе. В сухой сезон выпадает менее 100 мм в месяц, тогда как в дождливый — значительно больше. Это вызывает сезонные колебания физико-химических свойств почв, что, в свою очередь, влияет на структуру экосистем и на круговорот питательных веществ [3].

От влажности зависят численность, состав и структура почвенной микробиоты, а также активность бактерий. В засушливые периоды возрастает содержание филумов Actinomycetota и Chloroflexota, а во влажный период увеличивается численность Acidobacteriota. Данные взаимосвязи объясняются адаптациями бактерий к осмотическому стрессу, вызванному пересыханием или избыточным увлажнением почв [2]. Динамика уровня влажности способна приводить к колебаниям продуктивности растений, влияя на азотный цикл. Так, зафиксирована повышенная активность метанотрофов [8] и микроорганизмов, минерализующих азот, в дождливый период. Возрастание протяжённости дождей способно увеличивать биомассу почвенной микробиоты, что, однако, не всегда сопровождается изменениями метаболической активности [7].

Тип почвы определяет реакцию микроорганизмов на сезонные изменения [2]. В чернозёмах наблюдается снижение биоразнообразия с уменьшением доли филумов Firmicutes и Acidobacteriota и возрастанием обилия Bacteroidetes и Proteobacteria во влажный сезон. Микробиом краснозёмов характеризуется большей стабильностью состава, что определяется мезотрофностью слагающих его бактерий [6].

Среди микробиоты ризосферы в условиях засухи наблюдается сокращение численности микроорганизмов, чувствительных к влажности, что может негативным образом влиять на состояние растений. Представители ряда филумов, в том числе Actinomycetota, способствуют адаптациям растений к дефициту влаги [2]. Выделение растениями экссудатов в ответ на стресс привлекает бактерий

Bacillus и *Pseudomonas*, способствующих повышению устойчивости к засухе [5]. Также фиксируется повышение количества патогенных микроорганизмов во влажный период, в том числе *Salmonella enterica* и бактерий рода *Leptospira*, вызывающих вспышки заболеваний [4]. Данное наблюдение подчёркивает роль почвы в качестве резервуара инфекционных болезней.

Таким образом, для формирования понимания в отношении адаптаций экосистем к климатическим изменениям необходимо изучение сезонной динамики почвенного микробиома. Однако для ряда регионов, например для Гвинейской Республики, подобные исследования отсутствуют.

Целью проведённого исследования являлась оценка бактериального разнообразия почв бассейна реки Фатала (Гвинейская Республика) с выявлением изменений в сухой и влажный сезоны.

В ходе двух экспедиционных исследований, выполненных в сухой (ноябрь — декабрь 2023 г.) и влажный (август 2024 г.) сезоны, было проведено описание 18 фаций бассейна реки Фатала; в каждой фации были заложены почвенные профили, выделены и описаны почвенные горизонты. Из каждого выделенного почвенного горизонта было отобраны образцы почв с фиксацией раствором 95%-ного этанола с целью сохранения бактериального состава в неизменном состоянии.

Выделение тотальной бактериальной ДНК из почвенных проб с дальнейшей оценкой микробного состава почв посредством метагеномного секвенирования проводилось по разработанной авторами технологии [1]. Бактериальный состав определялся согласно методам массового параллельного секвенирования на КАП МПС Нанофор СПС (ИАП РАН, ООО «НПФ Синтол») библиотек ампликонов V3 и V4 переменного региона гена, кодирующего 16S-субъединицу рибосомальной РНК. Благодаря праймерам для секвенирования, комплементарным консервативным участкам, получили последовательности гипервариабельных участков. Библиотеки ампликонов подготавливали путём постановки ПЦР с праймерами, содержащими адаптерные участки, а также индексные последовательности, располагающиеся между адаптерным и локус-специфическим участками праймера.

В ходе биоинформатической обработки сырых данных формата fastq, полученных на этапе массового параллельного секвенирования метагеномных библиотек, применялись утилиты FastQC и MultiQC. Для оценки качества исходных данных и получения основной статистической информации об эффективности работы прибора, необходимых для выделения параметров фильтрации данных для дальнейшей обработки, был сгенерирован подробный html-отчёт, отражающий качество и длину прочтений, распределение GC-состава, а также другие ключевые параметры. С помощью утилиты Trimmomatic исходные данные очищались от прочтений низкого качества. Таксономическая классификация прочтений проводилась с помощью программы Kraken2, содержащей собственную базу данных Minikraken v2. Выходные файлы использовались для создания таблиц OUT и ASV и графиков, которые в дальнейшем подверглись статистической обработке.

Статистический анализ данных проводился с использованием программы Qiime2 (версия 2024.10.1) и языка программирования R (версия 4.4.3) в среде RStudio (версия 2024.12.1.563) и включал расчёт индексов альфа-разнообразия (индексы Sobs, Шеннона, Симпсона, Гудмана и выровненности Пиелу) с их попарным сравнением. Для параметрических данных применялся парный *t*-критерий Стьюдента, а для данных, не соответствующих нормальному распределению, — парный критерий Уилкоксона. Проверка нормальности производилась через тест Шапиро — Уилка (при $p > 0,05$ данные считались нормальными). Для всех индексов *p*-значения скорректированы методом FDR (Benjamini – Hochberg). Бета-разнообразие рассчитывалось на основе матрицы Брея — Кёртиса с поиском достоверно значимых различий методом PERMANOVA с тестом pseudo-*F* (для оценки достоверности использовался показатель *q*-value с корректировкой *p*-value методом FDR) и с визуализацией путём построения графика анализа главных координат (PCoA). Для выявления микроорганизмов, обилие которых тесно связано с сезонными изменениями, был проведён анализ индикаторных видов (ISA) в R с использованием пакета indicpecies (версия 1.8.0). Также для выявления филумов и видов бактерий, значительно отличающихся по своей относительной представленности между сухим и влажным сезонами, проводился анализ ANCOM-BC с применением программного обеспечения Qiime2 (версия 2024.10.1). Результаты анализов были визуализированы с использованием языка программирования R и пакета ggplot2 (версия 3.5.1).

В ходе попарного сравнения индексов Sobs, Шеннона, Симпсона и Гудмана отмечается достоверно значимое снижение альфа-разнообразия во влажный сезон согласно всем проанализированным индексам ($p < 0,05$). Индекс Пиелу, отражающий равномерность распределения видов в сообществе, достоверно повышается в сухой сезон ($d = 0,781$; $p < 0,01$).

Анализ PCoA, построенный на основе рассчитанной матрицы расстояний Брея — Кёртиса, показал, что пробы сухого и влажного сезонов образуют два разграниченных кластера (рис. 1). PCoA демонстрирует, что 22,14 % вариации объясняется PC1, а 17,34 % — PC2. Таким образом, первые две компоненты объясняют 39,48 % общей вариации, проявляется чёткое различие между микробными сообществами сухого и влажного сезонов. Этот вывод подтверждается статистически с помощью PERMANOVA ($p = 0,001$; $q = 0,001$; pseudo- $F = 6,86$). В центральной части графика образцы сухого и влажного сезонов частично перекрываются, что означает наличие в отдельных точках универсальных таксонов, которые устойчивы к сезонным колебаниям.

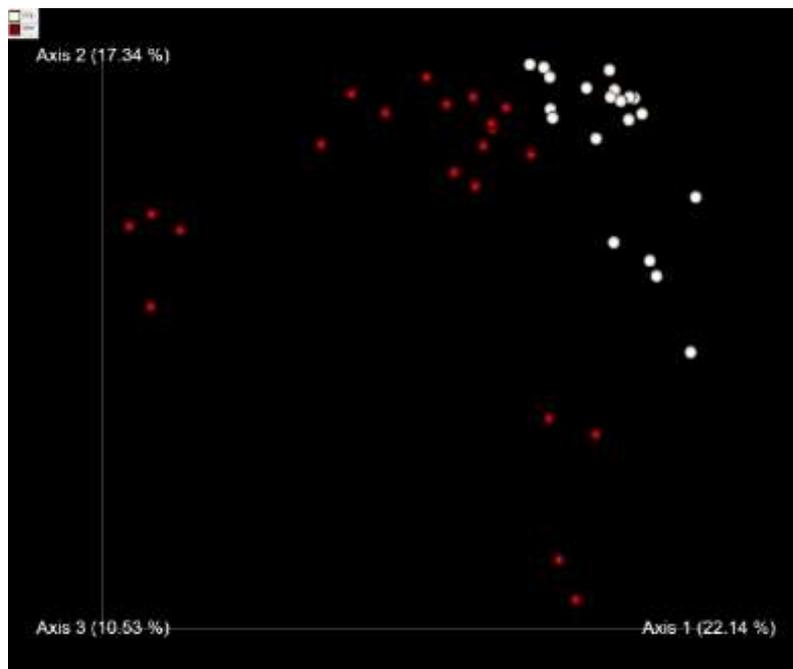


Рис. 1. Дисперсионный график PCoA, основанный на расстояниях Брея — Кёртиса, показывает значительные различия в бактериальных сообществах между сухим и влажным сезонами (PERMANOVA, $p < 0,001$). Процент объяснённой вариации указан в скобках

Применение ANCOM-BC (с FDR-коррекцией, $q < 0,05$) для сравнения бактериального состава почв в сухой и влажный сезоны выявило статистически значимые изменения обилия для четырёх филумов. Наиболее выраженное снижение во влажный сезон наблюдалось у Planctomycetes ($q < 0,001$; $W = -7,14$; LFC = $-0,416$). За ним следовали Verrucomicrobia ($q < 0,001$; $W = -4,34$; LFC = $-0,241$) и Tenericutes ($q < 0,001$; $W = -4,28$; LFC = $-0,123$). Это отражает уменьшение относительной численности на 34,1, 21,4 и 11,6 % соответственно. Также обнаружена небольшая тенденция к снижению численности Armatimonadetes ($q < 0,05$; $W = -3,57$; LFC = $-0,048$) — на 4,7 % (рис. 2).

Сравнение филумов сухого и влажного сезонов при различных положениях в рельефе (водораздел, склон и пойма) с помощью ANCOM-BC (FDR corrected, $q < 0,05$) показало: в зоне водораздела наблюдается статистически значимое снижение обилия Verrucomicrobia во влажный сезон (LFC = $-0,57$; $W = -3,31$; $q < 0,05$). На склоновых участках выявлены достоверные сезонные изменения в численности двух филумов — Planctomycetes (снижение на 32,5 %; $q < 0,001$; $W = -4,80$; LFC = $-0,393$) и Tenericutes (снижение на 11,1 %; $q < 0,05$; $W = -3,22$; LFC = $-0,118$). В пойме реки анализ ANCOM-BC выявил статистически значимое снижение Planctomycetes во влажный сезон (снижение на 29 %; $q < 0,001$; $W = -4,72$; LFC = $-0,341$) (рис. 3).

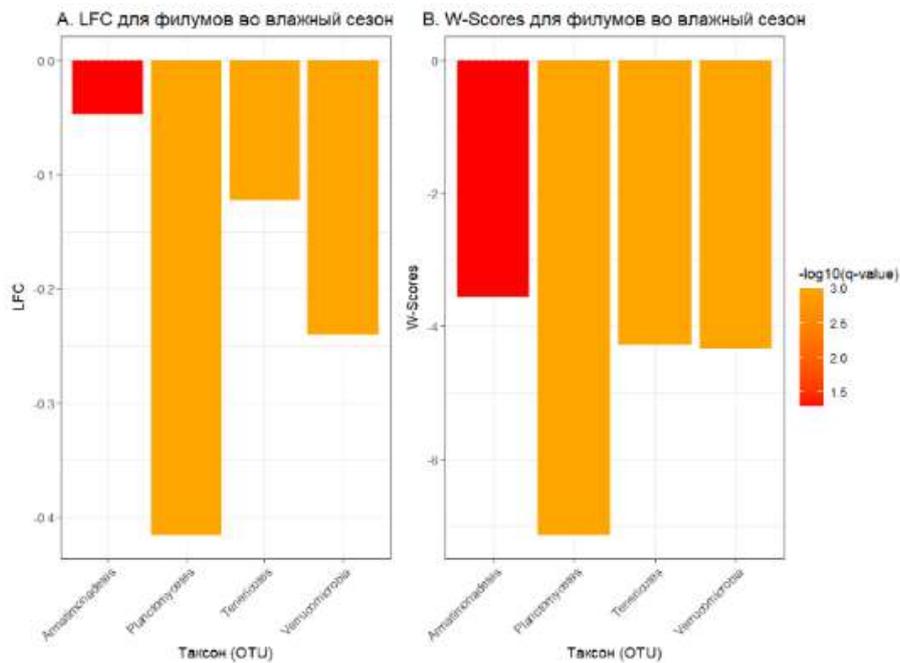


Рис. 2. Представлены результаты анализа ANCOM-BC, выявившего статистически значимые изменения обилия бактериальных филумов во влажный сезон по сравнению с сухим. А, LFC (Log Fold Change) — это логарифмическое отношение средних значений относительного обилия таксона между группами, отражающее биологическую величину изменения. Положительные значения LFC указывают на увеличение численности во влажный сезон, отрицательные — на уменьшение. Однако LFC не учитывает изменчивость данных, а следовательно, не отражает статистическую значимость различий. В, W -Score, рассчитан как отношение LFC к его стандартной ошибке; он учитывает как величину изменения (LFC), так и его статистическую значимость

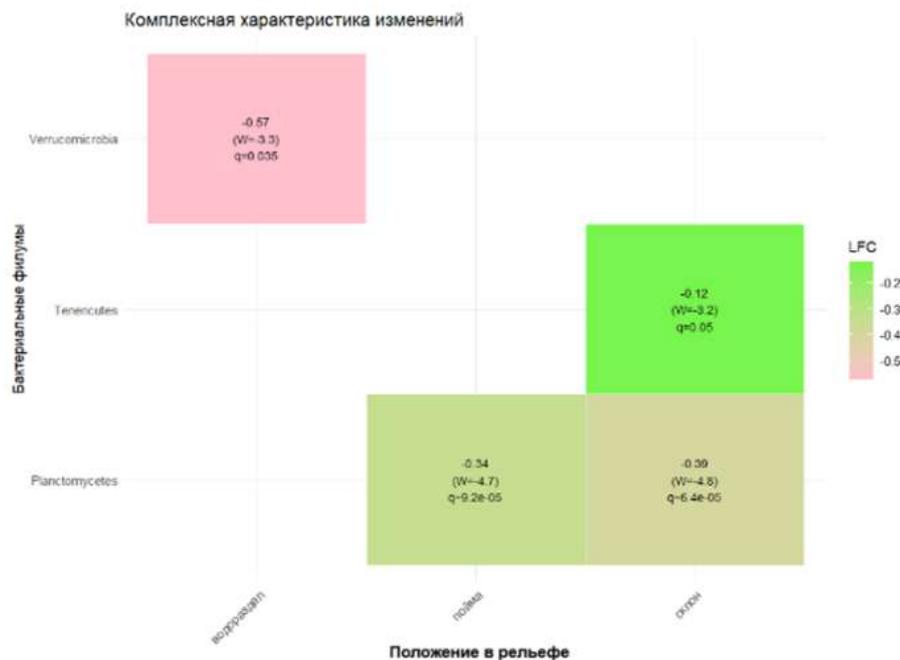


Рис. 3. График сводной информации изменения бактериального обилия в зависимости от положения в рельефе. Интенсивность цвета соответствует величине LFC, отражающей изменение в содержании филума. В каждой ячейке указаны W -Score и q -value, характеризующие статистическую значимость изменения

В результате анализа индикаторных видов (ISA) выявлены бактерии, численность которых достоверно связана с сухим либо влажным сезоном. Выделены виды, являющиеся индикаторными для сухого или влажного сезона независимо от положения в рельефе и глубины слоя по профилю. К универсальным видам — индикаторам сухого сезона относятся *Bacillus anthracis*, *Frankia casuarinae*, *Thermogutta terrifontis* и *Candidatus Moranella endobia*. Бактерия *Caldilinea aerophila* имеет достаточную вариабельность индекса индикаторной значимости (IndVal) при различных положениях в рельефе, однако обладает высокой значимостью независимо от глубины слоя. Индекс индикаторной значимости *Haliangium ochraceum* снижается в пойме; у *Candidatus Filomicrobium marinum* этот индекс характеризуется меньшими показателями на склоне, в то время как в других положениях в рельефе и на различных глубинах IndVal данных бактерий стабильно высок. Универсальными видами — индикаторами влажного сезона являются *Rubrobacter xylanophilus* и *Bacillus thuringiensis*, для которых характерны стабильно высокие значения IndVal вне зависимости от условий. На роли индикаторов этого сезона также предлагаются *Pseudonocardia dioxanivorans*, *Thermanaerovibrio velox*, *Pirellula staleyi* и *Lentibacillus amyloliquefaciens*. В качестве индикатора поймы наиболее подходит бактерия *Thermanaerovibrio velox*, однако данный вид может применяться при мониторинге микробиоты водораздела и склона.

При сравнении полученных в результате анализа ANCOM-BC значимых таксонов с наибольшими показателями LFC (q -value < 0,01; |LFC| > 2) и универсальных индикаторных видов, выявленных на основе ISA, зафиксированы совпадения ряда таксонов (*Rubrobacter xylanophilus*, *Bacillus thuringiensis*, *Thermanaerovibrio velox*, *Lentibacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus anthracis*, *Blastochloris viridis*, *Mahella australiensis*, *Caldanaerobacter subterraneus* и *Candidatus Moranella endobia*), что ещё раз подчёркивает связь данных операционных таксономических единиц (operational taxonomic units, OTU) со сменой сезонов.

Таким образом, в результате анализа выявлены достоверные сезонные изменения микробиоты почв, в том числе снижение альфа-разнообразия во влажный сезон и формирование чётких кластеров по бета-разнообразию для сухого и влажного сезонов (PERMANOVA, $p < 0,001$). Зафиксировано значимое сокращение во влажный сезон филумов Planctomycetes, Verrucomicrobia и Tenericutes. С помощью анализа ISA выявлены наиболее значимые виды-индикаторы — *Bacillus anthracis* для сухого сезона и *Rubrobacter xylanophilus* для влажного сезона; это подтверждает высокую чувствительность микробных сообществ почв к сезонным колебаниям.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Изучение особенностей функционирования и динамики субтропических и тропических прибрежных экосистем в условиях изменения климата и антропогенной нагрузки с использованием методов дистанционных исследований, технологий облачной обработки информации и машинного обучения для создания научных основ их рационального использования» (№ гос. регистрации 124030100030-0).

Работа выполнена на базе научно-образовательного центра коллективного пользования «Филогеномика и транскриптомика» (ФИЦ ИнБЮМ).

Список использованных источников

1. Пат. 2829656 Российская Федерация. МПК C12Q 1/68 (2006.01), C12Q 1/686 (2018.01), C12N 15/10 (2006.01), G01N 33/24 (2006.01), G01N 1/00 (2006.01). Способ выделения тотальной ДНК бактерий из образцов почвы, способ оценки бактериального состава почв посредством метагеномного секвенирования и наборы для осуществления способов / Игнатъева Д. А., Волков А. А., Шварцев А. А., Алексеев Я. И.; патентообладатель(и) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН» (ФИЦ ИнБЮМ); № 2024118782; заявл. 05.07.2024, опубл. 05.11.2024, бюл. № 31. EDN: ZXVEDH
2. Jiang H., Chen X., Li Y. et al. Seasonal dynamics of soil microbiome in response to dry-wet alternation along the Jinsha River Dry-hot Valley // BMC Microbiology. 2024. Vol. 24, no. 1. Art. no. 496. <https://doi.org/10.1186/s12866-024-03662-1>. EDN: LNDDRL

3. Jaramillo V. J., Martinez-Yrizar A., Sanford R. L. Primary productivity and biogeochemistry of seasonally dry tropical forests // Seasonally Dry Tropical Forests: Ecology and Conservation / R. Dirzo, H. S. Young, H. A. Mooney, G. Ceballos (Eds). Washington, DC : Island Press, 2011. P. 109–128. https://doi.org/10.5822/978-1-61091-021-7_7
4. Ofori L. A., Fosu D., Ofori S. et al. *Salmonella enterica* in farm environments in the Ashanti Region of Ghana // BMC Microbiology. 2023. Vol. 23, no. 1. Art. no. 370. <https://doi.org/10.1186/s12866-023-03121-3>. EDN: QNMLYY
5. Oppenheimer-Shaanan Y., Jakoby G., Starr M. L. et al. A dynamic rhizosphere interplay between tree roots and soil bacteria under drought stress // Elife. 2022. Vol. 11. Art. no. e79679. <https://doi.org/10.7554/eLife.79679>
6. Pajares S., Campo J., Bohannan B. J. M., Etchevers J. D. Environmental controls on soil microbial communities in a seasonally dry tropical forest // Applied and Environmental Microbiology. 2018. Vol. 84, no. 17. Art. no. e00342-18. <https://doi.org/10.1128/AEM.00342-18>
7. Wang Z., Liu X., Zhou W. et al. Land use intensification in a dry-hot valley reduced the constraints of water content on soil microbial diversity and multifunctionality but increased CO₂ production // Science of the Total Environment. 2022. Vol. 852. Art. no. 158397. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158397>
8. Zhang L., Sun X., Wang L. et al. Soil edaphic factors and climate seasonality explain the turnover of methanotrophic communities in riparian wetlands // Environmental Research. 2023. Vol. 233. Art. no. 116447. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116447>. EDN: ARJDQC

УДК 911.3(502.64)

Геоэкологическая оценка ландшафтов бассейна реки Чёрная (Крымский полуостров)

Каширина Е. С.^{1,2}, Панкеева Т. В.¹

¹ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», Севастополь, Россия

²Филиал МГУ в городе Севастополе, Севастополь, Россия

✉ e_katerina.05@mail.ru

В статье представлены результаты исследования бассейна реки Чёрная в пределах ландшафтного заказника «Байдарский» (Крымский полуостров). Составлена карта геоэкологической ситуации, согласно которой 45 % территории заказника характеризуется удовлетворительной ситуацией. Почти треть территории относится к районам с критической геоэкологической ситуацией. Полученные данные позволяют оптимизировать систему природопользования в бассейне реки Чёрная в условиях природоохранного режима заказника.

Ключевые слова: бассейн реки, ландшафт, геоэкологическая оценка, природный заказник, геоэкологические проблемы, заказник «Байдарский»

Усиление антропогенного прессинга на природные экосистемы приводит к формированию геоэкологических проблем, одновременно влияющих на различные компоненты ландшафта. В качестве комплексной оценки состояния ландшафтов целесообразно использовать методы геоэкологической оценки территории, в основе которой лежит как выявление геоэкологических проблем, так и определение остроты геоэкологической ситуации [1].

Острота геоэкологических проблем усиливается при их локализации на ценных природоохранных территориях. Природопользование на особо охраняемых природных территориях (далее — ООПТ) и на сопряжённых с ними участках снижает эффективность их функционирования. Геоэкологическая оценка ООПТ позволяет провести их функциональное зонирование и оптимизировать природоохранный режим. Геоэкологическая оценка территории с позиций бассейнового подхода даёт возможность учитывать не только отдельные проявления геоэкологических проблем, но и их пространственные взаимосвязи [5].

Природный заказник регионального значения «Байдарский» (24 852,4 га) — одна из самых крупных по площади ООПТ Крыма. Заказник занимает юго-западную часть Крымского полуострова. Он расположен в границах города федерального значения Севастополя, Балаклавского района, Орлиновского муниципального округа, Республики Крым (Бахчисарайский район) (рис. 1) [4].

Особенностью географического положения заказника является то, что он полностью охватывает водосбор реки Чёрная в верхнем и среднем течении. Одна из главных функций заказника — водоохранная, так как его территория довольно хорошо обеспечена поверхностными и подземными водами, обеспечивающими город Севастополь. В связи с этим актуальной задачей является охрана водосбора реки Чёрная [6].

Цель статьи — дать оценку геоэкологического состояния водосборного бассейна реки Чёрная на основе ландшафтного подхода для оптимизации природопользования.

Исследуемая территория расположена на стыке трёх ландшафтных зон — горной (три пояса), горных лугов яйл (один пояс) и южнобережной полусубтропической (один пояс), что обуславливает высокое ландшафтное и биологическое разнообразие [6]. Для геоэкологической оценки ландшафтов использовалась ландшафтная карта Крыма, составленная на уровне типов местности с выделением природных зон и поясов [7]. На карте выделена территория природного заказника «Байдарский», включающая 17 типов местности [3]. Каждый контур был оценён по показателям, представленным в табл. 1. На основе комплекса показателей трансформации почвенно-растительного покрова и загрязнения проведена геоэкологическая оценка ландшафтов заказника «Байдарский» (см. табл. 1).

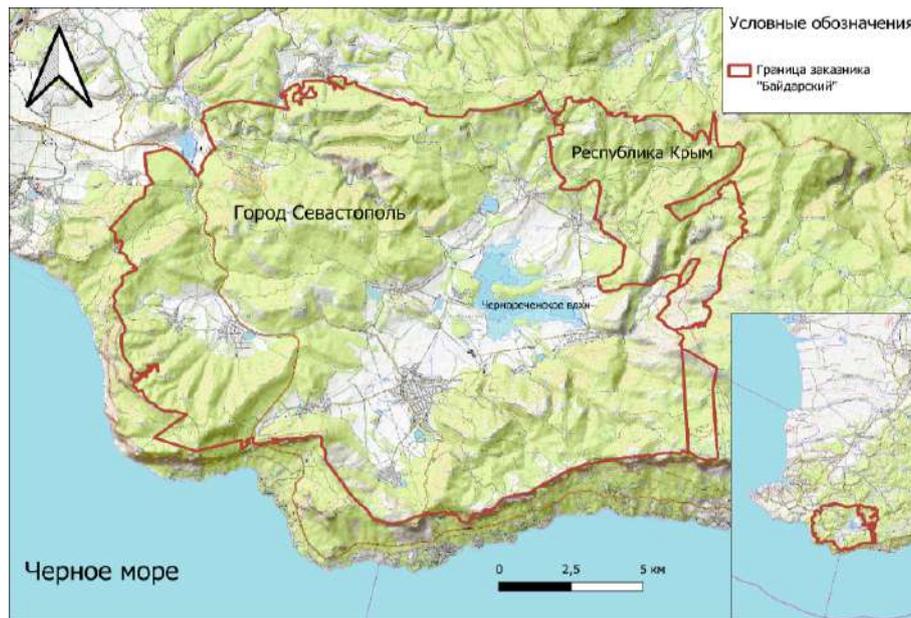


Рис. 1. Географическое положение природного заказника «Байдарский»

Состояние растительного покрова оценено по нормализованному относительному индексу растительности (normalized difference vegetation index, NDVI). При снижении NDVI отдельного контура от среднего показателя типа местности растительность участка рассматривается как угнетённая. При близких значениях NDVI отдельного участка со средним значением выставляется 2 балла. При повышении значения NDVI средних показателей балл геоэкологической оценки понижается [2].

Таблица 1. Геоэкологическая оценка ландшафтов заказника «Байдарский» (фрагмент)

| № | Почва | | | Воздух | | | Шум | Загрязнение | Растительность | | Σ |
|-----|---------------------|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------|-----|-------------|----------------|-----------|----|
| | Рас- па- хан- ность | Подтоп- ление и засо- ление | Загряз- нение от авто- тран- спорта | Загряз- нение от домов | Загряз- нение от авто- тран- спорта | Загряз- нение от домов | | | NDVI | Дигрессия | |
| 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 20 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 11 |
| 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 1 | 16 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 506 | | | | | | | | | | | |

Баллы, характеризующие состояние растительности, почвы, поверхностных вод и атмосферного воздуха, суммируются. В результате выделены удовлетворительные ситуации (с интегральным показателем менее 10 баллов), конфликтные (10,1–15); напряжённые (15,1–25) и критические (25,1 и выше).

Оценка геоэкологической ситуации показала, что в пределах заказника выделяются 4 её типа — удовлетворительная (45 % площади), конфликтная (15 %), напряжённая (10 %) и критическая (30 %) (рис. 2).

Удовлетворительная геоэкологическая ситуация сложилась на лесных ландшафтах, что обусловлено локальной рекреационной нагрузкой. Геоэкологическое состояние лесных ландшафтов низкогогорий и среднегорий в условиях котловин, оценённое по показателю NDVI и по стадиям рекреационной дигрессии, определяется природными факторами (экспозицией склонов и уклоном) и в меньшей степени антропогенными (рекреационной нагрузкой, имеющей очаговое распространение).

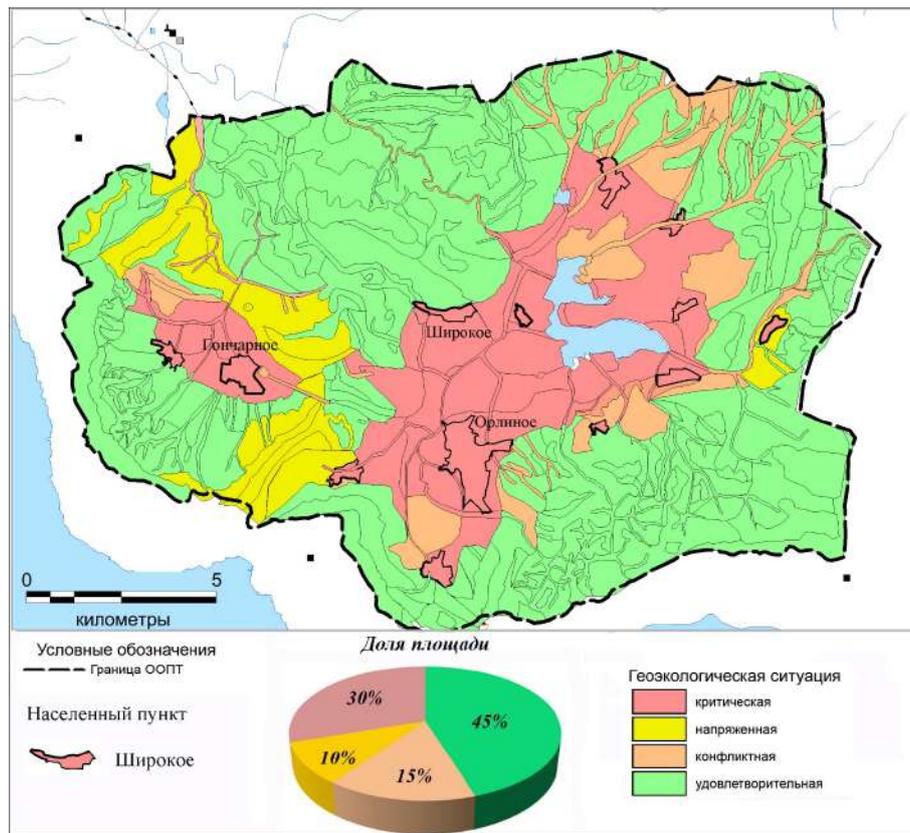


Рис. 2. Геоэкологическая ситуация на территории заказника «Байдарский»

Конфликтная геоэкологическая ситуация отмечена для прирусловых районов, где сосредоточена рекреация и селитебные комплексы, а также для шибляковых сообществ низкогорий с интенсивным выпасом и с необходимостью сохранения редких и охраняемых видов растений.

Напряжённая геоэкологическая ситуация наблюдается вдоль автодорог, пересекающих территорию заказника.

Критическая ситуация отмечена вблизи населённых пунктов, где концентрируются источники загрязнения атмосферы, водных ресурсов и почв, а также источники шумового воздействия. Ведущий фактор формирования напряжённой и критической геоэкологической ситуации — загрязнение от селитебных зон и транспорта.

Полученные данные позволяют оптимизировать систему природопользования в бассейне реки Чёрная в условиях природоохранного режима заказника.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ (№ гос. регистрации 124022400152-1 и 124030100030-0).

Список использованных источников

1. Власова А. Н. Бассейновый подход к управлению природопользования в Крыму // Учёные записки ТНУ имени В. И. Вернадского. Серия: география. 2011. Т. 24 (61). С. 36–42.
2. Голубева Е. И., Каширина Е. С., Новиков А. А., Глухова А. В. Использование индекса NDVI для геоэкологической оценки особо охраняемых природных территорий на примере города Севастополя. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий : материалы междунар. конф. Москва : Издательство Московского университета, 2019. Т. 25. Ч. 1. С. 320–331. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2019-1-25-320-331>

3. Каширина Е. С. Ландшафтное разнообразие природного заказника «Байдарский» // Материалы XII Международной ландшафтной конференции. Тюмень – Тобольск, 22–25 августа 2017 г. Т. 2. С. 55–60.
4. Ларина Т. Г. Природно-антропогенный комплекс заказника «Байдарский». Симферополь : Н. Орианда, 2008. 56 с.
5. Мильков Ф. Н. Бассейн реки как парадинамическая ландшафтная система и вопросы природопользования // География и природные ресурсы. 1981. № 4. С. 11–18.
6. Особо охраняемые природные территории Севастополя / под ред. д. б. н., проф. Е. И. Голубевой, д. г. н., проф. Е. А. Позаченюк. Симферополь : ИТ АРИАЛ, 2020. 140 с.
7. Современные ландшафты Крыма и сопредельных акваторий : монография / науч. ред. Е. А. Позаченюк. Симферополь : Бизнес-Информ, 2009. 672 с.

УДК 550.4

Концентрации неорганических соединений азота в реке Черек от её истока до выхода в предгорную зону (КБР)

Курашева О. А.

Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия

✉ oks.anchik@mail.ru

В данной работе приводятся результаты химических анализов проб воды реки Черек от её истока (Черка Безенгийского) до выхода в предгорную зону. Во всех отобранных пробах измерялись величины pH и концентрации неорганических соединений азота (NO_2^- , NO_3^- и NH_4^+). Пробоотбор проводился в июне (летнее половодье) и феврале (зимняя межень) 2018 г.

Ключевые слова: химический анализ, река Черек, река Черек Безенгийский, Кабардино-Балкарская Республика

Река Черек образуется в результате слияния рек Черек Балкарский и Черек Безенгийский и является правым притоком реки Баксан. Истоком реки являются ледники Главного Кавказского хребта. Длина реки — 131 км (считая от истока реки Черек Балкарский). Площадь водосбора — 3070 км². Река Черек представляет большой интерес, поскольку почти 12 % её площади занято ледниками, а ледниковое питание составляет 33 % годового стока и 43 % в тёплый период. В нижнем и среднем течении реки весьма значительную роль играет грунтовое питание. Основная доля снегового и ледникового стока из гляциальной зоны приходится на тёплый период года, когда потребность в пресной воде для отраслей экономики максимальна [2].

В 2018 г. в период зимней межени и летнего половодья был проведён мониторинг реки Черек на содержание нитритов, нитратов и аммония, а также на определение величин pH речных вод. Пробы воды в реке Черек и в её притоках отбирали на протяжении 60 км до села Аушигер, начиная с языков ледников Безенги и Мижирги (в 9 стационарных пунктах). Отбор проб производился в периоды разного гидрологического режима рек (летнее половодье — июнь; зимняя межень — февраль).

Определение химического состава на содержание трёх форм соединения азота в реке выполнялось в отделе физики облаков — в лаборатории аналитической химии ВГИ. Во всех отобранных пробах измерялись значения pH и концентрации неорганических соединений азота (NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+). Результаты анализа и пределы изменений химического состава вод реки Черек во всех створах представлены в табл. ??.

Величина pH для реки Черек в зимней межени варьирует в пределах от 8,20 до 8,5, а в летнее половодье — от 7,48 до 8,56, что относит её воды к нейтральным, слабощелочным (рис. 1). Содержание трёх форм неорганического азота находилось в пределах нормы. Концентрации нитритов и аммония по длине реки варьировали неоднозначно. Наблюдается закономерное увеличение распределения концентрации нитратов от истока к замыкающему створу. Для реки Хеу (грунтовое питание) максимальная величина pH составила 8,45.

По химическому составу вод в период зимнего пробоотбора выделяется Аушигерский высоко-термальный источник: здесь концентрация нитратов составила 57,3 мг·л⁻¹, превысив ПДК в 1,4 раза, а содержание ионов аммония было выше нормы более чем в 10 раз (см. табл. ??). Источник расположен на юго-западной окраине села Аушигер, на правом берегу реки Хеу. Это тёплый углекислый минеральный источник с высоким содержанием азотных соединений. Его вода используется в лечебных целях. Химический анализ проб воды выявил, что значение pH мало зависит от сезона. В работе [1] установлено, что содержание NO_2^- и NO_3^- от сезона не зависит, но концентрации в 2009 г. были в 2–3 раза выше, чем в 2010 г.

Таблица 1. Величины pH и концентрации трёх форм соединения азота в речных водах долины реки Черек

| № | Водный объект | pH | Концентрация соединения азота, мг·л ⁻¹ | | |
|-----------------------------|--|---------|---|------------------------------|------------------------------|
| | | | NO ₂ ⁻ | NO ₃ ⁻ | NH ₄ ⁺ |
| 15.02.2018 | | | | | |
| 1 | Река Черек Безенгийский, выше села Безенги | 8,20 | 0,002 | 4,0 | 0,07 |
| 2 | Река Черек Хуламский, выше села Карасу | 8,30 | 0,002 | 6,20 | 0,10 |
| 3 | Река Черек Хуламский, выше села Бабугент | 8,18 | 0,006 | 4,0 | 0,48 |
| 4 | Река Черек Балкарский, выше села Бабугент | 8,31 | 0,009 | 5,60 | 0,16 |
| 5 | Река Черек, выше пгт Кашхатау | 8,45 | 0,014 | 12,0 | 0,13 |
| 6 | Река Хеу, село Аушигер | 8,44 | 0,044 | 21,5 | 0,33 |
| 7 | Река Черек, ниже села Аушигер | 8,42 | 0,043 | 19,0 | 0,24 |
| 8 | Геотермальный источник Аушигер | 8,24 | 0 | 57,3* | 5,1* |
| 28.06.2018 | | | | | |
| 9 | Река Мижирги, выше моста | 7,68 | 0,015 | 1,12 | 0,13 |
| 10 | Река Черек Безенгийский, исток | 7,48 | 0,029 | 0,75 | 0,33 |
| 11 | Река Черек Безенгийский, выше села Безенги | 7,87 | 0,032 | 1,12 | 0,36 |
| 12 | Река Черек Хуламский, выше села Карасу | 8,56 | 0,026 | 1,28 | 0,22 |
| 13 | Река Черек Хуламский, выше села Бабугент | 8,29 | 0,003 | 1,28 | 0,31 |
| 14 | Река Черек Балкарский, выше села Бабугент | 8,05 | 0,023 | 1,46 | 0,022 |
| 15 | Река Черек, ниже посёлка Кашхатау | 8,38 | 0,014 | 1,46 | 0,11 |
| 16 | Река Хеу, село Аушигер | 8,55 | 0,039 | 8,32 | 0,24 |
| 17 | Река Черек, ниже села Аушигер | 8,30 | 0,037 | 1,91 | 0,22 |
| ПДК _{поверхн. вод} | | 6,5–8,5 | 0,080 | 40,0 | 0,5 |

* — превышение ПДК.

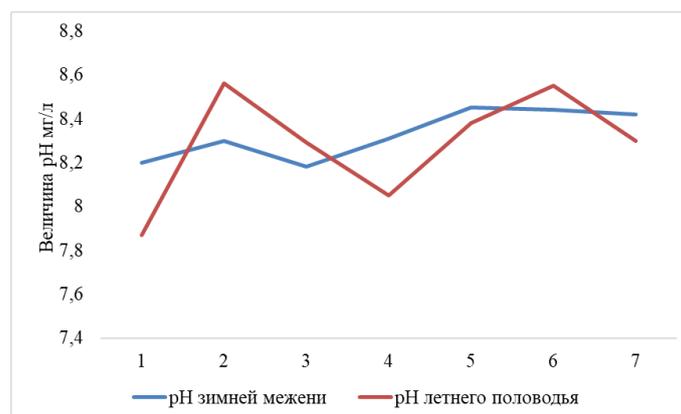


Рис. 1. Величины pH в периоды зимней межени и летнего половодья реки Черек (2018 г.): 1 — река Черек Безенгийский, выше села Безенги; 2 — река Черек Хуламский, выше села Карасу; 3 — река Черек Хуламский, выше села Бабугент; 4 — река Черек Балкарский, выше села Бабугент; 5 — река Черек, выше пгт Кашхатау; 6 — река Хеу, село Аушигер; 7 — река Черек, ниже села Аушигер

Список использованных источников

1. Керимов А. М., Курашева О. А. Содержание главных ионов в реке Черек от его истока до выхода в предгорную зону (КБР) // Успехи современного естествознания. 2021. № 11. С. 70–74. <https://doi.org/10.17513/use.37715>. EDN: JСNYPT
2. Панов В. Д. Режим и эволюция современного оледенения бассейна р. Черек Безенгийский. Л. : Гидрометеоиздат, 1978. 135 с.

УДК 551.509.5:556.5

Применение модели искусственной нейронной сети для прогнозирования паводков в Горном Крыму

Лубков А. С., Вышкваркова Е. В., Воскресенская Е. Н., Щодро А. Е.

Институт природно-технических систем, Севастополь, Россия

✉ andrey-ls2015@yandex.ru

Горный Крым, характеризующийся сложной топографией и крутыми склонами, особенно подвержен опасным гидрологическим явлениям, которые возникают после длительных периодов интенсивных осадков. В публикации по ежедневным данным об атмосферных осадках с метеорологической станции Ай-Петри рассчитаны случаи с суммой осадков, равной и/или выше 40 мм за три последовательных дня, которые использованы в качестве порога экстремальных осадков, приводящих к размыву русел рек Горного Крыма и к формированию селевых потоков. Для прогнозирования таких событий разработана модель, основанная на искусственной нейронной сети. Результаты эксперимента подтверждают применимость данной методики для предсказания экстремальных метеорологических событий, ускоряющих эрозионные процессы в Горном Крыму.

Ключевые слова: Горный Крым, экстремальные осадки, прогноз, искусственная нейронная сеть

Введение. Проблема неравномерного распределения водных ресурсов в Крыму остаётся актуальной уже на протяжении многих лет, что связано с уникальными физико-географическими условиями региона. Паводковые явления, особенно характерные для зимне-весеннего периода, формируют до 80 % общего поверхностного стока [1]. Такая специфика обусловлена не только неравномерностью распределения осадков, но и особенностями геоморфологии речных бассейнов полуострова.

Интенсивное и продолжительное выпадение осадков может приводить к ряду негативных последствий — от внезапных паводков и подтоплений до формирования разрушительных селевых потоков. Катастрофический инцидент января 2024 г., когда в бассейне реки Чёрная из-за экстремального дождя произошла техногенная авария, лишившая Севастополь городского водоснабжения на неделю, ясно демонстрирует серьёзность проблемы. Ливневые осадки становятся основным фактором, инициирующим эрозионные процессы, особенно в условиях крутых склонов и ограниченных водосборных площадей горных рек [2].

Южная часть Крымского полуострова характеризуется наибольшей неравномерностью выпадения осадков во времени и экстремальными осадками [5]. Последние исследования, в том числе отчёт ИРСС, свидетельствуют о том, что с увеличением приземной температуры наблюдается рост числа случаев экстремальных осадков [4]. Прогнозирование подобных метеорологических событий имеет первостепенное значение как с научной, так и с практической точки зрения, поскольку позволяет своевременно предупреждать и минимизировать ущерб от подобных явлений. Ключевой задачей становится обеспечение качественного и заблаговременного прогноза атмосферных осадков.

Одним из современных подходов к решению этой задачи является применение искусственных нейронных сетей, которые могут эффективно моделировать сложные зависимости между множественными метеорологическими параметрами. В настоящем исследовании на основе длительных наблюдений за атмосферными осадками и применения методики искусственной нейронной сети рассмотрена возможность прогнозирования экстремальных осадков, являющихся причиной размыва русел рек и обрушения склонов в Горном Крыму.

Данные и методика. Для разработки модели были использованы ежедневные данные о количестве осадков, полученные со станции Ай-Петри за период 1950–2020 гг. Метеостанция выбрана в силу своей географической привязки: именно здесь начинаются русла рек, таких как Чёрная и Учан-Су, гидрологическая динамика которых во многом определяется характеристиками данного региона.

В качестве критерия для выделения экстремальных метеорологических событий выбран порог в 40 мм суммарных осадков за три последовательных дня. Каждое событие, при котором этот порог был превышен, рассматривалось как отдельный гидрологический случай, и именно эти данные были применены при обучении системы искусственного интеллекта.

Основной методологический подход строится на использовании модели, разработанной на базе искусственной нейронной сети, схема которой представлена в ряде работ [3, 6]. Первоначальный этап (рис. 1, этап 1) включает декомпозицию исходного временного ряда осадков на две составляющие — низкочастотную и высокочастотную — посредством применения скользящего среднего, рассчитанного за 9-летний период.

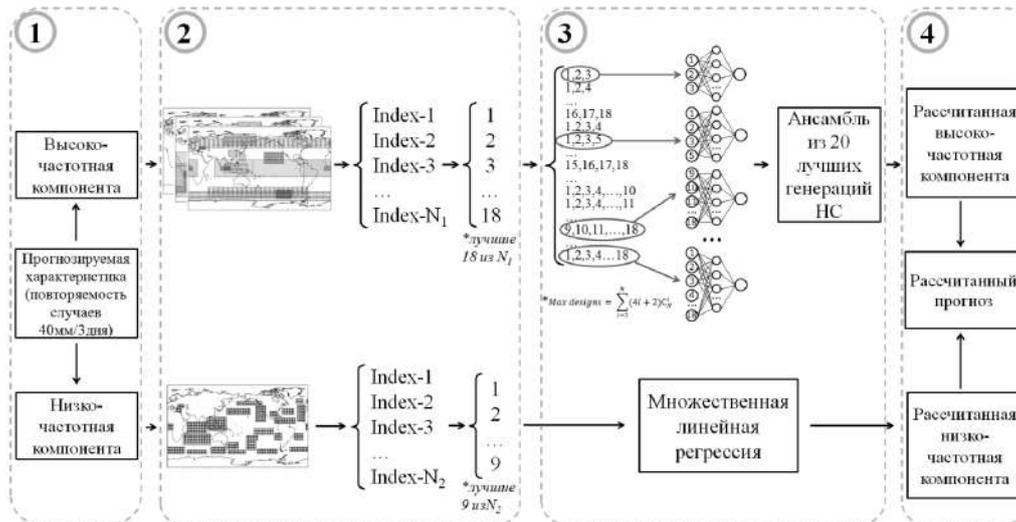


Рис. 1. Схема предлагаемой модели: 1 — декомпозиция моделируемого ряда; 2 — предварительная обработка данных; 3 — моделирование; 4 — результаты моделирования и проверка

На втором этапе производится отбор и сортировка предикторов, необходимых для моделирования (рис. 1, этап 2). В качестве исходных данных для формирования предикторных переменных использовались индексы глобальных климатических сигналов, отражающих взаимодействие океана и атмосферы. Этот подход позволяет учесть влияние глобальных климатических колебаний на локальные метеорологические условия в Горном Крыму. Области, в которых рассчитывались предикторы, аналогичны представленным в работах [3, 6].

В основе модели лежит однонаправленная гетероассоциативная нейронная сеть; она выполнена в виде многослойного персептрона с единственным скрытым слоем, а выходной слой представлен одним нейроном (рис. 1, этап 3). В качестве функции активации для нейронов выбрана сигмоидальная биполярная функция. Модель разделена на три выборки — обучающую (38 лет, 1950–1987 гг.), тестовую (19 лет, 1988–2006 гг.) и контрольную (14 лет, 2007–2020 гг.). Кроме того, модель была использована для моделирования ещё четырёх лет (2021–2024 гг.) без сравнительного анализа с фактическими данными.

Процесс моделирования основывался на многократном переборе различных комбинаций входных параметров, что позволило сформировать набор конструкций нейронной сети. Из всех разработанных вариантов для дальнейшего анализа отбирались 20 лучших моделей, результаты которых были агрегированы посредством усреднения и представлены в виде блочных диаграмм.

Оценка прогнозирующих возможностей модели проводилась посредством сравнения прогнозных данных с контрольной выборкой с использованием коэффициента корреляции Пирсона. Дополнительно анализировалось отношение среднеквадратичного отклонения (RMSE) прогноза к стандартному отклонению наблюдаемого ряда. Результат считался удовлетворительным, если значение $RMSE/\sigma$ было меньше единицы, что свидетельствует о том, что ошибка модели не превышает природную изменчивость данных.

Результаты. В качестве входных параметров для прогнозирования в первую очередь использовались индексы, отражающие глобальные климатические сигналы системы океан — атмосфера. На контрольном периоде (2007–2020 гг.) модель показала способность прогнозировать случаи, когда суммарное количество осадков превышало 40 мм за три последовательных дня, с заблаговременностью до девяти месяцев (рис. 2). Анализ графических представлений прогнозных данных продемонстрировал, что для всех месяцев, за исключением декабря, полученные результаты имели статистическую значимость при любой заданной заблаговременности. Графическая зависимость коэффициента корреляции от заблаговременности прогноза выявила закономерную обратную связь: с увеличением срока предсказания коэффициент корреляции снижается, а значение $RMSE/\sigma$ возрастает. Также отмечено, что по мере удаления от тестовой выборки (1988–2006 гг.) наблюдается ухудшение качества прогноза, что свидетельствует о нестационарном характере модели. Данные результаты подчёркивают необходимость регулярного пересчёта модели каждые пять лет.

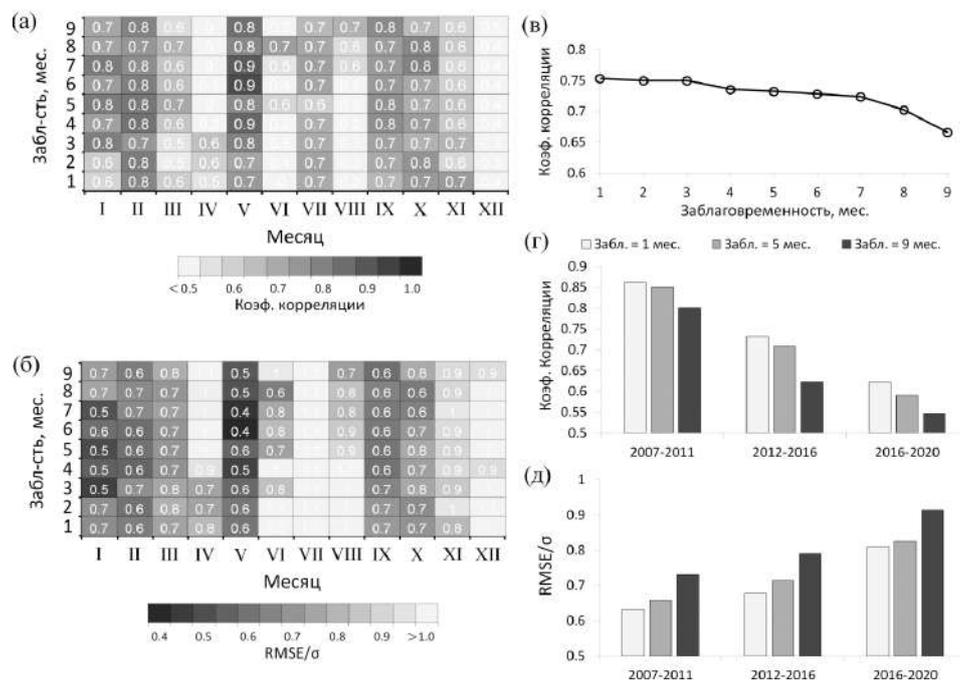


Рис. 2. Оценки способности модели прогнозировать повторяемость случаев, когда суммарное количество осадков превышало 40 мм за три последовательных дня, с использованием коэффициентов корреляции (а, в, г) и отношения $RMSE/\sigma$ (б, д) за контрольный период 2007–2020 гг.: а, б — диаграммы зависимости изменения способности модели в зависимости от моделируемого месяца и заблаговременности прогноза; в — изменение коэффициента корреляции в зависимости от заблаговременности; г, д — изменение способности модели для трёх пятилетних временных периодов контрольной выборки на примере заблаговременности 1, 5 и 9 месяцев

Более детальный анализ блочных диаграмм, составленных для 20 лучших моделей при заблаговременности прогноза в три месяца, позволяет выделить следующие особенности: в большинстве экстремальных месяцев, когда наблюдалось 2 или более случая превышения порога в 40 мм осадков за три дня, модель корректно улавливала эти события (рис. 3). Например, в ноябре 2007 г. зафиксировано 4 экстремальных события, а среднее значение прогноза составляло 3; в декабре 2010 г. ситуация была аналогичной. В июле 2018 г. наблюдалось 3 экстремальных случая, при этом прогноз давал значения в диапазоне от 1 до 2 событий, что сопоставимо с многолетней средней величиной менее 1 случая. В январе 2019 г. при 3 событиях диапазон прогнозируемых значений варьировал от 1 до 3, что указывает на достаточно высокую чувствительность модели к экстремальным метеорологическим явлениям. За период исследования также было отмечено 14 месяцев, когда фиксировались по 2 случая превышения порога, и для 10 из этих месяцев прогнозная модель давала значения, перекрывающие наблюдаемые данные, тогда как в оставшиеся 4 месяца прогнозы оказались заниженными.

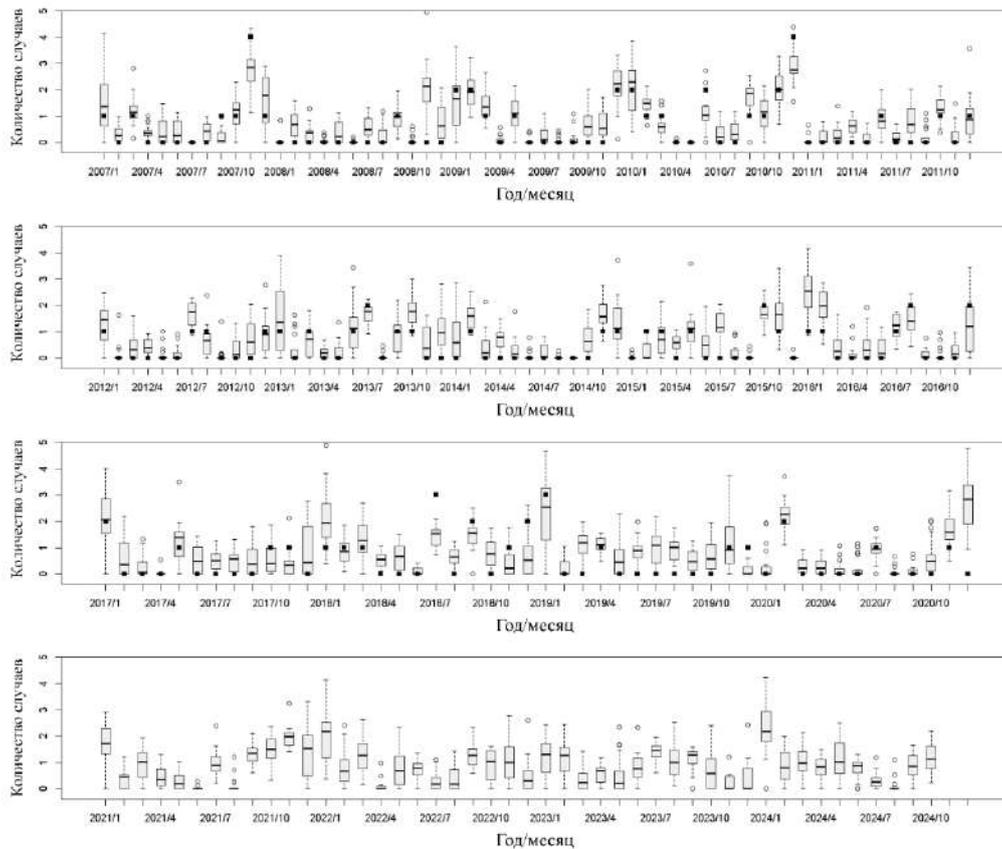


Рис. 3. Блочные диаграммы для 20 лучших результатов моделирования с заблаговременностью прогноза три месяца на контрольной выборке 2007–2024 гг. Рассчитанные по данным наблюдений случаи с осадками выше 40 мм за три последовательных дня показаны черными точками (по 2020 г.)

Выводы. Проведённое исследование демонстрирует, что применение модели искусственной нейронной сети позволяет достаточно точно прогнозировать экстремальные осадки в Горном Крыму, являющиеся непосредственной причиной размыва русел рек и обрушения склонов. Все месяцы, в которых наблюдалось 3 и более события превышения порога в 40 мм за три последовательных дня, были корректно предсказаны с заблаговременностью от трёх месяцев. Аналогично: из 14 месяцев с 2 зафиксированными событиями 10 оказались успешно спрогнозированными. При этом наблюдается явная обратная зависимость между коэффициентом корреляции и сроком заблаговременного прогноза: с увеличением заблаговременности точность модели уменьшается, что подтверждается ростом отношения $RMSE/\sigma$.

Данный факт указывает на нестационарность используемой модели, что требует её регулярной адаптации и пересчёта каждые пять лет для поддержания высокого качества прогнозирования. Таким образом, разработанная методика на основе искусственной нейронной сети может быть рекомендована для оперативного мониторинга и для предупреждения гидрологических угроз в условиях сложного рельефа и изменяющихся климатических условий Горного Крыма.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института природно-технических систем (№ гос. регистрации 124013000609-2).

Список использованных источников

1. Гидрогеология СССР. Т. VIII. Крым / гл. ред. А. В. Сидоренко. М. : Недра. 1970. 364 с.
2. Куксина Л. В., Голосов В. Н., Жданова Е. Ю., Цыпленков А. С. Гидролого-климатические факторы формирования экстремальных эрозионных событий в горном Крыму // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2021. № 5. С. 36–50. EDN: OTDGSE

3. Лубков А. С., Воскресенская Е. Н., Сухонос О. Ю. Прогноз выпадения осадков в районе Ай-Петри на основе модели искусственной нейронной сети // Водные ресурсы. 2022. Т. 49, № 4. С. 517–526. <https://doi.org/10.31857/S0321059622040137>. EDN: **FBMPBF**
4. IPCC 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK ; New York, NY, USA : Cambridge University Press, 2021. 144 p.
5. Voskresenskaya E., Vyshkvarkova E. Extreme precipitation over the Crimean Peninsula // Quaternary International. 2016. Vol. 409, part A. P. 75–80. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.09.097>. EDN: **WPKKUH**
6. Maslova V. N., Voskresenskaya E. N., Lubkov A. S., Yurovsky A. V., Zhuravskiy V. Y., Evstigneev V. P. Intense cyclones in the Black Sea region: Change, variability, predictability and manifestations in the storm activity // Sustainability. 2020. Vol. 12, no. 11. Art. no. 4468. <https://doi.org/10.3390/su12114468>. EDN: **RBSTIT**

УДК [556.114.7:661.723](292.471:285)

Оценка поступления хлорорганических соединений и диэтилгексилфталата из снежного покрова в Симферопольское водохранилище (Крымский полуостров)

Малахова Л. В.^{1,2}, Табунщик В. А.¹, Малахова Т. В.^{1,2}, Мосейченко И. Н.^{1,2}

¹ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», Севастополь, Россия

²Научно-исследовательский центр пресноводной и солоноватоводной гидробиологии —
филиал ФИЦ ИнБЮМ, Севастополь, Россия

✉ malakhovalv@ibss-ras.ru

На основе данных космической съёмки и полевых измерений рассчитан объём снежного покрова Симферопольского водохранилища (Крымский полуостров) на конец февраля 2025 г. Проведена оценка массы органических соединений, поступивших с талой водой в водохранилище, — диэтилгексилфталата (2,9 г), пестицида п,п'-ДДТ и его метаболитов п,п'-ДДЭ и ДДД (0,003–0,013 г), полихлорбифенилов (0,007–0,034 г). Полученные данные сопоставлены с общим количеством хлорорганических соединений и фталата в объёме водохранилища и с оценкой массы этих веществ, потенциально поступающей в водохранилище с запасом воды в снеге выше Симферопольского водохранилища.

Ключевые слова: ДДТ и его метаболиты, полихлорбифенилы, диэтилгексилфталат, космические съёмки, площадь снежного покрова, талая вода, Симферопольское водохранилище

Хлорорганические соединения (далее — ХОС) — пестицид п,п'-ДДТ и его метаболиты п,п'-ДДЭ и ДДД и полихлорбифенилы (далее — ПХБ) — представляют собой стойкие органические загрязнители (далее — СОЗ), которые даже спустя десятилетия после запрета их производства и использования продолжают оказывать негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека. Эти соединения, благодаря своей устойчивости к разложению и способности к биоаккумуляции, сохраняются десятки лет в природных условиях, в том числе в водных экосистемах. В последние годы в природной среде были зарегистрированы значительные концентрации фталатов, которые ввиду масштабного антропогенного поступления и токсичного воздействия на эндокринную систему организмов также могут представлять экологический риск в связи с их свойствами биоаккумуляции.

Ранее проведённые исследования выявили крайне неравномерное содержание и распределение ДДТ и ПХБ в воде и донных отложениях реки Салгир (Крымский полуостров). Были обнаружены зоны с аномально высокими концентрациями ХОС в среднем течении Салгира, расположенном в степной зоне Крыма, вблизи населённых пунктов Красная Зорька, Искра, Пятихатка и Молочное [2, 10]. Такое очаговое загрязнение связано с поступлением ХОС из локальных источников: мест хранения устаревших пестицидов, свалок электротехнических отходов и т. п. В тот же временной период выше по течению реки Салгир, в Симферопольском районе, концентрации ДДТ и ПХБ оказались значительно ниже, чем в среднем течении. Это указывает на отсутствие существенных локальных источников загрязнения в данном районе. Мы предполагаем, что в сравнительно незагрязнённые районы ХОС могут поступать с атмосферными выпадениями, поскольку известно, что они способны переноситься с воздушными массами на значительные расстояния от первоначального места нахождения [9].

Одним из наиболее информативных и удобных объектов — индикаторов атмосферного загрязнения является снег, который сорбирует различные соединения при формировании в атмосфере, что делает его важным инструментом для оценки степени влияния атмосферных выпадений на общий уровень загрязнения окружающей среды [3, 4]. Расчётные данные о поступлении загрязняющих веществ из атмосферы со снегом имеют оценочный порядковый характер. В научной литературе методика таких расчётов для водных поверхностей учитывает средние концентрации загрязнителей в талой воде снега, поступающего на лёд акваторий, объёмы талой воды, площадь зеркала и объём водоёмов [8].

Цель работы — оценка вклада атмосферных выпадений в поступление органических загрязнителей в Симферопольское водохранилище на основе анализа снежного покрова. Для этого поставлены задачи отбора проб снега на Симферопольском водохранилище, определения концентрации загрязнителей в пробах, расчёта объёма поступивших в водохранилище талых вод на основе данных о площади снежного покрова и его водной составляющей.

Материал и методы. Материалом для таких оценок послужили результаты исследования снежного покрова и подлёдной воды Симферопольского водохранилища (26.02.2025 и 05.03.2025). Во время отбора проб снег на льду водохранилища был уплотнённым. Среднесуточная температура воздуха до отбора проб снега в течение недели в Симферополе, по данным Гидрометцентра Крыма, была меньше 0 °С, но днём воздух прогревался до +3 °С. Снег собирали с помощью предварительно очищенного водой с моющим средством и обмытого гексаном и ацетоном (1 : 1) металлического совка и помещали в предварительно подготовленные широкогорлые стеклянные банки объёмом 2,5 л. Пробы снега были собраны в шести точках. Взятые пробы снега растапливали в стационарной лаборатории при комнатной температуре в течение 12 ч и измеряли объём талой воды. Общий объём талой воды из 15 л снега составил 4,9 л.

ХОС в талой и подлёдной воде определяли в НОЦ ЦКП «Спектрометрия и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ на газовом хроматографе с микродетектором электронного захвата в соответствии с ПНД Ф 14.1:2:3:4.204-04 (2014 г.). В пробах измерены концентрации п,п'-ДДТ и его метаболитов п,п'-ДДЭ и п,п'-ДДД, шести индикаторных конгенов ПХБ (28, 52, 101, 138, 153 и 180) и диэтилгексилфталата (ДЭГФ). Погрешность определения составляла 28 %. Результаты выражены в $\text{нг} \cdot \text{л}^{-1}$.

Расчёт объёма поступивших в водохранилище талых вод провели на основе данных о площади и толщине снежного покрова. Для определения площади водохранилища, занятой снегом, были использованы данные космического спутника Европейского космического агентства Sentinel-2 с максимальным пространственным разрешением от $10 \text{ м} \cdot \text{пиксель}^{-1}$. Предварительно были отобраны космические снимки с минимальными значениями облачности к исследовательскому квадрату, в котором расположена акватория Симферопольского водохранилища. Были отобраны снимки, показывающие зеркало водохранилища до выпадения снега и промерзания водной толщи, а также снимки, показывающие наличие снежного покрова и позволяющие рассчитать его площадь. Для определения площади водного зеркала водохранилища (до выпадения снега) использовалась методика, описанная в работе [7] и основанная на расчёте вегетационного индекса NDVI (normalized difference vegetation index). Расчёт площади водохранилища, занятой снежным покровом, осуществлялся с применением индекса NDSI (normalized difference snow index), спектрального индекса, используемого в дистанционном зондировании для идентификации снежного покрова. Он основан на различии в отражении снега в видимом (зелёный диапазон) и коротковолновом инфракрасном (SWIR, short-wave infrared) спектрах: снег сильно отражает зелёный свет, но поглощает SWIR-излучение. NDSI определяется как отношение разницы между отражением в зелёном и SWIR-диапазонах к их сумме, что позволяет выделять снег на фоне других поверхностей, таких как облака или вода. Значения индекса изменяются от -1 до +1. В исследовании мы использовали каналы спутника Sentinel-2 с пространственным разрешением $20 \text{ м} \cdot \text{пиксель}^{-1}$. Расчёт NDSI проводили по следующей формуле:

$$NDSI = \frac{(Green - SWIR)}{(Green + SWIR)}, \quad (1)$$

где Green — отражение в зелёном диапазоне;

SWIR — отражение в коротковолновом инфракрасном диапазоне.

Формула NDSI для данных Sentinel-2 принимает следующий вид:

$$NDSI = \frac{(B3 - B11)}{(B3 + B11)}, \quad (2)$$

где B3 — отражение в зелёном диапазоне (канал 3, 560 нм, разрешение 20 м);

B11 — отражение в коротковолновом инфракрасном диапазоне (SWIR) (канал 11, 1610 нм, разрешение 20 м).

Расчёты выполнялись в программном комплексе ArcGIS 10.8. Высокие значения NDSI ($> 0,4$) соответствуют снежному покрову [6].

Для оценки границы снежного покрова на зеркале водохранилища анализировалась изначально площадь самого зеркала, так как её площадь не является постоянной [7]. На первоначальном этапе получен шейп-файл с границами водного зеркала на 20.01.2025 (ближайшая безоблачная дата съёмки); он в дальнейшем послужил маской для выделения внешней границы снежного покрова в пределах зеркала водохранилища. В результате исследования получены данные о площади Симферопольского водохранилища на 20.01.2025 и значения снежного покрова на 24.02.2025 и 01.03.2025 (максимально близкие даты съёмки спутника к датам полевых исследований).

Глубина снега, измеренная металлической линейкой, составляла в среднем 5 см. Для оценки объёма снега принимали условие, что толщина снежного покрова на площади водохранилища, занятая снегом, была одинаковой.

Результаты исследования и обсуждение. Расчёты показали, что площадь водного зеркала водохранилища на 20.01.2025 составила $2,33 \text{ км}^2$, а площадь снежного покрова на 24.02.2025 и 01.03.2025 — $1,6$ и $1,52 \text{ км}^2$ соответственно (рис. 1а, б).

На основании данных о площади и толщине снега был рассчитан объём снежного покрова на акватории Симферопольского водохранилища. При средней глубине снега 5 см общий объём снега составил 78 тыс. м^3 . С применением экспериментально определённого коэффициента водозапаса снега — $0,327$, полученного при анализе проб (15 л снега → 4,9 л воды), был рассчитан потенциальный объём талой воды. Значение составило $25\,506 \text{ м}^3$. Данный расчёт не учитывает потери на испарение, инфильтрацию и пространственную неоднородность плотности снежного покрова.

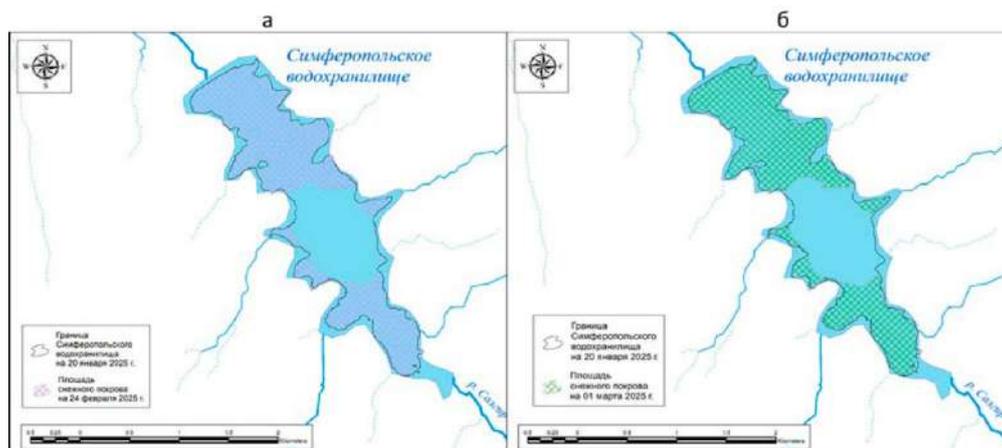


Рис. 1. Площадь водного зеркала (24.02.2025) и снежного покрова Симферопольского водохранилища:
а — 24.01.2025; б — 01.03.2025

При анализе талой воды были обнаружены все исследуемые соединения (табл. 1). Сумма концентрации ДДТ, ДДЭ и ДДД и шести конгенов ПХБ составляла $0,99$ и $3,77 \text{ нг} \cdot \text{л}^{-1}$ соответственно. В Российской Федерации содержание ХОС и фталатов в снеге не нормируется. В пресноводных водоёмах рыбохозяйственного назначения для $\Sigma\text{ДДТ}$ и $\Sigma\text{ПХБ}$ установлена ПДК ($10 \text{ нг} \cdot \text{л}^{-1}$), для фталатов — $8 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$ [5]. Концентрация $\Sigma\text{ДДТ}$, $\Sigma\text{ПХБ}$ и ДЭГФ в талой воде не превышала 10 , 73 и $1,4 \%$ от ПДК соответственно. В подлёдной воде водохранилища соединения триады ДДТ не обнаружены; сумма средних концентраций конгенов ПХБ была ниже в 7 раз, чем в снеге, а концентрация фталатов сопоставима с таковой для снега.

Была проведена оценка общего количества ПХБ и фталатов в воде Симферопольского водохранилища (табл. 1), объём воды которого, по сведениям на 08:00 18 февраля 2025 г., составил $22,1 \text{ млн м}^3$ (61 % наполнения) [1]. Она показала, что общая масса конгенов ПХБ была почти в 50 раз ниже массы ДЭГФ, которая, согласно оценкам, превышала $2,5 \text{ кг}$.

На основании рассчитанного объема талой воды и измеренных концентраций ХОС и ДЭГФ проведена оценка массы загрязняющих веществ, поступающих в водохранилище со снежным покровом водохранилища (табл. 1).

Таблица 1. Средняя концентрация ДДТ, ДДЭ, ДДД, шести индикаторных конгенов ПХБ и ДЭГФ в талой воде и подледной воде, общая масса веществ в Симферопольском водохранилище; потоки веществ, поступившие с талой водой в водохранилище

| Загрязнитель | Концентрация в подледной воде, $\text{нг}\cdot\text{л}^{-1}$ | Общая масса в объеме водохранилища, г | Концентрация в снеге (талой воде), $\text{нг}\cdot\text{л}^{-1}$ | Поступление с талой водой, г (% от общей массы) |
|--------------|--|---------------------------------------|--|---|
| п,п'-ДДЭ | н. о. | – | 0,37 | 0,009 |
| п,п'-ДДД | –" | – | 0,12 | 0,003 |
| п,п'-ДДТ | –" | – | 0,50 | 0,013 |
| ПХБ 28 | –" | – | 0,93 | 0,023 |
| ПХБ 52 | 0,58 | 13 | 0,51 | 0,013 (0,10) |
| ПХБ 101 | 1,02 | 22 | 1,34 | 0,034 (0,15) |
| ПХБ 153 | 0,26 | 6 | 1,66 | 0,007 (0,11) |
| ПХБ 138 | 0,33 | 7 | 1,71 | 0,008 (0,11) |
| ПХБ 180 | 0,40 | 9 | 1,17 | 0,010 (0,11) |
| ДЭГФ | 114,40 | 2519 | 111,85 | 2,857 (0,11) |

Полученные результаты показали незначительный вклад снежного покрова, лежащего непосредственно на льду водохранилища, в поступление загрязнителей в его воду, тем не менее не исключена потенциально важная роль атмосферного переноса загрязняющих веществ со всего водосборного бассейна. Согласно данным пентадных и маршрутных снегосъемок, на 15 февраля запасы воды в снежном покрове в бассейне выше Симферопольского водохранилища составляли 3,341–5,011 млн м^3 , что в 43–64 раза превышает объем снега непосредственно на акватории водохранилища (78 тыс. м^3). Если развить наше предположение о поступлении ХОС с атмосферными осадками, возможно заключить, что значительная часть ХОС, поступающих с атмосферными осадками, может аккумулироваться на водосборе. При таянии снега эти вещества будут поступать в водохранилище с поверхностным стоком, и общий вклад талых вод водосборного бассейна может оказаться существенным, несмотря на локально малые значения. Оценочные значения массы ПХБ и ДЭГФ в снеге в водосборном бассейне — 24–37 г и 380–571 г соответственно, что составляет в среднем 50 % от количества Σ ПХБ и 19 % от количества ДЭГФ в водохранилище. Эта оценка сверху должна уточняться при проведении дополнительных исследований доли талых вод, достигающих водохранилища, особенностей миграции анализируемых веществ (процессов их сорбции-десорбции) и многих других факторов.

Таким образом, хотя снежный покров непосредственно на акватории водохранилища не является значимым источником загрязнения, более масштабные атмосферные выпадения на водосборе могут играть существенную роль в общем балансе хлорорганических загрязнителей и ДЭГФ в водохранилище.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по темам № 124030100127-7 и 124030100030-0 и НИЦ ПСГ — филиала ФИЦ ИнБЮМ по теме № 123101900019-5.

Список использованных источников

1. Информация о сложившейся гидрометеорологической обстановке в бассейнах Крымских рек на конец февраля 2025 года // Федеральное государственное бюджетное учреждение «Крымское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды»: сайт. URL: <https://meteo-crimea.ru/?p=14914> [дата обращения: 26.08.2025].

2. Малахова Л. В., Карпова Е. П., Белогурова Р. Е., Губанов В. В., Прокопов Г. А., Чеснокова И. И., Куршаков С. В., Статкевич С. В., Шавриев Д. Г., Овечко С. В. Хлорорганические ксенобиотики в экосистеме реки Салгир: содержание, распределение, экологический риск // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. Вып. 4. С. 116–133. EDN: [LZDHFV](#)
3. Мамонтов А. А., Ермолаева Н. И., Мамонтова Е. А. Состав и концентрации ПХБ снегового покрова сибирских городов Иркутска и Новосибирска // Проблемы региональной экологии. 2022. № 2. С. 24–29. <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2022-2-24-29>. EDN: [KMMXOZ](#)
4. Мамонтова Е. А., Мамонтов А. А., Тарасова Е. Н. Эколого-гигиеническая оценка последствий загрязнения стойкими органическими соединениями промышленного города (на примере г. Усолье Сибирское). Сообщение 1: атмосферный воздух, снег, почва // Экологическая химия. 2016. Т. 25, № 2. С. 100–110. EDN: [VZYNQZ](#)
5. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: Приказ Минсельхоза РФ от 13.12.2016 № 552 (зарегистрировано в Минюсте РФ 13.01.2017 № 45203) // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102422934> [дата обращения: 26.08.2025].
6. Normalised Difference Snow Index, NDSI : электронный ресурс. URL: <https://sentinel-hub.github.io/custom-scripts/sentinel-2/ndsi/> [дата обращения: 15.03.2025].
7. Табунщик В. А. Изменение площади зеркал водохранилищ естественного стока на территории Крымского полуострова (сравнение данных на начало апреля 2019 и 2020 года) // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2020. Т. 6, № 4. С. 181–190. EDN: [MPKIZO](#)
8. Ходжер Т. В., Сороковикова Л. М. Оценка поступления растворимых веществ из атмосферы и с речным стоком в озеро Байкал // География и природные ресурсы. 2007. № 3. С. 185–191.
9. Dvorska A., Lammel G., Holoubek I. Recent trends of persistent organic pollutants in air in central Europe – air monitoring in combination with air mass trajectory statistics as a tool to study the effectivity of regional chemical policy // Atmospheric Environment. 2009. Vol. 43. P. 1280–1287. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.11.028>
10. Malakhova L. V., Mirzoeva N. Yu., Moseichenko I. N., Voitsekhovskaya V. V., Malakhova T. V., Ovechko S. V. Assessing of the spatiotemporal distribution of DDT, its metabolites, and caesium-137 in the bottom sediments of the Salgir River (Crimea) // Water Resources. 2024. Vol. 51, no. 6. P. 996–1006. <https://doi.org/10.1134/S0097807824701203>. EDN: [BPHAGL](#)

УДК 551.1/4:911.2

Развитие опасных геологических процессов в бассейне реки Сулак на Восточном Кавказе в связи с изменяющимися климатическими условиями

Мамаев С. А., Курбанисмаилова А. С., Сулейманова Ф. В., Мамаев А. С., Ахмедов А. С., Гусейнова А. Ш., Исаева Н. А.

Институт геологии ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия

✉ dangeogis@mail.ru

В работе приводится анализ инженерно-геологических особенностей горной части бассейна реки Сулак. Оценка состояния недр была проведена путём обобщения и анализа данных собственных изысканий, а также материалов сторонних геологических и других организаций, которые выполняют работы, связанные с изучением геологического строения, гидрогеологических условий и минеральных ресурсов территории Дагестана. Особенно можно отметить антропогенную деятельность в связи с изменяющимися климатическими явлениями и, соответственно, развивающейся туристической деятельностью.

Ключевые слова: инженерно-геологические особенности, ландшафт, река Сулак, региональный климат, экзогенные геологические процессы, оползни, сели, сейсмичность

Оценка современного состояния экзогенных геологических процессов (далее — ЭГП) проведена на основе обобщения и анализа данных об их региональной активности, которые были получены в результате инженерно-геологических обследований территорий в Горном Дагестане [1]. Бассейн реки Сулак расположен на горной и высокогорной территории Дагестана. В настоящее время управление природопользованием и регулирование природоохранных мероприятий приобретают межрегиональный характер. В современных условиях анализ изменения климата и мониторинг в пределах бассейна реки Сулак имеют огромное значение для Дагестана (рис. 1). Существующая государственная опорная наблюдательная сеть включает два типа технологических объектов — площадь инженерно-геологического обследования и участок детального наблюдения.

В пределах бассейна реки Сулак получили развитие различные генетические типы ЭГП: обвалы и осыпи, оползни, сели, подтопление и т. д. Это связано со сложным геологическим строением, сильно расчленённым рельефом, разнообразными климатическими условиями и высокой техногенной нагрузкой на геологическую среду.

Факторами активизации экзогенных процессов являются гидрометеорологические, сейсмические, литологические, гидрогеологические, геоморфологические, техногенные и др. Напрямую активность ЭГП зависит от таких быстро изменяющихся факторов, как **гидрометеорологические условия, сейсмические события и техногенный фактор**. Кратко охарактеризуем их для бассейна реки Сулак.

Гидрометеорологические условия. Основные особенности климата в 2024 г. в пределах Дагестана приводятся по данным Росгидромета [2]. Для примера возьмём метеоданные для Гунибского района, который находится в центре бассейна реки Сулак. Для большей части территории Дагестана, в том числе для исследуемого района, **2024 г.** был аномально тёплым. Отличительными особенностями зимнего периода стали малое количество осадков в декабре 2023 г. и январе 2024 г., а также незначительное превышение нормы осадков в феврале. При этом температуры воздуха были выше нормы в течение всего зимнего периода.

Весна. Март оказался теплее нормы, и аномалии температуры воздуха на территории составили от +3 до +6 °С. Сумма осадков была выше или несколько выше нормы. На протяжении всего апреля происходило чередование тепла и холода: в первую декаду и частично в третью наступал холод, а во вторую — тепло. В начале и середине апреля установилась тёплая погода с осадками, а в конце



Рис. 1. Физическая карта горной части Дагестана и сопредельных районов

месяца — тёплая, почти летняя погода, с новыми максимумами температуры воздуха. Май на горной территории оказался аномально тёплым и дождливым.

Лето. В июне и июле в горах температура воздуха была выше нормы, аномалии превысили 5–6 °С. Осадков выпало больше нормы. В июле температура воздуха была в пределах нормы; количество осадков на равнинной территории было менее половины нормы. В августе температура воздуха была выше нормы, и регистрировались новые рекорды суточных максимумов. Аномалии среднедекадных температур воздуха превысили 5–6 °С, а среднемесячных — 2–3 °С. Осадков в августе выпало больше нормы, в ряде районов Республики Дагестан дожди шли в течение всего августа.

Осень. В сентябре температурные условия на территории в среднем за месяц оказались близкими к норме. Количество осадков превысило норму, причём местами в 2–3 раза и более. В первых двух декадах октября температура воздуха была в пределах нормы; в третьей декаде на территорию Кавказа обрушилось резкое похолодание, которое привело к значительному отставанию средней суточной температуры от нормы, отрицательные аномалии достигли 7–8 °С. Обновилось много рекордов минимальной температуры, в том числе абсолютных минимумов месяца. В ноябре температура воздуха была в пределах нормы или ниже её в отдельных районах округа. Сумма осадков в целом по округу в ноябре была в пределах нормы, в отдельных регионах — выше нормы.

Начало **2025 г.** было тёплым для большей части территории России, в частности для Северо-Кавказского федерального округа (СКФО) и Дагестана.

Зима. Во многих районах округа было тепло во все месяцы сезона, особенно в феврале. Регионально осреднённые по СКФО аномалии температуры воздуха в зимние месяцы составили от 1,41 °С в декабре и 1,61 °С январе до 2,42 °С в феврале. Количество осадков зимой на большей территории округа было ниже нормы. Регионально осреднённые значения — 90 % от нормы, в феврале — 99 % от нормы.

Весна. Сезон на территории СКФО был тёплым. Превышение нормы температуры воздуха отмечалось в марте, а в апреле температура воздуха была несколько ниже нормы. Количество осадков весной находилось в пределах нормы в равнинных частях Дагестана и превышало норму на 20–40 % в предгорной и горной частях округа. При этом наибольшее количество осадков выпало в марте.

Сейсмическая активность. Северный Кавказ — один из наиболее сейсмоактивных регионов России. Здесь возможны катастрофические землетрясения с магнитудой 8 и более. Сейсмотектоника Северного Кавказа определяется коллизионным типом геодинамического режима и обусловлена

современной историей развития всего Кавказского региона с его альпийской складчатостью, которая сформировалась в обстановке общего субмеридионального сжатия в результате продолжающегося сближения Скифской и Аравийской плит [3].

На территории округа выделяются несколько зон возникновения очагов землетрясений с разным уровнем сейсмического потенциала. В целом наблюдается увеличение значений магнитуды землетрясений (M) в направлении с севера на юг, от предкавказских прогибов региона Скифская плита (M известных землетрясений не превышала 5,0–6,0) к подвижной системе мегантиклинория Большого Кавказа (M известных землетрясений не превышала 6,0–7,2). Наиболее сейсмоактивной является восточная часть мегантиклинория Большого Кавказа — территория Республики Дагестан, Чеченской Республики и Республики Ингушетия ($M = 5,7 \div 6,6$).

Сейсмическая активность (A_{10}) является одним из основных параметров, характеризующих сейсмический режим территории. Под сейсмической активностью в некоторой точке понимается число очагов землетрясений в заданном диапазоне энергетического класса, которые возникают в окрестности этой точки в единице пространства в единицу времени [3].

Построена карта активности A_{10} . На карте активности (рис. 2) видно, что самыми активными зонами являются Сунженский хребет и хребты Даргендук и Планивук в западной части Дагестана; хребет Салатау и Андийский хребет — в центральной части; Каспийское море и его прибрежная зона — на востоке; Главный Водораздельный и Самурский хребты — на юге. В этих зонах произошли события всех энергетических классов [3].

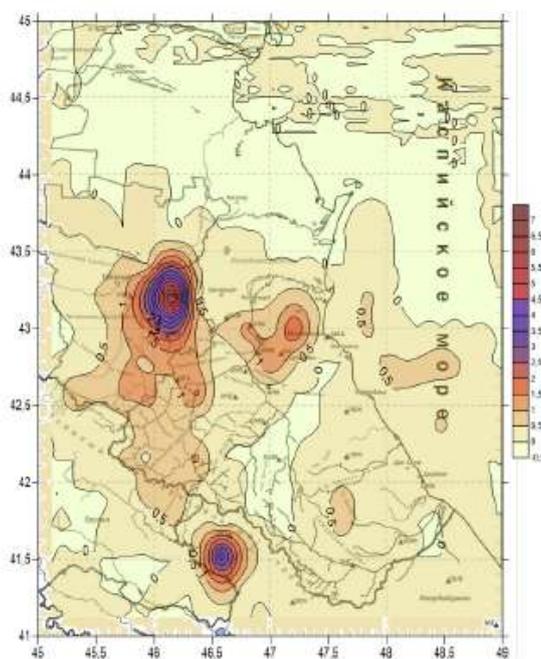


Рис. 2. Карта активности A_{10} для территории Дагестана и приграничных районов за 2007–2024 гг.

Очаги землетрясений на Северном Кавказе приурочены в основном к глубинам 5–40 км. Чем ближе к поверхности земли расположен гипоцентр и чем выше магнитуда, тем более разрушительными являются сейсмособытия. В целом для Кавказского региона сильными считаются землетрясения с $M \geq 5,5$.

Техногенный фактор. В последние годы на территории, характеризующейся сложными инженерно-геологическими условиями, возросла роль техногенного фактора в активизации опасных ЭГП, особенно в горной части округа. Её современное экономическое развитие как центра туризма всероссийского и международного значения, сопровождающееся строительством курортно-рекреационных объектов, в частности строительством обширной транспортной инфраструктуры (дорог и тоннелей), реконструкцией существующих горных дорог, а также строительством

гидроэлектростанций, газопроводов, водоводов и ЛЭП, создаёт высокую техногенную нагрузку на геологическую среду. В совокупности с природными факторами это способствует активизации ЭГП гравитационного ряда.

В техногенный фактор входят: подрезка склонов различными выемками и выработками, снижающими устойчивость грунтов; пригрузка неустойчивых склонов отвалами и строительным мусором; нарушение условий поверхностного и подземного стока вод, что приводит к избыточному обводнению склонов и переувлажнению грунтов.

Техногенный фактор является причиной активизации ЭГП, чаще всего — в сочетании с метео-фактором, который в этих случаях становится триггерным.

Региональная активность экзогенных геологических процессов. Оценка региональной активности ЭГП, развитых на территории СКФО, приводится на основе обобщения и анализа результатов инженерно-геологических обследований и наблюдений, полученных при мониторинге исследуемого бассейна. Также были привлечены данные других организаций, которые выполняют работы, связанные с мониторингом окружающей среды [4–9]. В 2024–2025 гг. в пределах большей части территории СКФО зафиксирована средняя активность ЭГП.

Оползневые процессы. Оползневый процесс является одним из наиболее распространённых на рассматриваемой территории. Его проявления распространены в высокогорном, среднегорном и предгорном Дагестане, и их суммарная площадь, по данным государственного мониторинга состояния недр, превышает 6 тыс. км² [1]. Активность оползневых процессов в 2024–2025 гг. на большей части территории СКФО в целом охарактеризована как средняя.

На территории бассейна реки Сулак в 2024 г. выявлено 30 активных оползневых массивов, площадь поражения составила 8,46 км². Самая высокая активность оползневых процессов отмечена в Ахвахском, Гунибском, Казбековском, Тлярятинском, Цумадинском и Шамильском районах.

В результате активизации оползневых процессов зарегистрированы разрушения и деформации в 10 населённых пунктах. В зоне воздействия оказались 15 хозяйственных объектов. Деформированы полотна автодорог, линии газопроводов и водоводов, ЛЭП, пострадали земли сельхозугодий (рис. 3).

В целом по Республике Дагестан в 2024 г. активизация зафиксирована в июле и августе. Наиболее крупные по объёму и площади распространения оползни зарегистрированы в пределах автодороги Анцух — Тлярата Тлярятинского района (объём оползневых масс 230,4 тыс. м³). В настоящее время в Республике Дагестан возведены и эксплуатируются 7 крупных гидроэлектростанций: Чирюртовская, Миатлинская и Чиркейская на реке Сулак, Гергубельская и Гунибская на реке Каракойсу, Ирганайская и Гоцатлинская на реке Аварское Койсу. В пределах гидроэнергетических объектов отмечена активизация 12 оползневых массивов, в том числе в активном режиме продолжается развитие Миатлинского оползня (объёмом около 25 млн м³) в правом примыкании арочной плотины Миатлинской ГЭС.



Рис. 3. Деформация полотна автодороги Махачкала — Леваша в результате активизации оползневых процессов

Основным фактором, способствующим высокой активности опасных ЭГП на исследуемой территории, стало выпадение аномального количества атмосферных осадков в весенне-летний процессоопасный сезон. Несмотря на большую роль техногенного фактора в активизации опасных ЭГП, метеорологический фактор остаётся ключевым. В большинстве случаев именно интенсивность и форма выпадения осадков определяли масштаб активизации опасных ЭГП.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Российской Федерации в лице Минобрнауки России — гранта в форме субсидий на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технического развития (соглашение № 075-15-2024-644).

Список использованных источников

1. Шамурзаева Д. А., Новиков К. В., Королев Б. И. Оценка подверженности оползневым процессам горной части Республики Дагестан, выполненная на основе применения комплексного математического аппарата // Инженерная геология. 2017. № 4. С. 40–48. <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2017-4-40-48>
2. Прогноз погоды в Гунибе на июнь 2024 года // Погода Mail.ru : сайт. URL : <https://pogoda.mail.ru/prognoz/gunib/june-2024/> [дата обращения: 26.08.2025].
3. Исаев М. А. Сейсмичность Дагестана и приграничных районов за период 2007–2013 гг. // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2024. № 3 (98). С. 49–55. EDN: [WONZWR](#)
4. Тагиров Б. Д., Руденко С. П., Рожнецов В. П. и др. Отчёт о работах по изучению условий развития и режима активизации экзогенных геологических процессов на территории горной части ДАССР за 1979–1984 гг. Махачкала, 1984. 572 с. (ФГБУ «Росгеолфонд»).
5. Черкашин В. И., Заалишвили В. Б., Мамаев С. А., Атаев З. В., Ибаев Ж. Г., Сулейманов В. К. Геоэкологическое состояние верховьев бассейна реки Аварское Койсу // Геология и геофизика Юга России. 2024. Т. 14, № 4. С. 100–112. <https://doi.org/10.46698/VNC.2024.77.35.009>
6. Сулейманов В. К., Мамаев С. А., Идрисов И. А., Атаев З. В., Черкашин В. И. Особенности инженерно-геологических условий на участках для строительства у северной окраины селения Дылым // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2024. № 2 (97). С. 38–45. EDN: [PWWC MF](#)
7. Идрисов И. А., Мамаев С. А., Юсупов А. Р., Магомедов Р. А. Оползневые процессы в Дагестане в 21 веке // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2015. № 64. С. 155–159. EDN: [VBQCUT](#)
8. Мамаев С. А., Ибаев Ж. Г. Моделирование в геологии на основе картографирования // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2008. № 52. С. 159–162. EDN: [PXMZVN](#)
9. Mamaev S. A., Balamirzoev M. A., Zalibekova M. Z. Features of soil cartography in conditions of an arid climatic regime // Arid Ecosystems. 2015. Vol. 5, iss. 1. P. 14–17. <https://doi.org/10.1134/S2079096115010072>

УДК 504.054(470.66)"2019/2024"

Динамика значений комплексного индекса загрязнения атмосферы в бассейне реки Сунжа в 2019–2024 гг.

Никифорова А. А., Табунщик В. А.

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», Севастополь, Россия

✉ nikiforova_a@ibss-ras.ru

Исследование направлено на анализ динамики комплексного индекса загрязнения атмосферы (КИЗА) в бассейне реки Сунжа за 2019–2024 гг. с использованием данных спутника Sentinel-5P. Используются данные дистанционного зондирования со спутника Sentinel-5P, позволяющие оценить содержание диоксида азота, диоксида серы, метана, формальдегид, озон, монооксид углерода в столбе атмосферы. Для расчёта КИЗА применена модифицированная методика, учитывающая совместное воздействие различных загрязняющих веществ и их класс опасности. Получены ежегодные карты, отражающие пространственное распределение КИЗА, а также общая карта за весь период исследования. Представлены статистические данные, характеризующие изменение среднего, медианного, минимального и максимального значений КИЗА, а также амплитуды его колебаний в бассейне реки Сунжа. Результаты демонстрируют относительную стабильность уровня загрязнения атмосферы в бассейне реки Сунжа в исследуемый период, с незначительными изменениями как в пространственном распределении, так и в статистических показателях.

Ключевые слова: загрязнение, Сунжа, ГИС, расчёты, КИЗА

Изучение загрязнения воздуха в последние годы является чрезвычайно актуальной задачей [1, 2], что объясняется широким набором последствий, которые оно оказывает на различные стороны хозяйственной деятельности и социально-экономического развития общества [3, 4]. С помощью анализа пространственно-временной дифференциации полей загрязняющих веществ можно определить состояние распределения загрязнения воздуха и получить базовые данные для рационального природопользования [5].

Реки и водные бассейны играют важнейшую роль в жизни человека. Бассейн реки Сунжа является главной водной артерией Чеченской Республики [6] и Республики Ингушетия [7]. Это приток первого порядка бассейна реки Терек, впадающий в неё в 177 км от её устья [8]. Водосборный бассейн реки Сунжа (рис. 1), по данным цифровой модели рельефа SRTM 30m, имеет площадь 12 130,7 км² и периметр 583,8 км, с выраженной асимметрией формы (коэффициент округлости 1,50; параметр формы 3,2; коэффициент формы 0,31). Бассейн характеризуется значительным перепадом высот — от 27 до 4464 м — при средней высоте 1037,3 м, что обуславливает резко расчленённый рельеф с максимальным наклоном поверхности 79,1° и средним наклоном 13°. Гидрографическая сеть включает основной водоток длиной 197,9 км; при этом длина речного бассейна составляет 133,2 км при средней ширине 91,1 км. Средний уклон бассейна (9,4 м·км⁻¹) и значительная изрезанность водораздельной линии отражают высокую динамику стокоформирования, типичную для горных систем Кавказа, что определяет интенсивные процессы эрозии и специфику водного режима реки [9].

В последние годы активно развиваются исследования загрязнения воздуха [10–12] с использованием данных космического спутника Sentinel-5P в разных регионах мира. Не является исключением и применение его данных для оценки загрязнения атмосферного воздуха в речных бассейнах [13–17].

Цель исследования — провести анализ изменения показателя комплексного индекса загрязнения атмосферы (далее — КИЗА) в бассейне реки Сунжа с 2018 по 2024 г. с использованием данных космического спутника Sentinel-5P (рис. 1). Для получения данных о загрязнении воздуха использовались данные космического спутника Sentinel-5P, позволяющие получить поля пространственного распределения диоксида азота, диоксида серы, метана, формальдегида, озона и монооксида углерода. Методика подробно описана в работах [13–15]. Для получения растровых значений использована платформа Google Earth Engine, а расчёты и визуализация итоговых данных выполнены с применением программного комплекса ArcGIS.

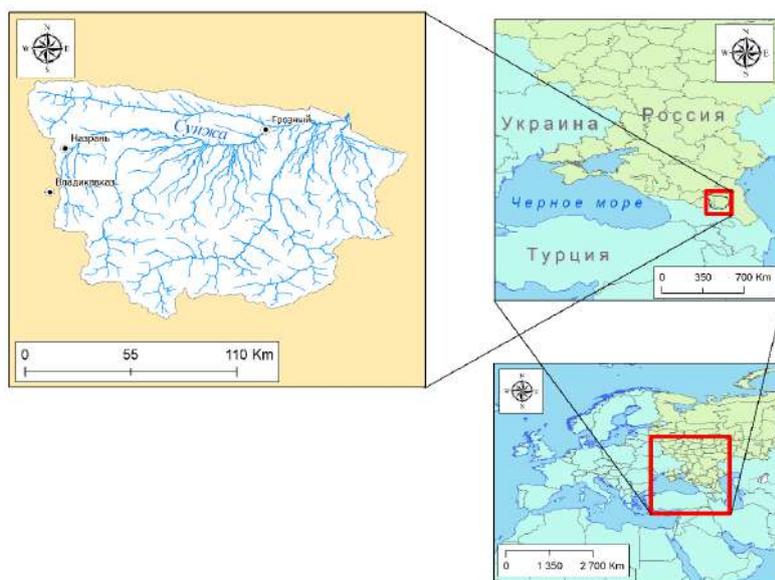


Рис. 1. Водосборный бассейн реки Сунжа

Для учёта совместного воздействия всех загрязнителей используется модифицированный показатель комплексного индекса загрязнения атмосферы (КИЗА) [18], рассчитываемый по формуле:

$$КИЗА = \left(\sum_{i=1}^n \frac{q_i}{F_i} \right)^c, \quad (3)$$

где i — примесь;

q_i — среднегодовая концентрация примеси;

F_i — соответствующая среднесуточная предельно допустимая концентрация;

c — константа, принимающая одно из значений [$c = 1,7$ (I класс опасности вещества загрязнителя); $c = 1,3$ (II класс); $c = 1,0$ (III класс); $c = 0,9$ (IV класс)];

n — число примесей [18].

В дальнейшем мы исходили из того, что уровень загрязнения территории считается низким при КИЗА менее 5, повышенным при КИЗА от 5 до 7, высоким при КИЗА от 7 до 13 и очень высоким при КИЗА, равном 14 или превышающим это значение.

В результате исследования получены серии ежегодных карт, отражающие пространственно-временную изменчивость значения КИЗА в бассейне реки Сунжа, а также итоговая карта значений КИЗА за период с 2019 по 2024 г. (рис. 2–4). В связи с неполным охватом данных отдельных загрязнителей расчёт значений КИЗА за 2018 г. не производился.

За период 2019–2024 гг. (рис. 2) значения КИЗА варьируют в диапазоне 1,91–9, демонстрируя значительную пространственную неоднородность. Наименьшие показатели (1,91–2), соответствующие относительно благополучной экологической обстановке, наблюдаются в сельских и высокогорных районах (например, окрестности Ботлиха и Степанцминды). Умеренное загрязнение (4,01–5) характерно для зон с развитым сельским хозяйством (Наурская и Надтеречное), тогда как максимум (7,01–9) зафиксирован в промышленных, урбанизированных кластерах (Гудермес, Аргун и Грозный), что связано с выбросами от транспорта и предприятий ТЭК, а также с плотной застройкой. Динамика КИЗА отражает зависимость качества атмосферного воздуха от антропогенной нагрузки; индекс характеризуется устойчиво повышенными значениями вдоль транспортных коридоров и нефтеперерабатывающих объектов.

В то же время нужно отметить (рис. 3, 4), что низкими значениями КИЗА (менее 5) характеризуется большая часть территории бассейна реки Сунжа, расположенная на юге бассейна и в его верховьях; повышенными значениями (от 5 до 7) — северная часть бассейна, районы, в которых сосредоточены

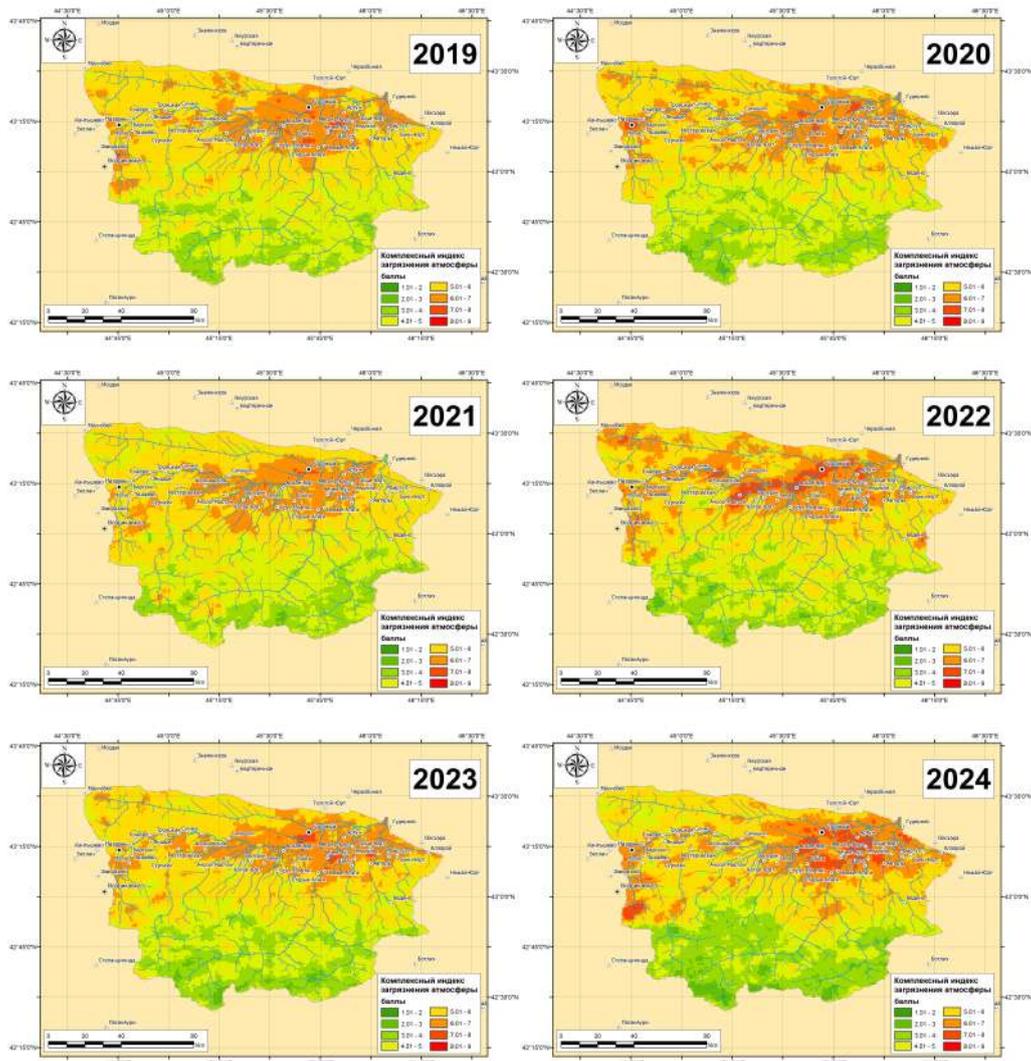


Рис. 2. Ежегодные значения комплексного индекса загрязнения атмосферы в бассейне реки Сунжа

основные поселения и производства; высокими значениями (более 7) — район наиболее крупных населённых пунктов.

В табл. 1 представлены значения КИЗА в бассейне реки Сунжа.

Таблица 1. Значения комплексного индекса загрязнения атмосферы (КИЗА) в бассейне реки Сунжа

| Значение КИЗА | 2019 г. | 2020 г. | 2021 г. | 2022 г. | 2023 г. | 2024 г. | 2019–2024 гг. |
|---------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------------|
| Среднее | 5,22 | 5,20 | 5,17 | 5,28 | 5,13 | 5,14 | 5,19 |
| Медиана | 5,33 | 5,41 | 5,26 | 5,39 | 5,26 | 5,33 | 5,37 |
| Минимальное | 2,87 | 2,46 | 2,40 | 2,17 | 2,20 | 1,90 | 3,04 |
| Максимальное | 7,49 | 7,59 | 7,25 | 8,07 | 7,86 | 8,10 | 7,19 |
| Амплитуда | 4,62 | 5,12 | 4,85 | 5,90 | 5,66 | 6,20 | 4,15 |

Как видно из табл. 1, среднее значение КИЗА, колеблясь от 5,13 до 5,28, не показывает значительных изменений год от года. Аналогичная ситуация наблюдается в медианных значениях, находящихся в диапазоне от 5,26 до 5,41. Минимальные значения КИЗА постепенно снижаются с 2,87 в 2019 г. до 1,90 в 2024 г., что указывает на то, что в отдельных точках бассейна реки наблюдается некоторое улучшение качества воздуха. В то же время максимальные значения

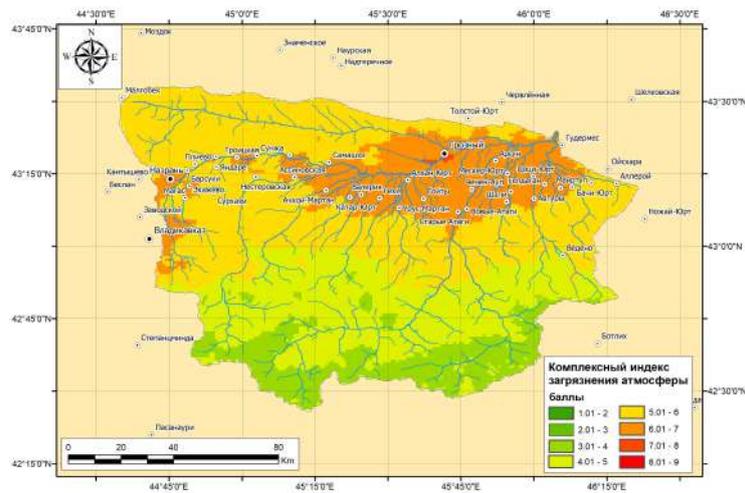


Рис. 3. Значения комплексного индекса загрязнения атмосферы за период с 2019 по 2024 г. в бассейне реки Сунжа (баллы)

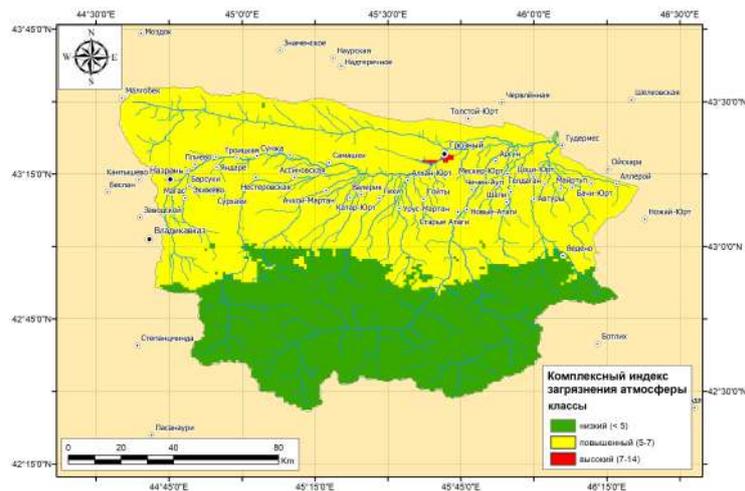


Рис. 4. Значения комплексного индекса загрязнения атмосферы за период с 2019 по 2024 г. в бассейне реки Сунжа (классы)

демонстрируют тенденцию к увеличению, достигая 8,10 в 2024 г., что может свидетельствовать о локальных выбросах и об ухудшении качества воздуха на определённых участках территории. КИЗА в бассейне реки Сунжа в период с 2019 по 2024 г. характеризовался следующими значениями: среднее — 5,19; медианное — 5,37. Наименьшее зафиксированное значение составило 3,04, а наибольшее — 7,19. Разница между максимальным и минимальным значениями КИЗА, или амплитуда, составила 4,15.

Результаты демонстрируют относительную стабильность уровня загрязнения атмосферы в бассейне реки Сунжа в исследуемый период, с незначительными изменениями как в пространственном распределении, так и в статистических показателях.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Российской Федерации в лице Минобрнауки России — гранта в форме субсидий на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технического развития (соглашение № 075-15-2024-644).

Список использованных источников

1. Liao K., Huang X., Dang H., Ren Y., Zuo S., Duan C. Statistical approaches for forecasting primary air pollutants: A review // *Atmosphere*. 2021. Vol. 12, iss. 6. Art. no. 686 (19 p.). <https://doi.org/10.3390/atmos12060686>. EDN: EAUWOI
2. Seinfeld J. H. Air pollution: A half century of progress // *Aiche Journal*. 2004. Vol. 50, iss. 6. P. 1096–1108. <https://doi.org/10.1002/aic.10102>
3. Sivarethinamohan R., Sujatha S., Priya S., Gafoor A., Rahman Z. Impact of air pollution in health and socio-economic aspects: Review on future approach // *Materials Today Proceedings*. 2021. Vol. 37, part 2. P. 2725–2729. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.540> EDN: ZZDVQD
4. Zhu G., Wang X., Yang T., Su J., Qin Y., Wang S., Gillings M., Wang C., Ju F., Lan B., Liu C., Li H., Long X.-E., Wang X., Jetten M. S. M., Wang Z., Zhu Y.-G. Air pollution could drive global dissemination of antibiotic resistance genes // *The ISME Journal*. 2021. Vol. 15, iss. 1. P. 270–281. <https://doi.org/10.1038/s41396-020-00780-2> EDN: QPINTY
5. Hu M., Wang Y., Wang S., Jiao M., Huang G., Xia B. Spatial-temporal heterogeneity of air pollution and its relationship with meteorological factors in the Pearl River Delta, China // *Atmospheric Environment*. 2021. Vol. 254. Art. no. 118415 (14 p.). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118415>
6. Масаева Л. М., Дзержинская И. С., Курапов А. А. Современное состояние планктона реки Сунжа // *Естественные науки*. 2008. № 4 (25). С. 24–26. EDN: KUYYYFL
7. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Республики Ингушетия в 2018 году». Магас, 2019. 148 с.
8. Гелагаев А. Ш., Ордухаева З. Ш., Белакаев С. С. Динамика изменчивости стока наносов бассейна реки Сунжа (Чеченская Республика) // *Миллионщиков-2024: материалы VII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных с международным участием (в рамках реализации программы развития передовой инженерной школы «РосГеоТех»)*, Грозный, 30 мая 2024 г. Грозный : Грозненский государственный нефтяной технический университет имени М. Д. Миллионщикова, 2024. С. 193–199. EDN: JEDRRR
9. Tabunshchik V., Dzhambetova P., Gorbunov R., Gorbunova T., Nikiforova A., Drygval P., Kerimov I., Kiseleva M. Delineation and morphometric characterization of small- and medium-sized Caspian Sea basin river catchments using remote sensing and GISs // *Water*. 2025. Vol. 17, iss. 5. Art. no. 679 (47 p.). <https://doi.org/10.3390/w17050679>. EDN: VBOVOQ
10. Морозова А. Э., Сизов О. С., Миронова М. А. Дистанционная оценка качества атмосферного воздуха в пределах крупнейших месторождений нефти и газа России (2019–2023) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2025. Т. 22, № 1. С. 285–300. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-1-285-300>. EDN: WREZFP
11. Шлендер Т. В., Ярош Е. А., Бируков М. В. Оценка атмосферного загрязнения городов Беларуси по данным спутника SENTINEL-5P // *Материалы I Белорусского географического конгресса: материалы конгресса к 90-летию факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета и 70-летию Белорусского географического общества*. В 7 ч., Минск, 08–13 апреля 2024 г. Минск : Белорусский государственный университет, 2024. С. 428–433. EDN: YVJRQM
12. Гусев А. П. Потoki метана в тропосфере: геологические и антропогенные источники (по данным Sentinel-5P TROPOMI) // *Региональные геосистемы*. 2023. Т. 47, № 4. С. 580–592. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-4-580-592>. EDN: XKYZTS

13. Tabunshchik V., Nikiforova A., Lineva N., Drygval P., Gorbunov R., Gorbunova T., Kerimov I., Pham C. N., Bratanov N., Kiseleva M. The dynamics of air pollution in the southwestern part of the Caspian Sea basin (based on the analysis of Sentinel-5 satellite data utilizing the Google Earth Engine cloud-computing platform) // *Atmosphere*. 2024. Vol. 15, iss. 11. Art. no. 1371 (34 p.). <https://doi.org/10.3390/atmos15111371>. EDN: [UZQGLZ](#)
14. Tabunshchik V., Gorbunov R., Gorbunova T. Unveiling air pollution in Crimean mountain rivers: Analysis of Sentinel-5 satellite images using Google Earth Engine (GEE) // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, iss. 13. Art. no. 3364 (25 p.). <https://doi.org/10.3390/rs15133364>. EDN: [SMVJGH](#)
15. Tabunshchik V., Gorbunov R., Bratanov N., Gorbunova T., Mirzoeva N., Voytsekhovskaya V. Fataha River basin (Republic of Guinea, Africa): Analysis of current state, air pollution, and anthropogenic impact using geoinformatics methods and remote sensing data // *Sustainability*. 2023. Vol. 15, iss. 22. Art. no. 15798 (29 p.). <https://doi.org/10.3390/su152215798>. EDN: [PXIVCX](#)
16. Табунщик В. А., Никифорова А. А., Линёва Н. П., Дрыгваль П. В., Горбунов Р. В., Горбунова Т. Ю., Фам К. Н., Керимов И. А., Братанов Н. С., Киселева М. В. Пространственно-временная изменчивость поля содержания диоксида азота в юго-западной части водосборного бассейна Каспийского моря // *Геоэкологическая оценка бассейнов горных рек: теоретико-методологические и методические аспекты, региональные исследования: материалы докл. I Междунар. науч. конф., 25 октября 2024 г., Севастополь, Россия. Севастополь: ФИЦ ИнБЮМ, 2024. С. 74–77. EDN: [MMECSX](#)*
17. Никифорова А. А., Табунщик В. А., Горбунов Р. В., Горбунова Т. Ю. Оценка загрязнения атмосферного воздуха в бассейне реки Эль-Аси (Оронт) // *Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа: материалы XIV Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. уч., Махачкала, 18–20 сентября 2024 г. Москва: ИИЕТ РАН, 2024. Т. 14. С. 501–506. EDN: [EYFSBC](#)*
18. Табунщик В. А., Горбунов Р. В. Оценка геоэкологического состояния бассейнов рек северо-западного склона Крымских гор. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2025. 224 с. EDN: [SAECPM](#)

УДК 556.3

Геоэкологическое состояние поверхностных источников в бассейнах рек Горного Крыма

Петренко А. Е.

Филиал МГУ в городе Севастополе, Севастополь, Россия

✉ shura.petrenko.2004@mail.ru

Проведены геолого-гидрогеологические исследования и анализ антропогенного воздействия на поверхностные источники в бассейнах рек Горного Крыма. Измерены основные индикаторы антропогенного загрязнения родниковых вод, которые включают соединения азота (аммиак, нитриты и нитраты) и фосфора (фосфаты). В ходе исследований установлено, что родники, которые тяготеют к крупным поселениям, испытывают более серьезную антропогенную нагрузку, чем родники, располагающиеся в отдаленных горных районах Крыма. На основании полученных данных создана интерактивная карта родников, записана серия видеороликов об их экологическом состоянии для видеоплатформы YouTube и разработан сайт «Родники Республики Крым и города Севастополя».

Ключевые слова: родники, экологическое состояние источников, речной бассейн

В мире наблюдается тенденция сокращения ресурсов пресных вод и ухудшения их качества из-за роста антропогенной нагрузки на водоносные горизонты. Сейчас проблеме чистой питьевой воды уделяется особое внимание во всех странах мира. В Крыму в настоящий момент эта проблема обострилась в связи с перебоями работы Северо-Крымского канала и с увеличением туристического потока на крымских курортах.

В засушливые периоды, которые повторяются на полуострове каждые 3–5 лет, в системе подачи воды наблюдается сбой, и тогда в течение непродолжительного времени родники становятся основными источниками воды для значительной части населения. В Крыму в последние годы возродился пешеходный туризм, и на своих маршрутах туристы в основном пользуются водой из поверхностных источников. В то же время остро стоит проблема отсутствия каких-либо данных о качественном составе воды и об экологическом состоянии поверхностных источников. При этом очень важно изучать экологическое состояние таких источников, так как они являются истоками для многих рек Горного Крыма. С учётом вышесказанного оценка экологического состояния поверхностных источников Горного Крыма является в настоящий момент актуальной задачей.

Целью работы стало исследование геоэкологического состояния поверхностных родников в пределах бассейнов горных рек Крыма и территории вокруг них. В задачи входило изучение химического состава воды, выяснение её качества в зависимости от экологической обстановки источников, а также составление гидрогеологических паспортов родников и интерактивной карты состояния и расположения поверхностных источников.

Гидрогеология района исследования. Юго-западная часть Крыма включает три подрайона — северо-западную часть Главной гряды, моноклиналиные предгорья и Гераклеийский полуостров. Главная гряда сложена триасовыми и юрскими породами. Верхнетриасовые, нижнеюрские и среднеюрские сланцы слагают основание Главной гряды. Они почти безводны, источники в них встречаются очень редко. Вода в них циркулирует по трещинам в поверхностных частях и в элювиально-делювиальном покрове над ними. Породы триаса и нижней и средней юры служат водоупорным горизонтом для налегающих на них верхнеюрских пород. Главную роль в Главной гряде Крымских гор играют карстовые воды в известняках верхней юры. Особенностью поверхностных источников Горного Крыма является резкое колебание расхода воды в зависимости от времени года. Верхнеюрские известняки — основные коллекторы вод. Они сильно трещиноватые и интенсивно закарстованные. В толще известняков преобладают вертикальные движения вод, которые сменяются на горизонтальные вблизи пород водоупоров. Поверхностные источники встречаются в известняках вблизи

их контактов со сланцами. Местами они попадают в делювий, и, пройдя в нём некоторое расстояние, воды выходят на дневную поверхность. В районе Главной гряды известно более 2 тыс. источников. Значительная их часть пересыхает в летний период.

Подрайон моноклинальных предгорий сложен меловыми и палеогенными породами. Подземный сток контролируется прослоями мергелей и глин, а также подстилающими их в некоторых местах сланцами. Часто подпитка подземных вод осуществляется из верхнеюрских известняков. Подземные воды циркулируют в песчаниках, конгломератах и известняках валанжина, готерива и баррема. С выходами этих пород на поверхность связаны основные родники и колодцы.

В Гераклейском подрайоне подземные воды встречаются в породах сарматского яруса и среднего миоцена. Воды выходят на дневную поверхность в балках и береговых обрывах. Водоносными породами являются многочисленные прослои известняков. Водоупорными породами служат глины нижнего сармата, кора выветривания юрских изверженных пород и мергели верхнего мела. Вода пресная, но некоторые источники вблизи моря характеризуются повышенной минерализацией [3].

Методы проведения исследований. В 2023–2025 гг. выполнены гидрогеологические обследования поверхностных источников Горного Крыма. Проведён комплекс измерений химических и физических параметров воды. По полученным результатам составлены гидрогеологические паспорта родников. Местоположение уточняли с помощью приложения «Яндекс.Карты».

В ходе полевых исследований измерялись следующие показатели: дебит, температура воды, температура воздуха, минерализация, органолептические показатели (вкус и запах), концентрация нитратов и фосфатов (тест-системами NILPA Home). Пробы воды отбирались в бутылки объёмом 1 л. Гидрохимические исследования проводились в день отбора пробы.

Дебиты источников измерялись объёмным методом, используя мерный цилиндр на 500 мл с ценой деления 5 мл. Измерения проводили три раза, после рассчитали средние значения. Температура воды определялась с помощью термометра ТМ-10 № 2 с погрешностью $\pm 0,2$ °С. Принцип его работы основан на измерении электропроводности воды, которая связана с минерализацией. Замеры содержания проводились в течение 2 мин.

Отдельные пробы из родников были проанализированы в лабораториях государственного автономного учреждения Республики Крым «Центр лабораторного анализа и технических измерений» (ГАУ РК ЦЛАТИ) и «Фильтр92» на водородный показатель, общую и карбонатную жёсткость, концентрацию нитратов, нитритов, аммония и фосфатов, общее железо, общую медь и перманганатную окисляемость. Для исследований химического состава воды использовался набор капельных тестов NILPA Home и тест-системы «Крисмас+» и Ecvolts.

Для изучения зависимости изменения дебита родников от температуры и выпадающих осадков автором были обработаны материалы измерений по источнику Бабу-Корыто. Эти данные предоставлены Викторией Федоренко, сотрудником ГАУ РК ЦЛАТИ. Информация о температуре и осадках за 2021–2024 гг. взята с сайта «Погода и Климат».

Результаты обследования поверхностных водных источников. В результате проведённых гидрогеологических и геологических исследований собраны данные для составления гидрогеологических паспортов поверхностных источников [2]. Кроме того, полученная информация применялась в процессе разработки интерактивной карты «Родники Севастополя и Республики Крым», которой мог бы пользоваться любой местный житель и гость полуострова.

Для составления карты все исследуемые поверхностные родники были ранжированы на три категории — чистые, условно чистые и загрязнённые. К загрязнённым относятся родники, в которых концентрация нитратов превышает $10 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$, а содержание фосфатов — $0,5 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$. Все они находятся вблизи зоны городской застройки. Родники из группы условно чистых характеризуются концентрациями нитратов в пределах от 5 до $10 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$, а фосфатов — в диапазоне от 0,25 до $0,5 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$. Остальные исследованные родники выделяются нами в категорию чистых.

Основным загрязняющим химическим соединением родниковой воды на территории исследования являются нитраты. Потребление загрязнённой нитратами воды ведёт к развитию серьёзных заболеваний — рака щитовидной железы, патологий сердечно-сосудистой системы и печени, болезней, поражающих желудочно-кишечный тракт, и др. [5].

Наши результаты исследования сравнивались с данными изысканий, проведённых сотрудниками ГАУ РК ЦЛАТИ и участниками проекта СевГУ «Родники Севастополя» (рис. 1). Эта оценка доказала состоятельность использования тест-системы NILPA Home.

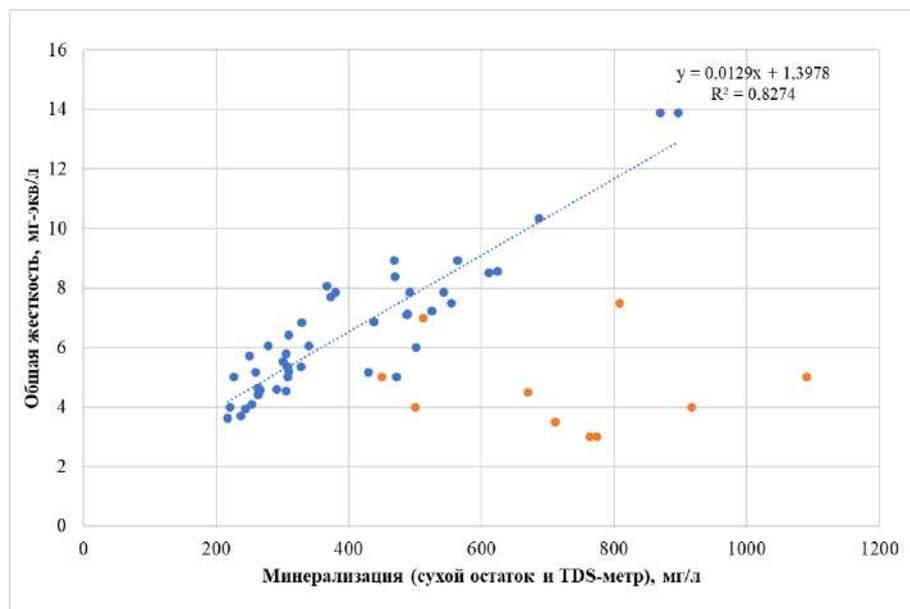


Рис. 1. Влияние минерализации на общую жёсткость (синие кружки — исходные данные; оранжевые — данные других исследователей)

В ходе сравнения наших данных о жёсткости и минерализации с результатами, полученными в рамках проекта «Родники Севастополя», выявлено значительное расхождение между ними. На нашем сводном графике хорошо видно, что минерализация и общая жёсткость имеют связь между собой ($r = 0,91$). Подобное отмечается в результатах обследования поверхностных и подземных вод в научной литературе [6].

В ходе анализа интерактивной карты было установлено, что содержание нитратов и фосфатов зависит от наличия рядом населённых пунктов (рис. 2). Такое влияние определяется площадью питания этих родников и направлением подземных водных потоков. Большинство источников загрязнения подземных вод располагается в пределах городской черты Севастополя и рядом с ней. Основными источниками нитратов и фосфатов в пределах городов являются канализационные и ливневые стоки от жилых помещений, несанкционированные свалки, выгребные ямы, кладбища, сельскохозяйственные территории (виноградники в горных районах) и дачные участки [4]. Также стоит отметить, что нитраты отлично растворяются в воде и плохо адсорбируются вмещающими породами, поэтому анионы нитратов способны переноситься на большое расстояние от источников загрязнения.

По результатам обработки данных о температурах и расходах источника Бабу-Корыто (город Ялта) за период с 2021 по 2024 г. было установлено, что поверхность его питания находится в области транзита трещинно-карстовых известняков. Из графика (рис. 3) видно, что дебит родника довольно быстро реагирует на ливневые аномальные осадки.

Зависимость дебита поверхностного источника Бабу-Корыто от температуры представлена на рис. 4. На графике хорошо видна сезонная цикличность (по временам года).

Обращает на себя внимание и сильная корреляционная зависимость ($0,71$; $t > 0,99$) между двумя параметрами — среднемесячной температурой воды и среднемесячной температурой воздуха. Снижение температуры воды в июле 2021 г. связано с поступлением в водоносный горизонт более холодных ливневых осадков. Падение температуры воды в июле — августе 2022 г. также обусловлено поступлением более холодных летних осадков.

Минимальные температуры воды в январе — феврале объясняются не только минимальными среднемесячными температурами воздуха зимой, но и максимальными зимними дебитами [1].

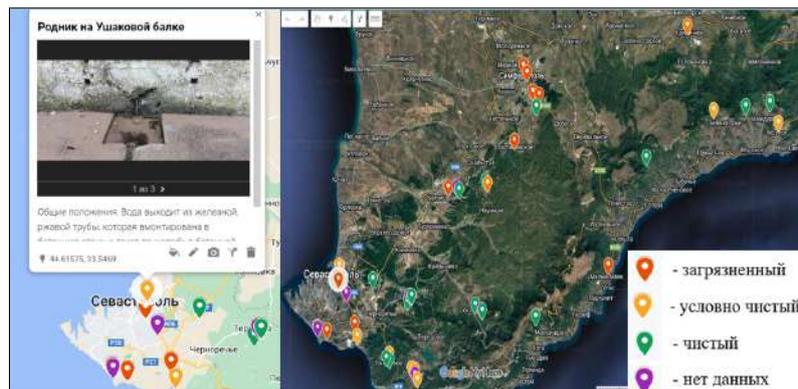


Рис. 2. Интерактивная карта качества родниковой воды на территории Горного Крыма

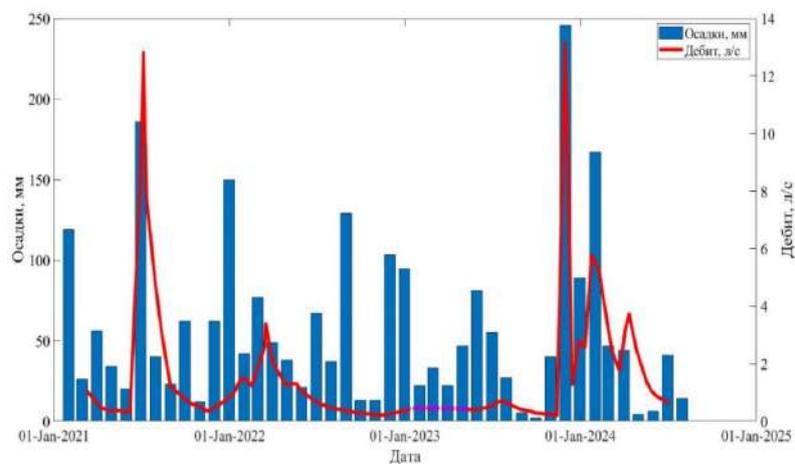


Рис. 3. График связи между выпадением осадков и дебитом ($л \cdot с^{-1}$) родника Бабу-Корыто (город Ялта) (по материалам исследования ГАУ РК ЦЛАТИ)

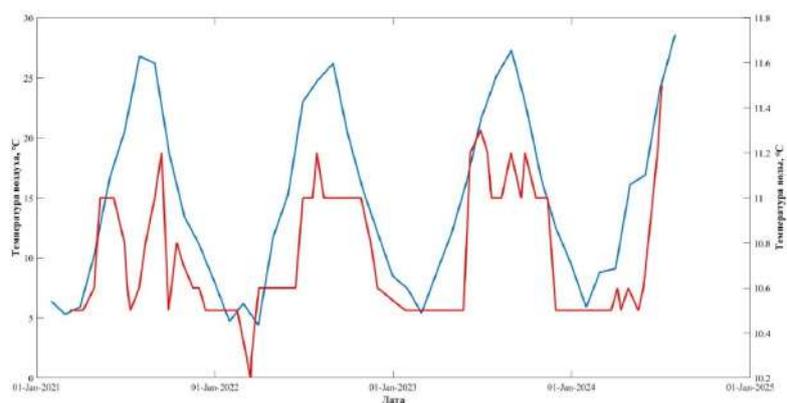


Рис. 4. График изменения температурного режима воды в роднике Бабу-Корыто (город Ялта) в зависимости от температуры воздуха (по материалам исследования ГАУ РК ЦЛАТИ)

Результаты исследований автора были использованы для записи серии роликов об экологическом состоянии поверхностных источников для видеоплатформы YouTube. Также был разработан сайт «Родники Республики Крым и города Севастополя». Каждый желающий может пользоваться этими данными и интерактивной картой для получения информации о качестве родниковой воды в Горном Крыму.

Заключение. Проведённые гидрогеологические и геологические исследования поверхностных источников Горного Крыма позволили создать гидрогеологические паспорта родников и интерактивную карту их экологического состояния.

По результатам анализа источника Бабу-Корыто (город Ялта) было установлено, что дебит родника связан с выпадением осадков и с сезонными температурами воды.

В результате обследования родников выявлено, что серьёзную антропогенную нагрузку испытывают источники, которые находятся в пределах городской черты. Обращает на себя внимание тот факт, что поверхность вокруг них довольно часто находится в антисанитарном состоянии.

Результаты экологического состояния поверхностных источников выложены на сайт «Родники Республики Крым и города Севастополя» и дублируются интерактивной картой.

Благодарность. Выражаю большую благодарность В. Федоренко, сотруднику ГАУ РК ЦЛАТИ, за предоставление данных о дебитах и температурах воды родника Бабу-Корыто, а также В. И. Лысенко, доценту кафедры географии океана, — за руководство проделанной работой.

Список использованных источников

1. Амеличев Г. Н., Токарев С. В., Токарев И. В. Формирование и режим карстовых подземных вод в бассейне р. Абдалка (Предгорный Крым) // Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2019. Т. 5, № 2. С. 202–233. EDN: [ORBSQE](#)
2. Всеволожский В. А. Основы гидрогеологии : учебник. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Изд-во МГУ, 2007. 448 с. EDN: [RBBIFH](#)
3. Дублянский В. Н., Кикнадзе Т. З. Гидрогеология карста Альпийской складчатой области юга СССР. Москва : Наука, 1984. 128 с.
4. Кириенкова И. О., Львов А. В., Ничкова Л. А. Исследование качества подземных вод Крымского полуострова // Системы контроля окружающей среды. 2019. № 3 (37). С. 132–137. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2019-3-132-137>. EDN: [FKXFUU](#)
5. Косарев А. В., Иванов Д. Е., Микеров А. Н., Савина К. А. Оценка канцерогенного и неканцерогенного рисков здоровью, обусловленных качеством питьевой воды родников // Гигиена и санитария. 2020. Т. 99, № 11. С. 1294–1300. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-11-1294-1300>. EDN: [HVDGPU](#)
6. Справочное руководство гидрогеолога : в 2-х т. / В. М. Максимов, В. Д. Бабушкин, Н. Н. Веригин и др. / под ред. В. М. Максимова. 3-е изд. перераб. и доп. Ленинград : Недра, 1979. Т. 1. 512 с.

УДК 504.4.054

Оценка трансформации химического состава речных вод как динамического компонента ландшафтов европейской части России

Решетняк О. С.

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

✉ olgarel@mail.ru

Представлены результаты оценки трансформации химического состава речных вод европейской части России (ЕЧР) за многолетний период. Выявлены зональные изменения содержания главных ионов, биогенных веществ и соединений тяжёлых металлов в речных водах ЕЧР. Показано, что их химический состав характеризуется пространственной неоднородностью и по некоторым показателям подчиняется принципу гидрохимической зональности. Определено, что нарушение гидрохимической зональности проявляется в формировании положительных гидрохимических аномалий в речных водах ЕЧР; наибольшее их количество выявлено в зонах тайги, смешанных и широколиственных лесов. Больше всего аномалий сформировано по содержанию сульфатов и ионов кальция в речных водах, и чаще всего выявленные гидрохимические аномалии не превышают ПДК или превышают незначительно.

Ключевые слова: европейская часть России, речные воды, ландшафты, химический состав воды, тенденции, гидрохимические аномалии

В условиях современных глобальных и региональных вызовов и экологических рисков особенно важным становится исследование состояния водных ресурсов в целом и трансформации химического состава и качества воды рек в частности. Решение таких вопросов входит в задачи государственной экологической политики и включено в систему управления водными ресурсами на региональном уровне. Это особенно актуально для европейской части России (далее — ЕЧР), в пределах которой проживает около 80 % населения РФ и сосредоточено лишь около 20 % водных ресурсов.

Исследование трансформации химического состава речных вод имеет важное значение в связи с прямым или косвенным антропогенным воздействием на водные объекты и с необходимостью оценки степени такого влияния. Хозяйственная деятельность может приводить к нарушению естественных процессов, протекающих в ландшафтах и на водосборах рек, а также к изменению качества воды рек, многие из которых являются источником питьевого водоснабжения в целом ряде регионов России [1, 4].

Как известно, формирование химического состава речных вод определяется совокупностью физических, химических и биологических процессов, происходящих на водосборе и в самом водном объекте, и зависит от региональных природно-климатических особенностей ландшафтов. В силу своего географического положения ЕЧР характеризуется широким спектром природных зон — от арктической пустыни и тундры до полупустынь и пустынь. Такая сложность строения территории обуславливает необходимость учёта региональных особенностей формирования химического состава и качества воды при исследовании природных вод [7].

Речные воды являются динамичным компонентом ландшафтов и в процессе своего формирования взаимодействуют с различными горными породами, подземными водами, почвами, атмосферой и растительностью. Одна из главных особенностей речных вод — высокая активность водообмена: русловые речные воды сменяются в среднем каждые 11 дней, что определяет их быструю возобновляемость [3]. Реки являются динамичным компонентом гидросферы в целом и в своём течении неоднородны по химическому составу. Это наиболее сильно выражено по длине реки, в меньшей степени проявляется по ширине и глубине. К основным факторам, обуславливающим неоднородность состава речных вод, следует отнести впадение притоков, поступление грунтовых вод и неодновременную смену вод разного происхождения в русле реки по её длине [3].

Публикаций, посвящённых изучению проблемы изменчивости качества воды рек ЕЧР, достаточно много, а работ, направленных на системное изучение пространственно-временных закономерностей трансформации химического состава речных вод с учётом гидрохимической зональности и их дифференциации по природным зонам, значительно меньше. В таком контексте большое значение и актуальность приобретает изучение и оценка трансформации химического состава речных вод как динамического компонента ландшафтов ЕЧР, что является целью данного исследования.

Материал и методы исследования. Анализ проводился на основе многолетних (1990–2017 гг.) гидрохимических данных государственной наблюдательной сети Росгидромета в части поверхностных вод суши. Химический состав речных вод ЕЧР изучался по изменчивости таких гидрохимических показателей, как главные ионы [гидрокарбонаты (HCO_3^-), хлориды (Cl^-), сульфаты (SO_4^{2-}), ионы кальция (Ca^{2+}) и ионы магния (Mg^{2+})], биогенные вещества [азот аммонийный (NH_4^+) и нитратный (NO_3^-)], органические вещества по показателям БПК₅ и ХПК, нефтепродукты и соединения тяжёлых металлов [Fe, Cu, Zn и Mn].

Объектами исследования являлись более 200 речных участков в различных ландшафтных зонах ЕЧР, вода которых имеет сложный, многокомпонентный состав, изменяющийся во времени и пространстве. Использование в качестве природно-территориальных единиц физико-географических провинций позволило сгруппировать речные участки ЕЧР с учётом особенностей зонального типа ландшафтов на основе карты физико-географического районирования [9]. Из-за нерегулярности наблюдений и недостаточности данных в исследовании практически не включены участки рек горных районов и водотоки, формирующиеся в зонах полупустынь и пустынь.

Неоднородность химического состава речных вод ЕЧР изучена на основе анализа диапазонов концентраций, медианных значений за каждый год и диапазонов медианных концентраций за многолетний период. Зональная изменчивость содержания химических веществ в речных водах оценена на основе обобщения медианных годовых значений для каждой физико-географической провинции и далее для каждой природной зоны ЕЧР.

Обработка данных осуществлялась с использованием MS Office Excel 2010 и Statistica 13.3.

Результаты исследования и обсуждение. При изучении пространственно-временных изменений выявлен сложный характер изменчивости химического состава речных вод. Для определения всей совокупности природных факторов в формировании химического состава речных вод участки рек сгруппированы по провинциям с учётом ландшафтных особенностей. Ландшафт как единица районирования водосборной территории интегрирует особенности компонентов окружающей среды, представляя собой некоторое единство природно-климатических, геоморфологических, гидрографических и других факторов. Однако разнообразие и региональные особенности природных условий даже в границах одного ландшафта, динамичность реки и влияние техногенных факторов нередко приводят к тому, что между участками рек из территориально несмежных геосистем больше сходства в химическом составе, чем между речными участками в пределах одного ландшафта [5].

Анализ изменчивости многолетних данных о химическом составе воды рек ЕЧР позволил выявить его пространственную неоднородность. С севера на юг возрастали медианные концентрации главных ионов (хлоридов, сульфатов, гидрокарбонатов, ионов магния и кальция) (табл. 1) и в некоторой степени биогенных и органических веществ (табл. 2). В табл. 1 представлены обобщённые с учётом ландшафтных особенностей природных зон данные об изменчивости медианных концентраций главных ионов, из которых видно, что наибольшие концентрации характерны для рек лесостепной и степной зоны.

В многолетнем аспекте в отношении соединений тяжёлых металлов выявлена обратная закономерность: наибольшие концентрации характерны для рек северных территорий ЕЧР (за исключением соединений марганца, концентрации которых значительно варьируют и не подчиняются зональной изменчивости). Эта закономерность продемонстрирована данными табл. 2, по которым прослеживается тенденция снижения концентраций соединений железа и цинка при движении с севера на юг.

Таблица 1. Зональное изменение среднегодовых медианных концентраций ($\text{мг} \cdot \text{дм}^{-3}$) главных ионов в речных водах европейской части России за многолетний период (1990–2017 гг.) [6]

| Природная зона (зоны) | Хлориды | SO_4^{2-} | HCO_3^- | Ионы Ca^{2+} | Ионы Mg^{2+} |
|---|--------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Тундра и лесотундра | $\frac{2,7-23,8}{6,3}$ | $\frac{3,1-30,1}{9,5}$ | $\frac{7,3-79,3}{40,3}$ | $\frac{1,8-20,2}{10,6}$ | $\frac{0,8-5,0}{2,8}$ |
| Тайга | $\frac{1,0-38,9}{6,0}$ | $\frac{2,5-219,9}{23,3}$ | $\frac{3,7-318,0}{88,3}$ | $\frac{1,4-115,5}{24,3}$ | $\frac{0,6-21,4}{7,0}$ |
| Зона смешанных и широколиственных лесов | $\frac{2,7-40,0}{14,0}$ | $\frac{5,0-480,0}{44,2}$ | $\frac{22,0-300,5}{172,6}$ | $\frac{6,2-219}{52,4}$ | $\frac{2,4-58,6}{13,2}$ |
| Лесостепи и степи | $\frac{6,4-282,0}{53,5}$ | $\frac{20,2-524,0}{104,8}$ | $\frac{94,9-394,7}{260,3}$ | $\frac{30,1-196}{82,5}$ | $\frac{5,7-58,7}{25,1}$ |

Примечание: в числителе — диапазон медианных годовых концентраций, в знаменателе — среднегодовое значение.

Таблица 2. Зональное изменение среднегодовых медианных концентраций ($\text{мг} \cdot \text{дм}^{-3}$) биогенных и органических веществ (ОВ), а также некоторых металлов в речных водах европейской части России за многолетний период (1990–2017 гг.) [6]

| Природная зона (зоны) | Биогенные и органические вещества | | | | Соединения | |
|---|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| | N-NH_4^+ | N-NO_3^- | ОВ (по БПК ₅) | Нефтепродукты | железа | цинка* |
| Тундра и лесотундра | $\frac{\text{н. о.}-0,20}{0,07}$ | $\frac{0,01-0,27}{0,04}$ | $\frac{0,50-2,60}{1,57}$ | $\frac{\text{н. о.}-0,04}{0,02}$ | $\frac{0,14-0,96}{0,37}$ | $\frac{\text{н. о.}-29,7}{12,1}$ |
| Тайга | $\frac{\text{н. о.}-0,42}{0,11}$ | $\frac{\text{н. о.}-0,69}{0,19}$ | $\frac{0,50-3,07}{1,50}$ | $\frac{\text{н. о.}-0,16}{0,03}$ | $\frac{0,05-0,86}{0,34}$ | $\frac{\text{н. о.}-33,2}{10,6}$ |
| Зона смешанных и широколиственных лесов | $\frac{\text{н. о.}-0,87}{0,27}$ | $\frac{0,04-2,02}{0,49}$ | $\frac{1,00-5,10}{2,19}$ | $\frac{\text{н. о.}-0,12}{0,04}$ | $\frac{0,06-1,87}{0,30}$ | $\frac{\text{н. о.}-27,0}{7,0}$ |
| Лесостепи и степи | $\frac{0,05-0,74}{0,26}$ | $\frac{0,13-2,97}{0,83}$ | $\frac{1,40-3,75}{2,51}$ | $\frac{\text{н. о.}-0,14}{0,04}$ | $\frac{0,01-0,38}{0,11}$ | $\frac{\text{н. о.}-8,0}{2,7}$ |

Примечание: * — концентрации даны в $\text{мкг} \cdot \text{дм}^{-3}$; в числителе — диапазон медианных годовых концентраций, в знаменателе — среднегодовое значение; н. о. — ниже предела обнаружения метода.

Таким образом, химический состав речных вод ЕЧР характеризуется пространственной неоднородностью и по некоторым показателям подчиняется принципу гидрохимической зональности. В многолетнем аспекте при смене природных зон с севера на юг происходит увеличение медианных концентраций главных ионов, биогенных веществ и органических веществ (по БПК₅) на фоне снижения содержания соединений железа и цинка [6].

Закономерности широтной зональности и изменчивость содержания химических веществ в речных водах оказывают ключевое влияние на дифференциацию их природного содержания, то есть на формирование гидрохимического фона в водах рек. Можно предполагать, что нарушение этих закономерностей в распределении концентраций некоторых веществ носит природный или антропогенный характер и приводит к возникновению гидрохимических аномалий.

В общем смысле под гидрохимической аномалией понимается участок распространения природных вод с содержанием какого-либо компонента или значением минерализации воды, аномальным по отношению к фоновому [8]. Гидрохимические аномалии по своему происхождению могут быть природными (их образование вызвано действием природных процессов) и антропогенными (они связаны с деятельностью человека). Очевидно, что в речных водах могут формироваться и аномалии

смешанного типа [7].

При изучении гидрохимических аномалий в речных водах исходили из основных понятий и законов геохимии ландшафтов. В качестве критерия аномальности концентраций было принято отличие значения от среднестатистического значения содержания вещества для данной природной зоны на 2 стандартных отклонения (слабая аномалия) или на 3 (уверенная аномалия) [2].

Нарушение гидрохимической зональности проявляется в формировании положительных гидрохимических аномалий в речных водах ЕЧР, и наибольшее количество гидрохимических аномалий выявлено в зонах тайги, смешанных и широколиственных лесов. При сравнительной оценке аномальных значений по показателям установлено, что максимальная доля гидрохимических аномалий характерна для сульфатов и ионов кальция [6]. В пространственном распределении выделяются отдельные территория с преобладанием гидрохимических аномалий антропогенного типа (например, Кольский полуостров) или преимущественно естественного происхождения (в бассейнах рек в зоне тайги — Северной Двины, рек Карелии и др.) (рис. 1).



Рис. 1. Пространственное распределение гидрохимических аномалий в речных водах европейской части России [6]

С практической точки зрения интересным является соотношение гидрохимических аномалий и нормативов качества воды, хотя аномалии выделяются исходя из среднестатистических concentra-

ций веществ в природных водах, отличающихся для каждой природной зоны. Аномальные значения концентраций могут не превышать ПДК по таким показателям, как хлориды, гидрокарбонаты и азот нитратный. По большинству показателей кратность превышения ПДК незначительна (до 5 ПДК), и только по соединениям тяжёлых металлов гидрохимические аномалии существенно превышают ПДК (более чем в 10 раз) (табл. 3).

Таблица 3. Характеристики гидрохимических аномалий в речных водах европейской части России

| Показатель | Максимальный Кс | Диапазон концентраций, мг·дм ⁻³ | Максимальная кратность превышения ПДК _{р/х} |
|---------------------------|-----------------|--|--|
| Ионы магния | 9,1 | 7,81–58,3 | 1,5 |
| Ионы кальция | 8,9 | 8,79–238,0 | 1,3 |
| Хлориды | 9,9 | 6,96–280,4 | нет превышений |
| Сульфаты | 33,1 | 8,55–549,4 | 5,5 |
| Гидрокарбонаты | 39,0 | 34,9–356,7 | не нормируется |
| ОВ (по БПК ₅) | 2,2 | 0,37–4,88 | 2,4 |
| ОВ (по ХПК) | 2,4 | 4,37–67,1 | 4,5 |
| Азот аммонийный | 5,6 | 0,07–1,28 | 3,2 |
| Азот нитратный | 11,9 | 0,04–2,62 | нет превышений |
| Нефтепродукты | 8,7 | 0,007–0,15 | 3,0 |
| Железо | 13,7 | 0,22–1,78 | 17,8 |
| Медь* | 2,4 | 0,5–6,8 | 6,8 |
| Цинк* | 4,6 | 5,3–44,2 | 4,4 |
| Марганец* | 22,2 | 53,0–213,0 | 21,3 |

Примечание: Кс — коэффициент концентрации, то есть отношение содержания вещества к среднестатистическому содержанию в речных водах природной зоны (ландшафта и т. п.); ПДК_{р/х} — ПДК в воде водных объектов рыбохозяйственного назначения; * — концентрации даны в мкг·дм⁻³.

Таким образом, химический состав речных вод ЕЧР, формирующийся в различных ландшафтных условиях, во многом зависит от региональных (фоновых) геохимических, климатических и других характеристик, что обуславливает необходимость учёта их природного гидрохимического фона и региональных особенностей функционирования речных систем при оценке качества воды рек и при прогнозировании его изменений.

Выводы. Результаты проведённых исследований позволили оценить зональную изменчивость химического состава речных вод европейской части России (ЕЧР) за многолетний период.

В водах рек ЕЧР выявлены зональные изменения среднемноголетних медианных концентраций главных ионов, биогенных и органических веществ, а также соединений тяжёлых металлов. Показано, что химический состав речных вод характеризуется пространственной неоднородностью и по некоторым показателям подчиняется принципу гидрохимической зональности. При смене природных зон с севера на юг происходит увеличение медианных концентраций главных ионов, биогенных веществ и легкоокисляемых органических веществ на фоне снижения содержания соединений железа и цинка.

Определено, что нарушение гидрохимической зональности проявляется в формировании положительных гидрохимических аномалий в речных водах ЕЧР, и наибольшее их количество выявлено в зонах тайги, смешанных и широколиственных лесов. При сравнительной оценке аномальных значений установлено, что максимальная доля гидрохимических аномалий характерна для сульфатов и ионов кальция. В большинстве случаев выявленные гидрохимические аномалии не превышают ПДК или превышают незначительно.

Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшем для решения таких практических задач, как разработка региональных критериев оценки качества воды и состояния водных экосистем (особенно для водных объектов, подверженных длительному хроническому загрязнению), разработка экологически обоснованных мероприятий по улучшению гидроэкологической обстанов-

ки на водосборах рек и др.

Список использованных источников

1. Закруткин В. Е., Складенко Г. Ю., Бакаева Е. Н., Решетняк О. С., Гибков Е. В., Фоменко Н. Е. Поверхностные и подземные воды в пределах техногенно нарушенных геосистем Восточного Донбасса: формирование химического состава и оценка качества : монография. Ростов-на-Дону : Южный федеральный университет, 2016. 170 с. EDN: [ZPKQTT](#)
2. Криночкин Л. А. Прогнозная оценка территории России по региональным аномальным геохимическим полям : автореф. дис. ... д-ра геол.-минер. наук : 25.00.09 / Криночкин Лев Алексеевич. Москва, 2011. 46 с. EDN: [QHQFEV](#)
3. Никаноров А. М. Гидрохимия : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Гидрология». 3-е изд., доп. Ростов-на-Дону : НПП «НОК», 2008. 462 с. EDN: [QKIPFF](#)
4. Никаноров А. М., Брызгалов В. А., Решетняк О. С. Реки России в условиях чрезвычайных экологических ситуаций. Ростов-на-Дону : НПП «НОК», 2012. 310 с. EDN: [ZIUDCX](#)
5. Решетняк О. С. Ландшафтная изменчивость химического состава речных вод Европейской части России // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири (в 5 т.). Т. 2. Изучение и мониторинг процессов в почвах и водных объектах / под ред. В. Г. Сычева, Л. Мюллера. Москва : изд-во ФГБНУ «ВНИИ агрохимии», 2018. С. 359–364.
6. Решетняк О. С. Пространственно-временные закономерности трансформации химического состава и качества речных вод европейской части России : автореф. дис. ... д-ра геогр. наук : 1.6.21 / Решетняк Ольга Сергеевна. Ростов-на-Дону, 2024. 47 с.
7. Решетняк О. С., Даниленко А. О., Кондакова М. Ю., Косменко Л. С. Природные концентрации химических веществ и гидрохимические аномалии в речных водах европейской части России в пределах природно-территориальных комплексов // Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения : сборник научных трудов: посвящается Году экологии в России и 50-летию Института водных проблем РАН, Сочи, 02–07 октября 2017 г. Новочеркасск : Лик, 2017. С. 421–426. EDN: [ZRZHUZ](#)
8. Словарь по гидрогеологии и инженерной геологии / сост. А. А. Маккавеев, ред. О. К. Ланге. Москва : Гостоптехиздат, 1961, 74 с.
9. Физико-географическое районирование СССР. Характеристика территориальных единиц / под ред. проф. Н. А. Гвоздецкого. Москва : Издательство МГУ, 1968. 578 с.

УДК [556.51:504.5](282.247.415.5)

Геоэкологическая ситуация водосборной территории малых рек в горной полосе Среднего Урала на примере ландшафтного заказника «Гора Шунут-Камень»

Скок Н. В.¹, Юровских А. М.¹, Иванова Ю. Р.²

¹Уральский государственный педагогический университет, Екатеринбург, Россия

²Уральский федеральный университет имени первого президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

✉ skok-nv-gbf@mail.ru

В статье рассмотрена актуальная геоэкологическая ситуация водосборной территории малых рек в горной полосе Среднего Урала на примере ландшафтного заказника «Гора Шунут-Камень». Подробно описано влияние антропогенной нагрузки на рельеф и почвенно-растительный покров. Приведены данные мониторинга состояния окружающей среды, проводимого на протяжении нескольких десятилетий.

Ключевые слова: малые реки, горная полоса, ландшафтный заказник, Средний Урал, Шунут

Изучение геоэкологической ситуации водосборных территорий в горной полосе Среднего Урала имеет большое значение. Малые реки оказывают существенное влияние на поддержание устойчивости гидрологического режима прилегающих крупных речных систем. Горные ландшафты характеризуются повышенной уязвимостью к различным видам антропогенного воздействия. Это ведёт к значительным изменениям структуры и функционирования водного бассейна, влияющим в том числе на эрозионные процессы.

Средний Урал характеризуется существенным разнообразием геокомплексов, среди которых особое внимание привлекают бассейны малых рек. Одним из важнейших компонентов их водосбора служит лесной покров, выступающий стабилизатором геоэкосистемы и регулятором гидрологического режима территории. Деятельность человека отрицательно сказывается на устойчивости функционирования малых рек и их притоков, создавая угрозу стабильному состоянию всей речной системы.

Настоящее исследование проведено на территории ландшафтного заказника «Гора Шунут-Камень», расположенного в центральной части юга горной полосы Среднего Урала. В 1983 г. на восточном склоне горы Шунут (724 м) на месте радонового источника Платонида был организован заказник «Исток реки Малый Ик» площадью 206 га. В 2011 г. территория была увеличена до 3587 га, а заказник был переименован в ландшафтный заказник регионального уровня «Гора Шунут-Камень»; в него был включён памятник природы областного значения «Исток реки Малый Ик (Платонида)» [4, 6]. Заказник расположен в двух ландшафтных районах — в Коноваловско-Уфалейском и в Ревдинской депрессии — и отличается неравномерностью расчленённости рельефа и мозаичностью лесных массивов вследствие углежжения и иных форм лесозаготовительных работ, выполнявшихся в XVIII–XX вв. [1, 3, 5].

Водосборная территория речки Малый Ик, расположенной в пределах ландшафтного заказника, является истоком формирования гидрографической сети реки Большой Ик — левого притока реки Ревда, относящегося к Волго-Камскому бассейну. Верховья реки Малый Ик находятся недалеко от радонового источника Платонида в верхней части восточного склона горы Шунут. Мониторинг антропогенного воздействия на данную водосборную территорию осуществляется непрерывно с 1980-х гг.

В настоящее время в заказнике сформировались преимущественно вторичные осиново-берёзовые леса. Исторически сложилось, что западный и восточный склоны горы Шунут подверглись значительным изменениям вследствие активного лесопользования. В XVIII в. массивы леса на территории Коноваловско-Уфалейского хребта являлись «лесной дачей», приписанной к Ревдинскому заводу [2]. Здесь происходила заготовка древесного угля и дров на заводские нужды. Появилась первая сеть

лесных дорог и тропинок. В XIX–XX вв. склоны горы Шунут были существенно затронуты повторными рубками, причём впоследствии значительную часть вырубов местные жители начали осваивать под покосы. Западный склон и верхняя часть восточного склона перестали использоваться для лесопользования в 1960-е гг., тогда как средняя и нижняя части продолжали эксплуатироваться вплоть до 1980-х гг. [5].

Вырубка леса велась наиболее интенсивно на восточном склоне, что вызвало увеличение сети лесовозных дорог. Поперёк средней части этого склона в направлении с севера на юг была проложена грунтовая дорога, которая используется с различными целями и в настоящее время. Большая часть дорожно-тропиночной сети пролегает вдоль восточного склона; направления её элементов совпадают с направлениями стока дождевых и талых вод, образующих формы временного водотока, а также реки Малый Ик. Такая ситуация способствует эрозии почвы и формированию глубоких промоин, достигающих в нижней части склона 1,5 м. В результате в нижней части долины реки Малый Ик образовался водопад высотой 60 см, ежегодно отступающий на 20–30 см вверх по течению. Весной 2017 г. в промоине, которую заняла долина реки Малый Ик, произошёл оползень, обрушивший часть правого берега. В средней части течения реки туристы прокладывают гати для проезда автотранспорта, которых хватает на два года (рис. 1); затем промоина увеличивается — и созданный ранее настил оказывается разрушен. В нижнем течении, недалеко от места впадения в реку Большой Ик, рельеф совместной поймы сильно изменён и подтоплен в связи с сооружением бобровых плотин.



Рис. 1. Зарастающая гать (фото авторов)

Значительное ухудшение геоэкологической ситуации в средне-нижней части восточного склона горы Шунут произошло в период последних лесозаготовительных работ — в 1980-е гг. В ходе хозяйственных мероприятий вдоль склона были проложены лесовозные дороги, что привело к образованию линейных понижений рельефа — эрозионных борозд с временными водотоками, а местами с концентрацией стоячей воды. Начавшаяся эрозия поверхности постепенно трансформировала эти небольшие углубления (от 30 см) в долину вновь сформировавшегося постоянного водотока левого притока реки Малый Ик (рис. 2). В настоящее время врезание продолжается. Одновременно с этим происходило активное перемещение значительного объема глинистого делювия к подножью горы Шунут и в Ревдинскую депрессию. Продукты глинистого размыва, накапливаясь в нижней пологой части восточного склона, перекрыли почвенно-растительный покров местами на 20 см. Постоянный проезд автотранспорта повышенной проходимости образовал «поля» понижений, наполнившихся водой и делювием, мощность толщи которого достигает иногда 70 см. Ширина затопленных участков, не высыхающих даже в самые сухие годы, составляет от 3 до 15 м (рис. 3).



Рис. 2. Промоина на месте лесовозной дороги в нижней части восточного склона горы Шунут (фото авторов)

Современная геоэкологическая ситуация в заказнике характеризуется рядом проблем, связанных с нарушением режима охраны территории. Несмотря на наличие особого правового статуса и установленных ограничений, регулирующих проезд транспортных средств вне имеющихся дорог, контроль за соблюдением требований отсутствует, что делает систему правил фактически неэффективной [4]. В частности, запрещается проезд автотранспортных средств вне дорог общего пользования, однако это правило систематически нарушается, что приводит к дальнейшему ухудшению состояния грунтовых дорог и к уничтожению растительности вдоль них.



Рис. 3. Отложения глинистого делювия в Ревдинской депрессии (фото авторов)

Трансформация водосборной территории вследствие антропогенного влияния в ландшафтном заказнике «Гора Шунут-Камень» привела к существенным изменениям её рельефа и почвенно-растительного покрова. Вырубка леса способствовала замене коренной растительности на вторичные осиново-берёзовые леса (в настоящее время они представлены средневозрастными насаждениями), что негативно отразилось на водоудерживающей способности почвы и вызвало сокращение притока объёмов воды в русло малых рек. Это привело к уменьшению общего объёма воды, поступающего в реку Ревда, которая является основным источником водоснабжения населённых пунктов и промышленных предприятий в её нижнем течении. Снижение водных запасов также оказывает негативное влияние на агроценозы поливных полей, расположенных в Ревдинской депрессии вдоль левого берега, ухудшая условия орошения сельскохозяйственных угодий. Исследование показало, что геоэкологическое состояние водосборной территории малых рек в районе ландшафтного заказника «Гора Шунут-Камень» находится под серьёзной угрозой из-за антропогенной деятельности и требует мониторинга для улучшения создавшейся ситуации.

Список использованных источников

1. Гурьевских О. Ю., Капустин В. Г., Скок Н. В., Янцер О. В. Физико-географическое районирование и ландшафты Свердловской области. Екатеринбург : ФГБОУ ВО Урал. гос. пед. ун-т, 2016. 280 с. EDN: [YPVCDV](#)
2. Займогов А. И. Лесные дачи уральских заводов. Екатеринбург : ООО «Грачёв и Партнёры», 2012. 46 с.

3. Новиков С. Г., Новикова Т. А. Три века истории. Екатеринбург : Издательство «Станционный смотритель», 2018. 408 с.
4. Положение о ландшафтном заказнике «Гора Шунут-Камень» : утверждено постановлением Правительства Свердловской области от 06.04.2011 № 368-ПП «Об утверждении ландшафтных, ландшафтно-гидрологического, орнитологического и ботанического государственных природных заказников областного значения» // «Областная газета». 2011. 15 апреля, № 122-123.
5. Прокаев В. И. Физико-географическое районирование Свердловской области : учебное пособие. М-во просвещения РСФСР. Свердлов. гос. пед. ин-т. Свердловск : [б. и.], 1976. 176 с.
6. Потапова Н. А., Назырова Р. И., Забелина Н. М., Исаева-Петрова Л. С., Коротков В. Н., Очагов Д. М. Сводный список особо охраняемых природных территорий Российской Федерации (справочник). Ч. II / отв. ред. Д. М. Очагов. Москва : ВНИИприроды, 2006. 364 с. EDN: [QJKNON](#)

УДК 551.1/4:504.03

Условия и факторы развития экзогенных геологических процессов в бассейнах рек Горного Дагестана

Сулейманов В. К., Мамаев С. А., Черкашин В. И., Идрисов И. А., Ибаев Ж. Г.

Институт геологии ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия

✉ v.suleimanow@yandex.ru

В статье кратко проанализированы и приведены факторы и условия, определяющие развитие экзогенных геологических процессов в Горном Дагестане в их совокупности. Охарактеризованы геологическое строение Горного Дагестана, его рельеф, неотектонический фактор во взаимосвязи с сейсмичностью, климатические особенности горной части и антропогенное влияние.

Ключевые слова: экзогенные геологические процессы, Горный Дагестан, геологическое строение, рельеф, климат, неотектоника, антропогенное воздействие

Дагестан занимает восточную часть северного склона мегантиклинория Большого Кавказа и обрамляющие его краевые прогибы. Значительная часть территории (44 %) занята складчатыми горными хребтами и поднятиями, имеющими направление с северо-запада на юго-восток и входящими в систему Большого Кавказа [1–6].

Дагестан, как молодая горно-складчатая неотектонически развивающаяся область, отличается чрезвычайно высокой активностью экзогенных геологических процессов (далее — ЭГП), которые имеют широкое распространение и представлены различными генетическими группами. Одни из них идут медленно, другие — катастрофически быстро [6].

Развитие ЭГП обусловлено совокупностью многих факторов. Таковыми, определяющими развитие современных опасных геологических процессов, являются: геологическое строение — генезис и состав горных пород; геоморфология — особенности рельефа; новейшие тектонические движения и связанная с ними сейсмичность; климат и антропогенное воздействие.

Горный Дагестан от предгорной зоны отделяется передовыми хребтами — Андийским, Сала-Тау, Гимринским, Лес и др. Все хребты характеризуются острыми гребнями, треугольными поперечным сечением и асимметричной формой.

В геологическом отношении горная часть Дагестана в основном сложена отложениями мелового и юрского возрастов. Значительное распространение здесь глинистых горных пород создаёт благоприятную среду для развития оползневых процессов [1]. На склонах, где геологическое строение представлено чередованием слабых аргиллитов и алевролитов с плотными песчаниками, образуются нависающие карнизы, которые, откладываясь, скатываются вниз, разрушительно действуя на встречные объекты.

Рельеф горной части характеризуется хребтами и поднятиями, образующими в составе Большого Кавказа своеобразный морфологический регион — Дагестанское нагорье. Здесь горно-хребтовый, умеренно-высокий и высокий рельеф. Его резкое расчленение является результатом совокупного проявления геолого-тектонических процессов, эрозионной деятельности поверхностных вод и Каспийского моря, а также сформировавшихся под их воздействием экзогенных геологических процессов.

Характерной чертой рельефа Горного Дагестана, особенно в бассейне реки Сулак, является наличие высоких (2000–3000 м) плато (Хунзахское, Гунибское, Аракмеэр, Кегерское, Шунудаг и др.), имеющих почти отвесные склоны, на которых развиты обвально-осыпные процессы [2].

В пределах Горного Дагестана по особенностям рельефа, связанным с литологическим составом пород, выделяются две крупные геоморфологические области — область Известнякового Дагестана и область Сланцевого Дагестана.

Черты геоморфологии Известнякового Дагестана обусловлены широким развитием мощных карбонатных толщ верхней юры и мела, участвующих в строении складчатых зон и отличаются резким расчленением рельефа и наличием крутых, обрывистых и скалистых склонов [1]. В область Сланцевого Дагестана входят складчатые структуры, сложенные ниже- и среднеюрскими сланцевыми толщами, где развиты системы глубокорасчленённых горных хребтов и межгорных депрессий. Общее геоморфологическое строение определяется складчатыми структурами и ограничивающими их альпийскими продольными разломами. Характеризуется широким развитием эрозионных форм рельефа благодаря литологической однородности слагающих пород. Формы рельефа Сланцевого Дагестана отличаются плавностью очертаний и сглаженностью, широкими долинами рек с менее крутыми склонами. Характерной особенностью рельефа речных долин Сланцевого Дагестана являются древние и современные селевые отложения.

Важную роль в формировании современного рельефа играют процессы механического выветривания горных пород и плоскостная денудация. Во время ливней со склонов сливается значительный объём продуктов выветривания, что приводит к возникновению разрушительных грязекаменных потоков в речных долинах.

Сильная горизонтальная и вертикальная расчленённость рельефа Горного Дагестана приводит к тому, что на высоких и крутых склонах в массивах горных пород образуются большие градиенты напряжений, с которыми связаны формирование трещин и отрыв масс горных пород, скатывающихся вниз по склону. Эрозионная расчленённость рельефа обуславливает потенциальную возможность возникновения и развития ЭГП, а так как эрозия продолжается, то и градиенты напряжений в массивах горных пород на склонах возрастают.

Новейшие (альпийские) морфологические структуры, нашедшие отражение в современном рельефе, выработаны главным образом водной эрозией.

Горный Дагестан характеризуется также большой активностью эндогенных процессов, связанных с неотектоническими процессами, которые продолжаются и в настоящее время. Об их активности свидетельствуют частые сейсмические события различной силы [3].

Районы повышенной сейсмической активности вытянут вдоль линий новейших разломов (Сулакский, Касумкентский, система разломов Главного Кавказского хребта). Нарушение энергетического равновесия склоновых отложений современными сейсмотектоническими процессами в виде землетрясений, выраженное в снижении устойчивости склона, приводит, как правило, к активизации ЭГП.

Одним из существенных факторов, порождающих ЭГП, является климат. Климатические условия Горного Дагестана обусловлены сложностью орографии и его рельефом. Климат здесь определяют вторжения воздушных масс с запада и севера по глубоким речным долинам, которые частично переваливают через хребты [3, 4].

Температура воздуха Горного Дагестана отличается большим разнообразием, что связано с особенностями рельефа, высотой и влиянием Каспийского моря. Особенности рельефа оказывают значительное воздействие на годовой ход температуры воздуха.

В Горном Дагестане отмечается резкое изменение температуры на протяжении суток. Суточные колебания объясняются высокой интенсивностью солнечной радиации днём и повышенным тепловым излучением поверхности земли ночью.

Атмосферные осадки в Горном Дагестане в основном выпадают в виде дождя в весенне-осенние периоды и в виде снега в зимний сезон; они изменяются в зависимости от высоты над уровнем моря. С увеличением высоты местности количество осадков возрастает, хотя в силу особых орографических условий территории эта зависимость может нарушаться.

По характеру распределения осадков Горный Дагестан подразделяется на два подрайона: более увлажнённый — западный и менее увлажнённый — восточный.

Среднегодовое количество осадков в высокогорной зоне превышает 800 мм, а в некоторых местах на юго-западе — 1000 мм. Переувлажнение пород является одним из условий нарушения равновесия на склонах — их устойчивости [4].

В результате колебаний температуры и попеременного увлажнения и высыхания активизируются процессы выветривания горных пород на обнажённых склонах. Выпадающие осадки носят ливневый характер; это приводит к усилению смыва продуктов выветривания, что обуславливает возникновение ливневых паводков в реках, способствующих возрастанию донной и боковой эрозии.

Пёстрое колебание количества осадков определяет большинство активизаций ЭГП.

Сложная орография Горного Дагестана определила условия для формирования различных типов климата [4]. В целом в Горном Дагестане нарастает континентальность, а с высотой — резкие перепады температур; снижается относительная и абсолютная влажность.

Климатические условия влияют также на режим грунтовых вод, на характер и развитие растительности и на другие факторы, прямо или косвенно воздействующие на активизацию ЭГП.

В тесной связи с климатическим фактором, в особенности с атмосферными осадками, находятся и гидрогеологические условия — наличие водоносных горизонтов и режим подземных вод, которые оказывают непосредственное влияние на образование и развитие ЭГП, так как увлажнение горных пород на склонах ведёт к увеличению их веса и к изменению физико-механических свойств. Гидрогеологические условия описываемой территории сложны и своеобразны.

Значительная трещиноватость горных пород, а также наличие известняков и большого количества рыхлых отложений создают благоприятные условия для накопления грунтовых вод. Наличие в литологическом составе пород Горного Дагестана легко размываемых глинистых сланцев, глин и мергелей, бедность растительного покрова и относительная континентальность климата способствуют интенсивным процессам выветривания горных пород, которые дают мелкораздробленный материал, легко смываемый текущими водами.

В последнее время в горной части возросла роль техногенных (антропогенных) факторов, основными из которых являются строительство гидроэлектростанций, дорог и тоннелей, расширение населённых пунктов с нарушением рельефа (подрезка склона), изменение подземного и поверхностного стока [6–11].

Преобладающее число проявлений ЭГП, вызванное метеофакторами, наблюдается в техногенно нарушенных природных ландшафтах, а этот фактор сыграл роль провоцирующего.

Во многих случаях именно техногенное вмешательство служит толчком к развитию ЭГП на участках, где активизация экзогенных процессов ранее не наблюдалась. Метеофакторы в этих условиях являются триггерным (пусковым) механизмом процесса.

С прокладкой магистральных и внутрихозяйственных каналов и с орошением горных склонов связаны многочисленные случаи активизации оползней в горной части. Переувлажнение склоновых отложений вследствие поливов — один из основных факторов оползневых деформаций в населённых пунктах.

Водохозяйственная деятельность на склоновых территориях всегда чревата изменениями геодинамического режима и требует принятия всесторонне взвешенных и обоснованных инженерных решений, особенно в тех случаях, когда мероприятия осуществляются на застроенных площадях.

Существенное воздействие на геологическую среду оказывают строительство и эксплуатация объектов транспортного комплекса. Строительство автодорог в Горном Дагестане сопровождается, как правило, подрезками неустойчивых склонов и складированием в эрозионные элементы рельефа рыхлообломочного материала, а это провоцирует активизацию оползневых и обвально-осыпных процессов в нагорных откосах и эрозионно-микроселевых — в низовом.

При селитебном освоении территории ведущим фактором развития или активизации опасных геологических процессов является техногенное воздействие на геологическую среду.

Тесная связь геологического строения с рельефом в условиях резкой климатической зональности и относительно молодой возраст горной страны создают наглядную картину воздействия основных эрозионных факторов на тектонические образования, сложенные мощной гетерогенной толщей мезокайнозойских пород.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Российской Федерации в лице Минобрнауки России — гранта в форме субсидий на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технического развития (соглашение № 075-15-2024-644).

Список использованных источников

1. Акаев Б. А., Галин В. Л. и др. Геология и полезные ископаемые Дагестана. Махачкала : Дагкнигоиздательство, 1976. 233 с.
2. Черкашин В. И., Заалишвили В. Б., Мамаев С. А., Атаев З. В., Ибаев Ж. Г., Сулейманов В. К. Геоэкологическое состояние верховьев бассейна реки Аварское Койсу // Геология и геофизика Юга России. 2024. Т. 14, № 4. С. 100–112. <https://doi.org/10.46698/VNC.2024.77.35.009>. EDN: DIXDDG
3. Идрисов И. А., Мамаев С. А., Атаев З. В., Сулейманов В. К., Мамаев А. С., Алимагомедов А. А. Особенности оползневых процессов в селе Могох Шамильского района // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2023. № 3 (94). С. 35–41. EDN: RPVHGX
4. Атаев З. В. Климатическая изменчивость ландшафтов Северо-Восточного Кавказа как фактор динамики современных экзогенных рельефообразующих процессов // Сергеевские чтения. Региональная инженерная геология и геоэкология : материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Москва, 2024. С. 30–33. EDN: HDBXQK
5. Атаев З. В. Реакция ландшафтов Дагестана на современные климатические изменения // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2023. № 3 (94). С. 10–14. EDN: CXJBIJ
6. Разумов В. В., Богданов М. И., Богданова Н. Д., Разумова Н. В., Гусейнова Н. О. Оценка масштабов распространения и опасности активизации оползневых процессов в Дагестане // Юг России: экология, развитие. 2019. Т. 14, № 4. С. 56–77. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2019-4-56-77>. EDN: YNRFCO
7. Идрисов И. А., Мамаев С. А., Юсупов А. Р., Магомедов Р. А. Оползневые процессы в Дагестане в 21 веке // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2015. № 64. С. 155–159. EDN: VBQCUT
8. Черкашин В. И., Заалишвили В. Б., Мамаев С. А., Атаев З. В., Ибаев Ж. Г., Сулейманов В. К. Геоэкологическое состояние верховьев бассейна реки Аварское Койсу // Геология и геофизика Юга России. 2024. Т. 14, № 4. С. 100–112. <https://doi.org/10.46698/VNC.2024.77.35.009>. EDN: DIXDDG
9. Сулейманов В. К., Мамаев С. А., Идрисов И. А., Атаев З. В., Черкашин В. И. Особенности инженерно-геологических условий на участках для строительства у северной окраины селения Дылым // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2024. № 2 (97). С. 38–45. EDN: PWWCMF
10. Zalibekov Z. G., Mamaev S. A., Biarslanov A. B., Asgerova D. B., Galimova U. M., Sultankhamedov M. S. Regional distribution patterns of soils in delta ecosystems and their potential use on different continents // Arid Ecosystems. 2017. Vol. 7, no. 2. P. 73–79. <https://doi.org/10.1134/S2079096117020111>. EDN: XNILVS
11. Сулейманов В. К., Юсупов А. Р., Мамаев С. А., Алимагомедов А. А., Ахмедов А. М. Некоторые особенности экзогенных геологических процессов, протекающих у с. Ташкапур Левашинского района Республики Дагестан // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2022. № 3 (90). С. 47–51. <https://doi.org/10.33580/2541-9684-2022-90-3-47-51>

УДК 551.50(282.247.3/4)

Пространственно-временная изменчивость поля содержания формальдегида в юго-западной части водосборного бассейна Каспийского моря

Табунщик В. А.^{1,2}, Никифорова А. А.¹, Линёва Н. П.¹, Дрыгваль П. В.¹, Горбунов Р. В.^{1,2}, Горбунова Т. Ю.^{1,2}, Фам К. Н.¹, Керимов И. А.², Братанов Н. С.¹, Киселёва М. В.¹

¹ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», Севастополь, Россия

²Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова, Грозный, Россия

✉ tabunshchik@ya.ru

В статье представлен анализ пространственно-временной изменчивости поля содержания формальдегида в юго-западной части водосборного бассейна Каспийского моря по данным анализа космических снимков Sentinel-5 с использованием платформы Google Earth Engine и программного комплекса ArcGIS.

Ключевые слова: Прикаспий, загрязнение воздуха, формальдегид, Sentinel-5P, Google Earth Engine, GEE, пространственно-временной анализ, устойчивое развитие

В 2006 и 2011 гг. Международное агентство по изучению рака (International Agency for Research on Cancer, IARC) и Национальная токсикологическая программа США (National Toxicology Program, NTP) определили формальдегид как канцероген для человека. Основные источники его появления — выхлопные газы транспортных средств и летучие промышленные выбросы. Вторичное образование НСНО в результате распада первичных соединений, например в результате реакции алкенов и озона, также вносит свой вклад в увеличение его концентрации в окружающей среде [1].

С помощью геоинформационных технологий можно точно и объективно определить площадь и уровень загрязнения воздуха [2]. Геоинформационные методы позволяют устанавливать местонахождение источников загрязняющих веществ и отслеживать пространственно-временную изменчивость регионов загрязнения для сохранения качества воздуха. В последние годы для этих целей активно используются спутниковые снимки Sentinel-5, облачная вычислительная платформа Google Earth Engine (GEE) и программный комплекс ArcGIS.

В качестве района настоящего исследования выступает прикаспийский регион в границах, представленных на рис. 1.

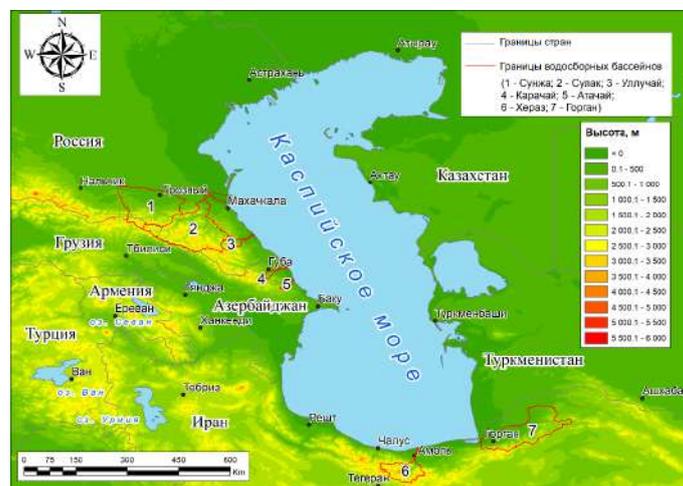


Рис. 1. Географическое положение района исследования [3]

В рамках исследования основное внимание уделяется бассейнам семи рек Каспийского региона. Это Сунжа, Сулак, Уллучай, Карачай, Атачай, Хераз и Горган. Методический подход, детально описанный в работах [4, 5], базируется на анализе данных со спутника Sentinel-5P. Для обработки информации о концентрации формальдегида была задействована облачная платформа GEE, позволяющая эффективно работать с большими массивами данных.

Обработку и визуализацию полученных результатов проводили с использованием программного обеспечения ArcGIS версии 10.8. Это позволило создать подробные географические карты и изучить динамику загрязняющих веществ в речных бассейнах. В частности, был выполнен анализ временных и пространственных изменений концентраций различных загрязнителей атмосферы на территориях бассейнов указанных рек.

Особое внимание уделялось распределению формальдегида. На рис. 2 представлена серия карт, демонстрирующая изменения содержания НСНО в прикаспийском регионе в разные периоды времени. Такой подход позволил получить наглядное представление о состоянии воздушной среды и выявить ключевые зоны повышенного загрязнения.

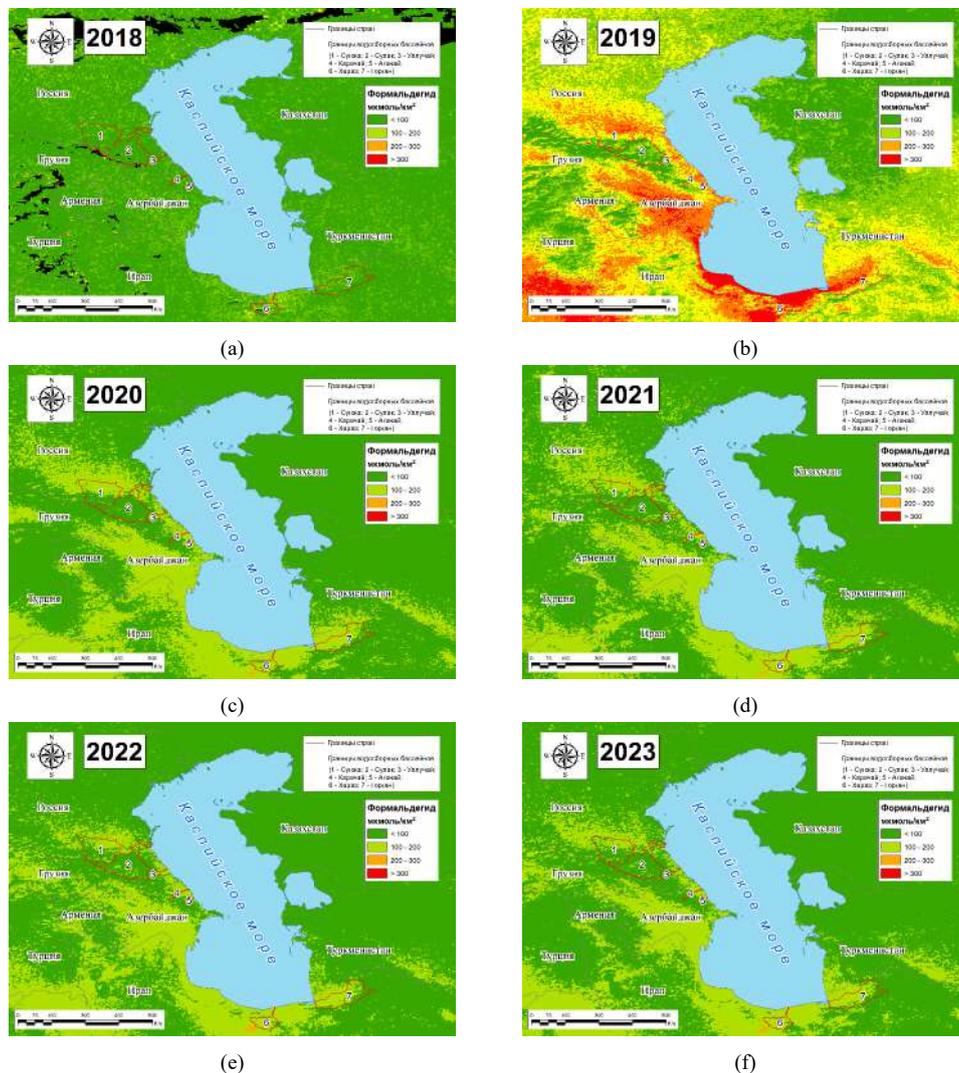


Рис. 2. Распределение содержания формальдегида (НСНО):
a — 2018 г.; b — 2019 г.; c — 2020 г.; d — 2021 г.; e — 2022 г.; f — 2023 г.

Как видно из рис. 2, наименьшие концентрации формальдегида наблюдаются на севере и востоке прикаспийского региона, для которых характерны равнинный рельеф и высокая перемешиваемость воздушных масс, а наибольшие — на западе и юге, в районе гор и возвышенностей. По содержанию

НСО в воздухе наиболее загрязнёнными являются бассейны рек Хераз ($126,5 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2}$) и Горган ($118,3 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2}$). Наименьшие концентрации характерны для рек Уллучай ($90,5 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2}$) и Сулак ($77,8 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2}$). Межгодовая динамика для бассейнов рек неоднородна. Так, 2020 г., период пандемии COVID-19, характеризовался понижением концентрации формальдегида во всех реках, кроме реки Карачай: там, напротив, выявлено повышение содержания НСО.

На исследуемой территории значения концентрации формальдегида сильно колеблются, и для семи бассейнов нет одинаковой выраженной тенденции (рис. 3).

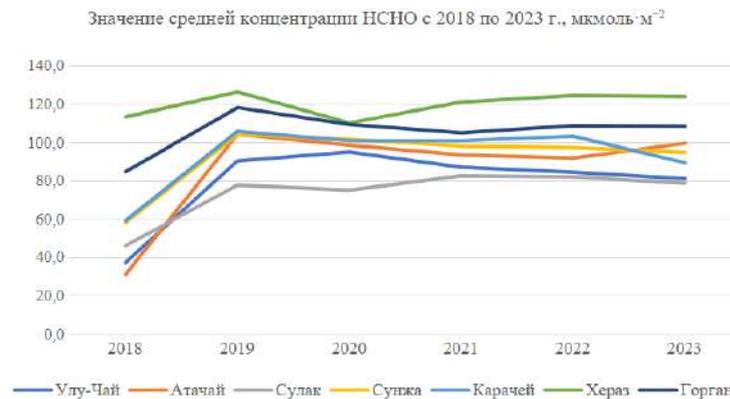


Рис. 3. Средние значения концентрации формальдегида (НСО) с 2018 по 2023 г. в бассейнах малых и средних рек Каспийского моря

В целом, как видно из рис. 3, в первые годы наблюдений загрязнение росло, а затем происходила стабилизация или отмечалось незначительное снижение уровней формальдегида к 2023 г. В 2018 г. значения были минимальными для всех бассейнов, причём в реках Сунжа, Сулак и Атачай концентрации не превышали $60 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2}$. Однако уже в 2019 г. произошёл существенный скачок загрязнения. Наиболее высокие показатели зафиксированы в бассейнах рек Хераз и Горган; концентрации формальдегида здесь превышали уровни в других бассейнах рек и оставались стабильно высокими на протяжении всего периода наблюдений. Например, в бассейне реки Хераз значения достигали $126,5 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2}$ в 2019 г. и сохранялись на уровне, превышающем $120 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2}$, даже в 2023 г. Бассейн реки Горган также характеризовался повышенными уровнями загрязнения: значения колебались в диапазоне $105\text{--}118 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2}$. Для остальных бассейнов отмечается менее выраженная динамика, хотя общая тенденция к росту концентраций в 2019–2020 гг. прослеживается и в них. После достижения пиковых значений в этот период уровни загрязнения начинают постепенно снижаться, но остаются выше показателей 2018 г. Так, в бассейнах рек Сунжа и Сулак значения после 2020 г. уменьшаются незначительно, оставаясь в пределах $94\text{--}98$ и $78\text{--}82 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2}$ соответственно. Динамика в бассейне реки Атачай более выражена: после резкого роста в 2019 г. до $104,4 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2}$ концентрации снижаются, но в 2023 г. снова возрастают, достигая $99,7 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2}$.

Анализ общей картины указывает на значительное влияние человеческой деятельности на уровень загрязнения формальдегидом, особенно в бассейнах рек в районах с высокой плотностью населения или с развитой промышленностью. Полученные результаты подчёркивают необходимость дальнейшего мониторинга состояния атмосферы, а также разработки и внедрения мер, направленных на снижение воздействия человека на окружающую среду. Спутниковые данные Sentinel-5P являются ключевым инструментом для оценки качества воздуха и анализа изменений в распределении загрязняющих веществ как во времени, так и в пространстве. Они предоставляют уникальную возможность глобального наблюдения, что обуславливает важность их использования при разработке эффективных экологических стратегий и достижении целей устойчивого развития. Благодаря широкому охвату и точности данных Sentinel-5P играет важнейшую роль в защите окружающей среды и улучшении качества жизни населения, позволяя не только выявлять проблемные районы, но и оценивать результативность принимаемых мер. Такой подход становится основой для долгосрочного планирования и прогнозирования экологической ситуации в регионе.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Российской Федерации в лице Минобрнауки России — гранта в форме субсидий на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технического развития (соглашение № 075-15-2024-644).

Список использованных источников

1. Santana F. O., Campos V. P., Santos I. F., Cruz L. P., Brito A. V. S. Seasonal quimiometric study of formaldehyde and acetaldehyde atmospheric levels and health risk assessment, in urban areas of Salvador-Bahia, Brazil // *Microchemical Journal*. 2019. Vol. 147. P. 524–531. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.03.069>. EDN: JDICDR
2. Singh S., Avtar R., Jain A., Alsulamy S., Ouda M. M., Kharrazi A. Identifying micro-level pollution hotspots using Sentinel-5P for the spatial analysis of air quality degradation in the National Capital Region, India // *Sustainability*. 2025. Vol. 17, iss. 5. Art. no. 2241 (24 p.). <https://doi.org/10.3390/su17052241>. EDN: POBPCP
3. Tabunshchik V., Dzhambetova P., Gorbunov R., Gorbunova T., Nikiforova A., Drygval P., Kerimov I., Kiseleva M. Delineation and morphometric characterization of small- and medium-sized Caspian Sea basin river catchments using remote sensing and GISs // *Water*. 2025. Vol. 17, iss. 5. Art. no. 679 (47 p.). <https://doi.org/10.3390/w17050679>. EDN: VBOVOQ
4. Tabunshchik V., Gorbunov R., Gorbunova T. Unveiling air pollution in Crimean mountain rivers: Analysis of Sentinel-5 satellite images using Google Earth Engine (GEE) // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, iss. 13. Art. no. 3364 (25 p.). <https://doi.org/10.3390/rs15133364>. EDN: SMVJGH
5. Tabunshchik V., Gorbunov R., Bratanov N., Gorbunova T., Mirzoeva N., Voytsekhovskaya V. Fatala River basin (Republic of Guinea, Africa): Analysis of current state, air pollution, and anthropogenic impact using geoinformatics methods and remote sensing data // *Sustainability*. 2023. Vol. 15, iss. 22. Art. no. 15798 (29 p.). <https://doi.org/10.3390/su152215798>. EDN: PXIVCX

УДК 550.370

Определение уровня подземных вод методом ВЭЗ в пределах бассейна реки Сунжа (на примере участка «Черноречье»)

Эльжаев А. С., Додуев А. А.

Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова,
Грозный, Россия

✉ aslambek.elzhaev@mail.ru

В статье представлены результаты применения метода вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) на участке «Черноречье», относящемся к бассейну реки Сунжа. Кратко описаны объект, методы и аппаратура исследования. Обработка полевых данных сводилась к построению качественных разрезов кажущегося сопротивления и геоэлектрических разрезов, анализ которых позволил сделать определённые выводы.

Ключевые слова: инженерная геофизика, ВЭЗ, кажущееся сопротивление, разность потенциалов, профиль

В последнее время для изучения экологических проблем всё чаще применяются методы инженерной геофизики. Связано это в основном с тем, что геофизические методы позволяют более детально изучить объект, не нарушая при этом его целостность [1, 2, 5–7]. Наибольшее распространение среди методов инженерной геофизики получили методы электроразведки, старейшим и наиболее применяемым из которых является метод вертикального электрического зондирования (далее — ВЭЗ). Существующие на сегодняшний день технологии электроразведки разработаны в основном на базе ВЭЗ [4].

На участке «Черноречье» (город Грозный) метод ВЭЗ нами применён для определения уровня подземных вод, а также для изучения инженерно-геологических условий.

Участок «Черноречье» находится в Чернореченском лесу (Шейх-Мансуровский район города Грозный) на территории водоохранной зоны.

Растительность района исследований представлена многолетними насаждениями дуба, ясеня и нескольких видов клёна (полевой, остролистный и татарский). Присутствуют граб, ольха и грецкий орех. Повсеместно распространена разнородная кустарниковая растительность.

Основной водной артерией района исследования является река Сунжа, пересекающая с юго-запада на северо-восток центральную часть города Грозный и имеющая ледниковое питание. В период интенсивного таяния ледников для реки характерен летний паводок. Средняя глубина реки составляет 1,5 м, средняя скорость течения — $0,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

В пределах участка геологический разрез представлен породами четвертичной и неогеновой систем, преимущественно суглинками, глинами, крупнообломочными грунтами (галечниковый, гравийный или щебенистый грунт с глинистым и песчано-глинистым заполнителем), местами песками, песчаниками и известняками.

Методика и техника исследования. ВЭЗ проводилось симметричной установкой Шлюмберже (рис. 1). Установка состоит из двух питающих электродов (заземлений), через которые в землю пропускается постоянный ток, и двух измерительных электродов, между которыми измеряется разность потенциалов. В качестве источника тока в питающей линии мы использовали аккумулятор. Для измерения разности потенциалов и силы тока, пропускаемого через землю, применялась переносная электроразведочная станция [3].

Величины разности потенциалов $AB/2$ изменялись от 1,5 до 150 мВ. На каждом разнесе измерялось значение тока в линии АВ и напряжения в линии MN. Результаты записывались в память измерительной аппаратуры и в полевой журнал.

Используемая в процессе исследования измерительная аппаратура включала измеритель «МЭРИ-24» и генератор «Астра-100». Измеритель «МЭРИ-24» позволяет определять параметры сигнала и получать результаты обработки в режиме реального времени. Генератор «Астра-100» способен обеспечить глубину исследований в диапазоне от первых метров до первых сотен метров.

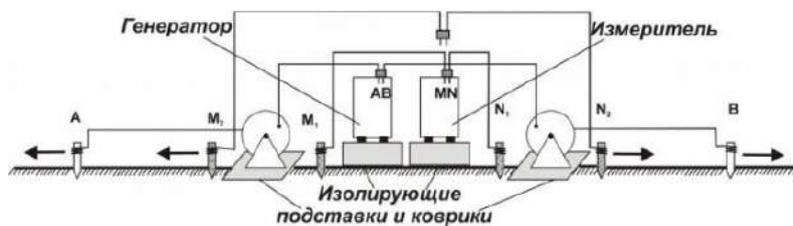


Рис. 1. Схема установки Шлюмберже

Зондирование проводилось по схеме профилей (рис. 2). Для более точной оценки результатов профили строились с многократным перекрытием.

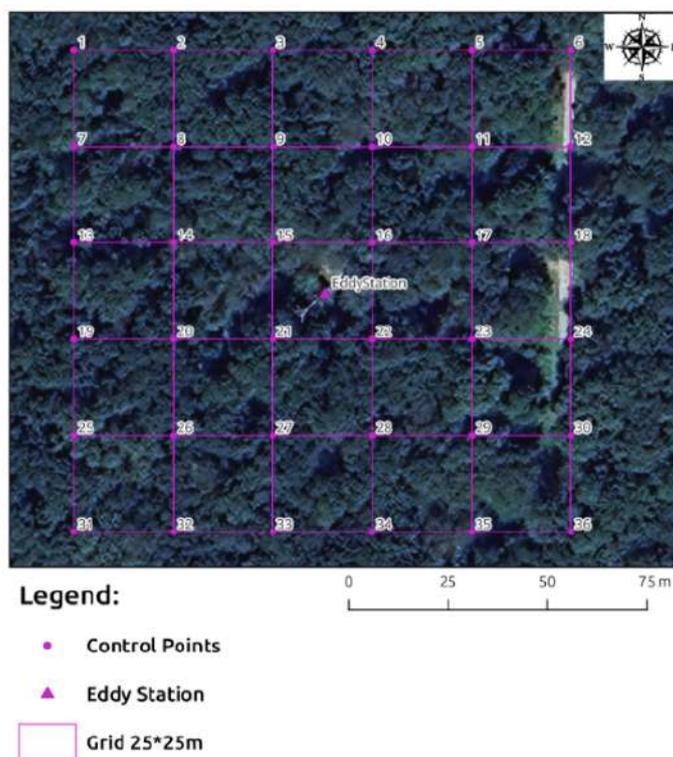


Рис. 2. Схема профилей

В качестве топоосновы при проведении полевых работ использована топографическая карта масштаба 1 : 25000. Система координат — WGS 84. Точки геофизических наблюдений закреплялись на местности по возможности деревянными колышками или маркировались краской. Каталог координат пунктов и точек геофизических наблюдений приведён в табл. 1.

Первичная оценка результатов ВЭЗ проводилась в полевых условиях, при необходимости выполнялись повторные измерения. Начальным этапом камеральной обработки был пересчёт полученных значений разности потенциалов в значения кажущегося сопротивления по формуле:

$$\rho_k = \frac{K (\Delta U)}{I}, \quad (4)$$

где ρ_k — кажущееся сопротивление ($\text{Ом} \cdot \text{м}^{-1}$);

K — коэффициент установки;

ΔU и I — измеренные разность потенциалов (в мВ) и ток в питающей линии (в мА) соответственно.

Таблица 1. Каталог координат пунктов и точек геофизических наблюдений

| № п/п | Наименование | Система координат WGS 84 | |
|-------|--------------|--------------------------|-------------|
| | | N | E |
| 1 | ВЭЗ-1 | 45.63547282 | 43.24302236 |
| 2 | ВЭЗ-2 | 45.63578074 | 43.24302065 |
| 3 | ВЭЗ-3 | 45.63608865 | 43.24301894 |
| 4 | ВЭЗ-4 | 45.63639657 | 43.24301722 |
| 5 | ВЭЗ-5 | 45.63670448 | 43.24301551 |
| 6 | ВЭЗ-6 | 45.63701239 | 43.24301379 |
| 7 | ВЭЗ-7 | 45.63547048 | 43.24279725 |
| 8 | ВЭЗ-8 | 45.63577840 | 43.24279554 |
| 9 | ВЭЗ-9 | 45.63608631 | 43.24279383 |
| 10 | ВЭЗ-10 | 45.63639422 | 43.24279212 |
| 11 | ВЭЗ-11 | 45.63670214 | 43.24279041 |
| 12 | ВЭЗ-12 | 45.63701005 | 43.24278869 |
| 13 | ВЭЗ-13 | 45.63546814 | 43.24257215 |
| 14 | ВЭЗ-14 | 45.63577605 | 43.24257044 |
| 15 | ВЭЗ-15 | 45.63608397 | 43.24256873 |
| 16 | ВЭЗ-16 | 45.63639188 | 43.24256701 |
| 17 | ВЭЗ-17 | 45.63669979 | 43.24256530 |
| 18 | ВЭЗ-18 | 45.63700770 | 43.24256359 |
| 19 | ВЭЗ-19 | 45.63546580 | 43.24234705 |
| 20 | ВЭЗ-20 | 45.63577371 | 43.24234534 |
| 21 | ВЭЗ-21 | 45.63608162 | 43.24234362 |
| 22 | ВЭЗ-22 | 45.63638954 | 43.24234191 |
| 23 | ВЭЗ-23 | 45.63669745 | 43.24234020 |
| 24 | ВЭЗ-24 | 45.63700536 | 43.24233848 |
| 25 | ВЭЗ-25 | 45.63546346 | 43.24212194 |
| 26 | ВЭЗ-26 | 45.63577137 | 43.24212023 |
| 27 | ВЭЗ-27 | 45.63607928 | 43.24211852 |
| 28 | ВЭЗ-28 | 45.63638719 | 43.24211681 |
| 29 | ВЭЗ-29 | 45.63669510 | 43.24211509 |
| 30 | ВЭЗ-30 | 45.63700301 | 43.24211338 |
| 31 | ВЭЗ-31 | 45.63546112 | 43.24189684 |
| 32 | ВЭЗ-32 | 45.63576903 | 43.24189513 |
| 33 | ВЭЗ-33 | 45.63607694 | 43.24189342 |
| 34 | ВЭЗ-34 | 45.63638485 | 43.24189170 |
| 35 | ВЭЗ-35 | 45.63669276 | 43.24188999 |
| 36 | ВЭЗ-36 | 45.63700067 | 43.24188828 |

Полевые данные обрабатывались в специализированной программе ZondIP1d, предназначенной для одномерной интерпретации профильных данных различных модификаций ВЭЗ. Удобный интерфейс и широкие возможности представления данных позволили максимально эффективно решить поставленную геологическую задачу.

Процесс обработки и интерпретации данных метода ВЭЗ состоял в следующем: для полевой кривой ВЭЗ подбирались расчётная кривая (рис. 3). При существенном отклонении одной из точек полевой кривой ВЭЗ от расчётной производилась её корректировка. Такие отклонения могут быть вызваны локальными неоднородностями, подземными коммуникациями, помехами, особенностями рельефа и др.

Результаты измерений. Результатом геофизических работ, проведённых на участке «Черноречье», служат построенные разрезы кажущегося сопротивления и геоэлектрические разрезы по всем шести профилям. В качестве примера на рис. 4 представлены разрез кажущегося сопротивления (4а) и геоэлектрический разрез (4б) по профилю 1.

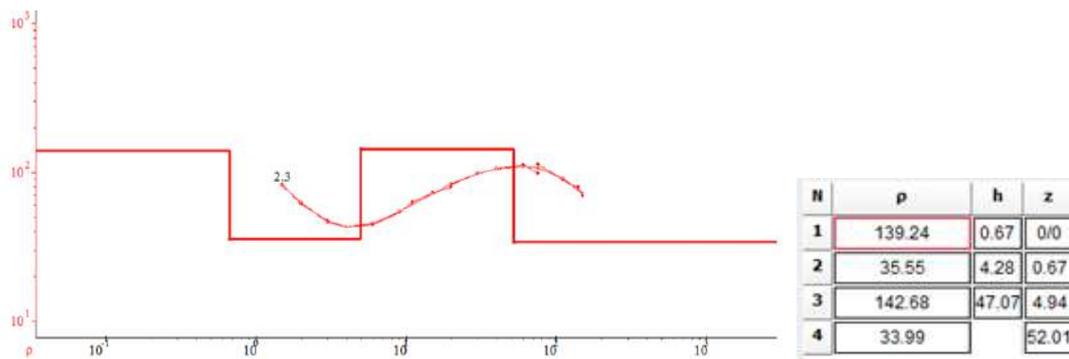
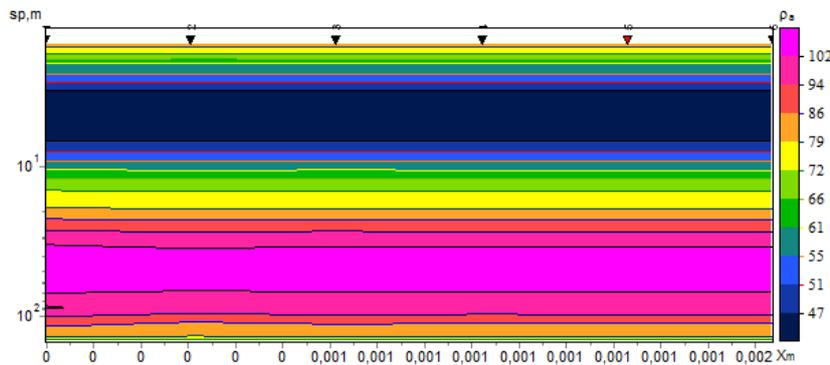
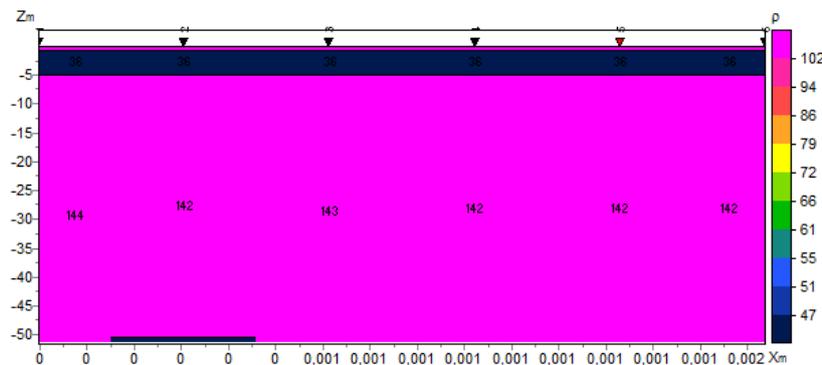


Рис. 3. Результат полевой (первичной) обработки данных ВЭЗ



(а)



(б)

Рис. 4. Результат обработки данных электрических зондирований по профилю 1:
 а — разрез кажущегося сопротивления; б — геоэлектрический разрез

Выводы. Анализ полученных разрезов показал, что:

1. Участок исследован методом вертикального электрического зондирования до глубины 55 м.
2. Геоэлектрические разрезы, построенные по полученным в точках электрических зондирований с шагом 25 м результатам, характеризуются как однотипные.
3. Верхний слой разреза исследуемого участка литологически представлен песками. На это указывают зарегистрированные значения кажущегося сопротивления.
4. Значения кажущегося сопротивления второго слоя характерны для гравийно-галечниковых отложений.
5. Третий (нижний) слой, так же как и верхний, представлен песками.
6. Верхняя часть разреза с глубины 4,28 м является низкоомной ($35,55 \text{ Ом} \cdot \text{м}^{-1}$), что характерно для водонасыщенных грунтов.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта «Динамика геоэкологического состояния бассейнов горных рек Северо-Восточного Кавказа, Азербайджана и Ирана в условиях изменения климата и растущей антропогенной нагрузки» (соглашение № 075-15-2024-644).

Список использованных источников

1. Заалишвили В. Б., Голик В. И. Геофизическое обеспечение горного производства // Геология и геофизика Юга России. 2024. Т. 14, № 3. С. 85–98. <https://doi.org/10.46698/t6803-6487-0430-d>. EDN: QGZEXT
2. Керимов И. А., Эльжаев А. С., Додуев А. А. Геофизические исследования на карбоновом полигоне Чеченской Республики // Геология и геофизика Юга России. 2023. Т. 13, № 3. С. 49–62. <https://doi.org/10.46698/VNC.2023.42.75.004>. EDN: AFJCUJ
3. Марченко М. Н. Вертикальное электрическое зондирование : учебное пособие. Москва, 2013. 28 с.
4. Хмелевской В. К. Электроразведка: учебное пособие для студентов вузов. Москва : Издательство Московского университета, 1984. 421 с.
5. Hauck C., Kneisel C. Applied Geophysics in Periglacial Environments. Cambridge : Cambridge University Press, 2008. 256 p. <https://doi.org/10.1017/CB09780511535628>
6. Zakaria M. T., Mohd Muztaza N., Zabidi H., Nadhira Salleh A., Mahmud N., Najmi Rosli F. Integrated analysis of geophysical approaches for slope failure characterisation // Environmental Earth Sciences. 2022. Vol. 81, iss. 10. Art. no. 299 (21 p.). <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10410-z>
7. Керимов И. А., Эльжаев А. С., Додуев А. А. Карбоновый полигон Чеченской Республики: III. Геофизические исследования на карбоновой ферме // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2022. Т. 16, № 4. С. 60–67. <https://doi.org/10.31161/1995-0675-2022-16-4-60-67>. EDN: ZKPGRF

УДК 551.331

Методы определения расходов воды малых горных рек на примере Кабардино-Балкарской Республики

Чигирова Л. Б.

Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия

✉ leilyach@yandex.ru

Обработаны данные многолетних наблюдений максимальных расходов воды на гидрологических постах основных рек Кабардино-Балкарской Республики (КБР) — Малка, Баксан, Чегем и Черек. Выбраны максимальные ливневые осадки (период более 40 лет), которые зафиксированы на метеорологических станциях ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$), расположенных в горных районах КБР. На основе анализа архивных данных наблюдений и существующих гидрологических расчётных формул предложен территориальный метод определения значений максимального расхода воды и модуля стока разной процентной обеспеченности паводкового потока для малых горных рек Северного Кавказа (на примере КБР). Изложены новизна и эффективность использования территориального метода при обобщении гидрологической информации и при решении современных проблем инженерных гидрологических расчётов с возможностью дальнейшей разработки оптимальных методов инженерной защиты населённых пунктов и их инфраструктуры от паводков, а также от наносоводных и селевых потоков.

Ключевые слова: расход и модуль стока, паводки, наносоводный поток, гидрологические параметры, осадки

В Северо-Кавказском регионе сток малых горных рек составляет около 80 % от общего объёма стока. Учёные-гидрологи отмечают, что гидрологическая изученность малых рек значительно хуже, чем средних и больших [2, 3]. Реки классифицируются по длине русла (L , км): самые малые — < 10 км; малые — 11–100 км; средние — 101–500 км; большие — > 500 км. [3]. Самые малые и малые реки тесно связаны с окружающим природным ландшафтом и более уязвимы, чем средние и большие водотоки. К тому же за последние 50 лет многие гидрологические посты прекратили работу по разным причинам. В связи с глобальным изменением климата и интенсивным экономическим и рекреационным освоением горных территорий весьма актуальным становится вопрос гидрологического исследования малых рек.

Основной принцип анализа гидрометеорологической информации за многолетний период наблюдений за расходом воды и количеством осадков в настоящей статье — территориальный; районирование по Черекскому, Чегемскому, Баксанскому и Малкинскому ущельям. В каждом ущелье гидрометеорологические условия формирования речного стока на малых реках имеют свою специфику как по источникам питания, так и по атмосферным осадкам и температуре [1].

Цель исследования — разработка территориального метода определения максимальных значений расхода воды малых рек на примере Кабардино-Балкарской Республики (далее — КБР).

Материал и методы исследования. Объект исследования — гидросеть бассейнов основных рек КБР, расположенных в горной и предгорной части. Исходными данными являются многолетние наблюдения за максимальными расходами воды рек на гидрологических постах и максимальными ливневыми осадками (более 40 лет), зафиксированными на метеорологических станциях, которые расположены в горных районах КБР.

Результаты и обсуждение. Верховья водосборных бассейнов рек Малка, Баксан, Чегем и Черек расположены на северном склоне центральной части Главного Кавказского хребта. Они являются притоками первого, второго и третьего порядка речной сети реки Терек. Рельеф сложный. Он характеризуется большой расчленённостью территории с глубоко врезаемыми речными долинами и склонами различной крутизны и экспозиции, где перепады абсолютных высот рельефа местности достигают 1000–4000 м. Именно поэтому территория представляет собой оптимальный полигон для различного рода гидрологических исследований.

Действующие гидрологические посты на территории КБР расположены в следующих населённых пунктах и реках: в станции Александровская (в станции Котляревская до 2024 г.) — река Терек; городе Прохладный, селе Каменноостское — река Малка; городе Тырныауз, сельском поселении Заюково — река Баксан; городе Тырныауз — река Герхожансу; сельском поселении Нижний Чегем — река Чегем; сельском поселении Бабугент — река Черек Балкарский, река Черек Хуламский; сельском поселении Белая Речка — река Нальчик; сельском поселении Кременчуг-Константиновское — река Куркужин.

Общая площадь водосборных бассейнов указанных рек в горной части КБР составляет около 3,2 тыс. км², то есть более 25 % от общей территории КБР (12,5 тыс. км²). Здесь зарегистрированы 112 селеносных водотоков общей водосборной площадью 2,1 тыс. км² [8].

В паводковый период (апрель — сентябрь) средняя температура воздуха положительна до высоты 3000 м; максимальная температура отмечается в июле — августе (до +35 °С). Это способствует интенсивному таянию накопившегося зимой снега в горах и увеличению расхода воды в реках.

Максимальные значения среднемесячных сумм осадков в равнинной части республики отмечаются в мае и июне, а в горной части — в июле и августе и составляют примерно 40–50 % от годового количества осадков [4]. Предельные значения суточных осадков варьируют от 50 до 120 мм, и осадки 30 мм и более за 1 ч имеют интенсивность 0,5–2,0 мм·мин⁻¹ [1].

Максимальные суточные значения дождевых осадков 1%-ной обеспеченности по метеорологическим станциям КБР составляют: Усенги (Тегенекли) — 77 мм; Терскол — 90 мм [12]; Баксан — 120 мм; Нальчик — 103 мм [12]. По данным метеостанции Терскол (абсолютная высота — 2010 м), 4 и 5 августа 1967 г. зафиксировано 85,7 мм ливневых осадков с максимальной интенсивностью 0,4 мм·мин⁻¹ [8].

При наложении интенсивного таяния снежников и выпадения обильных осадков нередко образуются паводки значительной разрушительной силы.

В гидрологии материалов по изучению формирования максимальных расходов воды горных рек немного. В данной работе приводятся известные и рекомендуемые для практического использования методы расчёта расхода воды малых горных рек на основе обобщения гидрометеорологической информации.

Методы расчёта максимальных дождевых расходов воды. Метод 1. При площади водосбора $F > 200$ км² и при средней высоте водосбора $H_{cp} > 1000$ м при отсутствии рек-аналогов расчётная формула для определения расхода $Q_{P\%}$ по фактически наблюдаемым данным имеет вид [6, 9, 10, 13]:

$$Q_{P\%} = q_{200} \cdot \left(\frac{200}{F}\right)^n \cdot \lambda_{P\%} \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \cdot F, \quad (5)$$

где $Q_{P\%}$ — максимальный расход воды реки (м³·с⁻¹) заданной вероятности превышения $P\%$;

q_{200} — модуль максимального срочного расхода воды ежегодной вероятности превышения $P = 1\%$, приведённый к условной площади водосбора 200 км²;

n — показатель степени редукции в бассейне реки в зависимости от высоты водосбора;

δ_1 и δ_2 — коэффициенты, учитывающие зарегулированность и заболоченность водосборного бассейна соответственно (для горных рек $\delta_1 = \delta_2 = 1$ [6]);

$\lambda_{P\%}$ — переходный коэффициент от максимальных срочных расходов воды ежегодной вероятности превышения $P = 1\%$ к максимальным расходам воды другой вероятности превышения, $P < 25\%$.

Модуль максимального стока, q_{200} , приведённый к площади водосбора 200 км², вычисляется обратным путём по формуле:

$$q_{200} = \frac{q_{1\%}}{K}, \quad (6)$$

где $q_{1\%}$ — отношение расхода воды 1%-ной обеспеченности к площади водосбора, полученное по фактическим данным наблюдений на гидрологическом посту (более 40 лет).

Коэффициент K в формуле (6) определяется по следующей зависимости:

$$K = \left(\frac{200}{F}\right)^n. \quad (7)$$

Метод 2. Расчётная формула для определения расхода $Q_{p\%}$ на водосборах площадью менее 200 км² имеет вид [6, 9, 10]:

$$Q_{p\%} = q'_{1\%} \cdot \varphi \cdot H_{1\%} \cdot \delta \cdot \lambda_{p\%} \cdot F, \quad (8)$$

где $q'_{1\%}$ — относительный модуль максимального срочного расхода воды ежегодной вероятности превышения 1%-ной обеспеченности;

φ — сборный коэффициент стока;

δ — коэффициент зарегулированности рек озёрами и болотами (при озёрности и заболоченности менее 2 % $\delta = 1$).

Этот модуль определяется по следующей зависимости:

$$q'_{1\%} = \frac{q_{1\%}}{\varphi \cdot H_{1\%}}, \quad (9)$$

где $H_{1\%}$ — максимальный суточный слой осадков вероятности превышения $P = 1\%$ обеспеченности, определяемый по данным ближайших метеостанций, мм.

Метод 3. При наличии данных многолетних наблюдений (более 20 лет) можно использовать метод гидрологической аналогии для определения максимальных расходов воды малых горных рек ($\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$) [5, 9, 13].

$$Q_{p1\%} = q_{a1\%} \cdot \left(\frac{F_a + 1}{F_i + 1} \right)^{0,15} \cdot F_i, \quad (10)$$

где $q_{a1\%}$ и F_a — модуль максимального стока и площадь реки-аналога в расчётном створе горных водотоков;

F_i — значение площади водосбора реки.

Метод 4. Расчётный максимальный модуль стока q_{max} ($\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$) малых горных рек с площадями водосборов $F < 200 \text{ км}^2$ при $H_{\text{ср}} > 1500 \text{ м}$ определяется по формуле [6, 8–10]:

$$q_{\text{max}} = 16,67 \cdot r \cdot \varphi \cdot H_{1\%} \cdot \Psi_{(\tau\delta)}, \quad (11)$$

где r — коэффициент зарегулированности (для горных рек принимается $r = 1$);

φ — сборный коэффициент стока для горных рек КБР (при предварительном насыщении почвы поверхности береговых склонов рекомендуют принять в пределах 0,3–0,7, а для практического расчёта конкретных малых рек в гидросети бассейна основных рек-аналогов определяется в зависимости от средней абсолютной высоты бассейна по таблице);

$H_{1\%}$ — максимальный суточный слой осадков 1%-ной обеспеченности (фактические наблюдения по ближайшей метеостанции);

$\Psi_{(\tau\delta)}$ — величина кривой редукции интенсивности осадков в зависимости от времени бассейнового добегания стока (определяется обратным путём в зависимости от расчётных значений рек-аналогов).

Расчётные значения характеристик малых горных рек, полученные по данным наблюдений, приведены в табл. 1.

Выводы:

1. Уточнённые на основе региональных обобщённых гидрологических данных наблюдений (более 40 лет) поправочные коэффициенты ($\varphi_{1\%}$, $\Psi_{(\tau\delta)}$, q_{200} и др.) предлагается использовать при выполнении гидрологических расчётов по формулам (5), (6), (8) и (10) для малых горных рек.
2. Предложенный территориальный метод расчётов гидрологических характеристик (расхода воды и модуля стока) для малых горных рек даёт возможность составления расчётной компьютерной программы и моделирования процессов формирования наносоводного и селевого потока.
3. Одновременно зная максимальный расход воды дождевого паводка, можно рассчитать возможный максимальный расход селевого потока на селеносных водотоках.

4. Расчётные значения максимальных расходов необходимы при проектировании инженерных защитных сооружений.

Таблица 1. Рассчитанные значения характеристик рек, полученные по данным наблюдений

| Река, населённый пункт | Площадь водосбора, F (км ²) | Сборный коэффициент стока | Суточное количество осадков 1%-ной обеспеченности | $q_{1\%}$ (м ³ ·с ⁻¹ ·м ⁻²) | Коэффициент кривой редукции, $\Psi(\tau\delta)$ | q_{200} (м ³ ·с ⁻¹ ·м ⁻²) |
|--|--|---------------------------------|---|--|--|--|
| | Средняя высота водосбора, Н _{ср} (м) | | | | | |
| Малка, сельское поселение Каменноостское | $\frac{1540}{2000}$ | 0,21 | 120 | 0,180 | 0,0004 | 0,27 |
| Баксан, город Тырнауз | $\frac{838}{3090}$ | 0,61 | 100 | 0,30 | 0,0003 | 0,40 |
| Баксан, сельское поселение Заюково | $\frac{2100}{2320}$ | 0,40 | 120 | 0,176 | 0,0002 | 0,28 |
| Чегем, сельское поселение Нижний Чегем | $\frac{433}{2900}$ | 0,36 | 120 | 0,211 | 0,0003 | 0,25 |
| Черек Балкар- ский, сельское поселение Бабугент | $\frac{695}{2590}$ | 0,60 | 100 | 0,353 | 0,0004 | 0,455 |

Список использованных источников

1. Анахаев К. Н., Гегиев К. А. и др. Методические рекомендации по обеспечению противоселевой безопасности (ч. 1). Нальчик: КБГАУ – ВГИ, 2016. 59 с.
2. Вендров С. П. Жизнь наших рек. Ленинград : Гидрометеиздат, 1986. 111 с.
3. Водогрещкий В. Е. Антропогенное изменение стока малых рек. Ленинград : Гидрометеиздат, 1990. 175 с.
4. Залиханов М. Ч. Закономерности в распределении снежного покрова в горах Кабардино-Балкарии. Труды ВГИ. 1967. Вып. 6. С. 125–136. EDN: [WSSKXX](#)
5. Кадастр селевой опасности юга европейской части России / Н. В. Кондратьева, А. Х. Аджиев, М. Ю. Беккиев, М. М. Гедуева (Гяургиева), В. Ф. Перов, В. В. Разумов, И. Б. Сейнова, Л. В. Хучунаева. Москва : Феория; Нальчик: Печатный двор, 2015. 148 с. EDN: [VHKUJH](#)
6. Куприянов В. В. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 8. Северный Кавказ. Ленинград : Гидрометеиздат, 1973. 411 с.
7. Рождественский А. В., Лобанова А. Г. Современная проблема инженерных гидрологических расчётов по обобщению гидрологической информации в России и пути её решения // Метеорология и гидрология. 2011. № 7. С. 81–95. EDN: [NWFLAX](#)
8. Сейнова И. Б., Богаченко Е. М. и др. Опыт прогнозирования селей в условиях деградации оледенения на Центральном Кавказа // Геориск. 2018. Т. 12, № 4. С. 26–37. EDN: [YTNXLN](#)
9. СН 435-72 Указания по определению расчётных гидрологических характеристик. Ленинград : Гидрометеиздат. 27 с.

10. СП 33-101-2003 Определение основных расчётных гидрологических характеристик. Москва, 2004. 83 с.
11. Справочник по климату. Вып. 13. Влажность воздуха, атмосферные осадки, снежный покров. Ч. 4. Ленинград : Гидрометеиздат, 1968. 352 с.
12. Таланов Е. А., Херхеулидзе Г. И. Пространственно-временные закономерности характеристик ливневых осадков и селевых потоков на Кавказе // Геориск. 2018. Т. 12, № 4. С. 96–113. EDN: [VRCKVS](#)
13. Чебатарев А. И. Каталог по максимальному дождевому стоку рек СССР. Ленинград : Гидрометеиздат, 1972. 247 с.

UDC 528.91:551.577.61

A novel index for flash flood mapping in GIS environment: Case study in Brazil

Miranda F., Rezende O., Haddad A., and Miguez M.

The Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil

✉ francismiranda@poli.ufrj.br

This study presents a novel methodology for flash flood susceptibility mapping, while critically examining the conceptual challenges in defining this phenomenon within scientific literature.

Keywords: flash floods, GIS, flood susceptibility mapping

Floods can be classified as the most frequent natural disaster, affecting the largest number of people, and ranking third in economic losses worldwide. Between 2000 and 2021, floods accounted for 40% of all disasters, increasing to 50% in the period from 2006 to 2021. Asia and South America are the most affected continents, respectively [1, 2].

By the end of 2021, approximately 56% of the global population was considered urban. In Brazil, this figure reaches 87% of the population [3]. The main impacts on the local hydrological cycle associated with urbanization include reduced vegetation interception, evapotranspiration, and infiltration, as well as increased surface runoff volume and velocity due to pavement and artificial modifications to drainage systems [4].

A flood can be broadly defined as the ‘temporary covering by water of normally dry land,’ with its drivers varying significantly [5]. Coastal floods, for example, are typically caused by storm surges, wave action, or tsunamis. Urban flooding results from rainfall in cities, while groundwater flooding arises from exfiltration processes [6, 7]. However, there is a lack of precise definition for flash floods in scientific literature as shown in Table 1 [8–10].

Studies, such as Liu, Yuan, *et al.* and Liu, Ma, *et al.*, argue that flash flood phenomena are associated with small watersheds, defined by contributing areas between 10 and 50 km² according to the classification of the Flash Flood Investigation and Dataset of China (FFIEDC) [14, 15].

Liu, Ma, *et al.* assessed flood risk across a significant portion of Chinese territory by applying Principal Component Analysis to 83 indicators from the China National Flash Flood Disaster Investigation and Assessment Database for sub-basins ranging 10 to 50 km² [15]. Results showed that hazard was characterized by 4 indicators, including 2 related to precipitation events over 3- and 6-hour durations, and 2 others associated with peak discharge and lag time. Exposure was assessed through 3 indicators: population size, number of buildings, and residential properties. Vulnerability incorporated 3 indicators: structural fragility of buildings, density of automated hydrometeorological monitoring stations, and density of basic monitoring stations. The results were statistically analyzed and presented by watershed sub-basin.

Studies that address both quantitative and qualitative distinctions between flood types remain scarce. Bhattacharya *et al.* developed an index for quantitative classification between gradual river floods (floods) and flash flood events through analysis of inflow hydrograph components, which requires an extensive streamflow monitoring network [16].

Rockembach discusses the lack of quantitative parameters for characterizing flash flood events and notes the absence of consensus regarding a precise definition of the term. As a contribution to the field, the author conducted a series of three-dimensional computational simulations with variations in channel bed slope. These simulations aimed to compare results based on numerical oscillations using both hydrostatic and non-hydrostatic pressure approximation schemes [17].

Kobiyama and Goerl proposed a quantitative method for distinguishing between floods and flash floods based on event response time using the Operational Efficiency Index (OEI). When OEI > 1, the flood

Table 1. Examples of definition for floods and flash floods

| Reference | Type | Definition |
|-----------------|-------------|--|
| IRDR [11] | Flood | A general term for the overflow of water from a stream channel onto normally dry land in the floodplain (riverine flooding), higher-than-normal levels along the coast and in lakes or reservoirs (coastal flooding), as well as ponding of water at or near the point where the rain fell (flash floods) |
| | Flash Flood | Heavy or excessive rainfall in a short period of time that produces immediate runoff, creating flooding conditions within minutes or a few hours during or after the rainfall |
| UNESCO [12] | Flood | The temporary covering by water of land not normally covered by water. The nature of the flood can vary significant depending on the driving source, for example coastal floods (storm surge, wave overtopping, and tsunamis), fluvial floods (caused by rainfall – such floods can range from lowland floods that develop slowly to rapid-onset flash floods), pluvial floods (caused by rainfall directly on the urban area), and groundwater floods |
| | Flash Flood | Flash floods represent a unique subset in the range of flood hazards. Flash floods rise quickly, frequently with limited or no warning, and giving rise to fast-moving and rapidly rising waters with enough force to destroy property and take lives. Flash floods are the most deadly of floods, and worldwide are responsible for the largest number of flood-related deaths and high flood mortality rates |
| NOAA/ USGS [13] | Flood | An overflow of water onto normally dry land. The inundation of a normally dry area caused by rising water in an existing waterway, such as a river, stream, or drainage ditch. Ponding of water at or near the point where the rain fell. Flooding is a longer-term event than flash flooding: it may last days or weeks |
| | Flash Flood | A flood caused by heavy or excessive rainfall in a short period of time, generally less than 6 hours. Flash floods are usually characterized by raging torrents after heavy rains that rip through river beds, urban streets, or mountain canyons sweeping everything before them. They can occur within minutes or a few hours of excessive rainfall. They can also occur even if no rain has fallen, for instance after a levee or dam has failed, or after a sudden release of water by a debris or ice jam |

is classified as ‘normal’ with adequate time for life-saving and damage mitigation. Conversely, when $OEI < 1$, the event is classified as a flash flood, characterized by insufficient response time for life-saving measures and associated with high impact. Thus, the OEI serves to differentiate floods from flash floods in terms of disaster management rather than natural phenomena characteristics [18].

Despite qualitative differences in flood properties (Fig. 1), there is no consensus in the scientific literature on a precise quantitative definition of flash floods. Existing definitions of floods (flood) may or may not encompass flash floods. Furthermore, the standalone term ‘flood’ is often specifically associated with gradual/riverine flooding [17, 19, 20]. It should also be emphasized that a single hydrological event may combine two or more flood types, depending on the topography of the watershed under analysis.

In this sense, the present study considers the definition for flash floods as ‘*the temporary inundation of land not normally submerged, occurring in high slope areas due to drainage network overflow*’ and presents a GIS mapping tool for flash floods using a basin in Rio de Janeiro state, Brazil, as case study.

Material and Methods. The method entails a critical discussion on the potential minimal representative set of commonly used variables, along with the independent selection of indicators, normalization classes, weights, and the final formulation itself (Fig. 2). Validation is based on comparisons with results from hydrologic-hydrodynamic models of study area watersheds, using the ModCel software [21].

| Flash Flood | Characteristics | Fluvial Flood |
|-------------|---------------------------------|---------------|
| ↑ | Terrain slope | ↑ |
| ↑ | Flow velocity / Velocity Factor | ↑ |
| ↑ | Water height | ↑ |
| ↑ | Extent of flooded area | ↑ |

Fig. 1. Qualitative differences between fluvial and flash flood properties

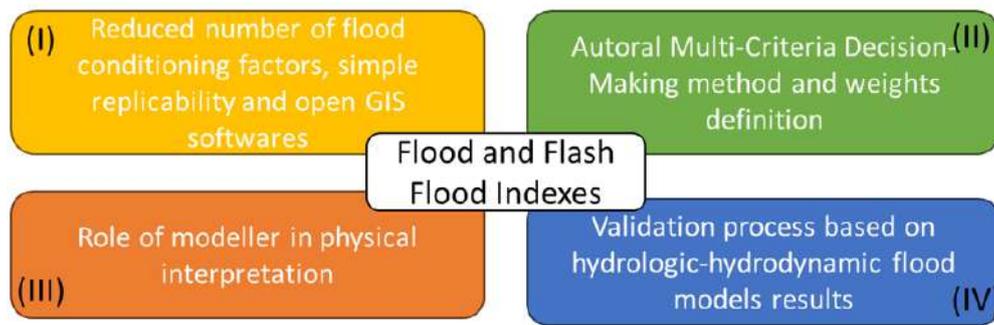


Fig. 2. Main aspects of flood susceptibility mapping methodology adopted

As a proposal for mapping areas susceptible to flash floods, this study preliminarily introduces the Physical Susceptibility to Flash Floods Index (PhySFLI), adopting assumptions previously applied to a river flood susceptibility index developed by the authors for fluvial flood mapping, termed the Physical Susceptibility to Floods Index (PhySFI) [22]:

$$PhySFI = I_S^{E1} \cdot (c1 \cdot I_{IMP} + c2 \cdot I_{PROX} + c3 \cdot I_{ELEV})^{E2}, \quad (12)$$

$$PhySFI = I_S^{FF E1} \cdot (c1 \cdot I_{IMP} + c2 \cdot I_{PROX}^{FF})^{E2}, \quad (13)$$

where I_S is Slope Indicator;

I_{IMP} is Imperviousness Indicator;

I_{PROX} is Proximity to Drainage Network Indicator;

I_E is Elevation Indicator.

In this context, several indicators have been tested, with particular emphasis on adaptations of the Slope Indicator (I_S) and the Proximity to Drainage Network Indicator (I_{PROX}). Longitudinal slope acts inversely on these phenomena, as does the shape of adjacent cross-sectional areas. A preliminary proposal for the slope indicator adapted to flash floods (Flash Flood Slope Indicator – I_S^{FF}) is presented in Table 2.

Like the slope adaptation, the Flash Flood Proximity to Drainage Network Indicator (I_{PROX}^{FF}) modifies the original Proximity to Drainage Network Indicator (I_{PROX}) to account for flash flood dynamics, such as channel steepness and short concentration times. The proposed criteria for I_{PROX}^{FF} are detailed in Table 3.

Results and Conclusion. Equation (14) introduces a homogeneous weighting scheme as a preliminary measure *prior* to the validation phase. Preliminary map result using Eq. (14) is presented in Fig. 3.

$$PhySFI = I_S^{FF 0.5} \cdot (0.5 \cdot I_{IMP} + 0.5 \cdot I_{PROX}^{FF})^{0.5}. \quad (14)$$

Table 2. Proposed values for the I_S FF

| Slope for drainage categories | Slope ranges (%) | I_S | I_S FF |
|-------------------------------|------------------|-------|----------|
| Critical | ≤ 1.5 | 100 | 0 |
| Acceptable | 1.5–3.0 | 75 | 25 |
| Adequate | 3.0–5.0 | 50 | 50 |
| Good | 5.0–8.0 | 25 | 75 |
| Very good | > 8 | 0 | 100 |

Table 3. Proposed values for the I_{PROXFF}

| Distance (D) from Main River Network (m) | Slope (%) | | | | |
|---|-----------|---------------------|---------------------|---------------------|------------|
| | > 8.0 | $5.0 < \% \leq 8.0$ | $3.0 < \% \leq 5.0$ | $1.5 < \% \leq 3.0$ | ≤ 1.5 |
| ≤ 30 | 100 | 100 | 75 | 50 | 25 |
| $30 < D \leq 50$ | 100 | 75 | 50 | 25 | 0 |
| $50 < D \leq 75$ | 75 | 50 | 25 | 0 | 0 |
| $75 < D \leq 100$ | 50 | 25 | 0 | 0 </td <td>0</td> | 0 |

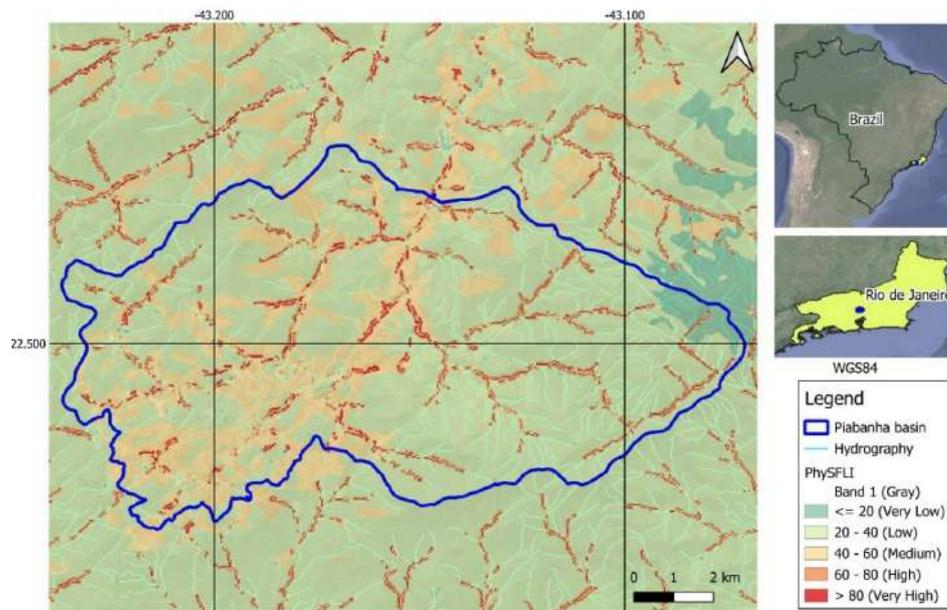


Fig. 3. Preliminary results of PhysSFLI applied in a 110-km² basin in Rio de Janeiro, Brazil

This study proposes the Physical Susceptibility to Flash Floods Index (PhysSFLI), a GIS-based tool adapted for flash flood dynamics in steep, urbanized watersheds. Preliminary results demonstrate its applicability in a Brazilian case study, aligning with hydrodynamic model validations. The index addresses gaps in quantitative flash flood definitions by integrating slope and proximity-to-network indicators tailored to rapid-onset events. Future refinements will focus on weighting optimization and broader regional validation to enhance predictive accuracy.

References

1. EM-DAT Public Database. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED).
2. Wannous C., Velasquez G. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR) – UNISDR’s contribution to science and technology for disaster risk reduction and the role of the International Consortium on Landslides (ICL). In: *Advancing Culture of Living with Landslides*. WLF 2017 / K. Sassa, M. Mikoš, Y. Yin (Eds). Springer, Cham, 2017, pp. 109–115. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59469-9_6
3. Pörtner H.-O. et al. 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*. Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2022. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
4. Scheuler T. R. *Controlling Urban Runoff: A Practical Manual for Planning and Designing Urban BMPs*. Washington, DC : Metropolitan Washington Council of Governments, 1987.
5. Sayers P., Li Y., Galloway G., Penning-Rowsell E., Shen F., Wen K., Chen Y., Le Quesne T. *Flood Risk Management: A Strategic Approach*. UNESCO, 2013. 204 p.
6. Zain A., Legono D., Rahardjo A. P., Jayadi R. Review on co-factors triggering flash flood occurrences in Indonesian small catchments // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 930. Art. no. 012087 (9 p.). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/930/1/012087>
7. Cloutier C.-A., Buffin-Bélanger T., Larocque M. Controls of groundwater floodwave propagation in a gravelly floodplain // *Journal of Hydrology*. 2014. Vol. 511. P. 423–431. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.014>
8. Maqтан R., Othman F., Wan Jaafar W. Z., Sherif M., El-Shafie A. A scoping review of flash floods in Malaysia: Current status and the way forward // *Natural Hazards*. 2022. Vol. 114, iss. 3. P. 2387–2416. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05486-6>. EDN: GPRIXM
9. Rockembach F. A. *Análise hidrodinâmica de enxurradas por meio de simulação numérica*. Universidade do Estado de Santa Catarina (UFSC), 2022.
10. Schroeder A. J., Gourley J. J., Hardy J., Henderson J. J., Parhi P., Rahmani V., Reed K. A., Schumacher R. S., Smith B. K., Taraldsen M. J. The development of a flash flood severity index // *Journal of Hydrology*. 2016. Vol. 541, part A. P. 523–532. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.005> EDN: XTIXEH
11. *Integrated Research on Disaster Risk. Peril Classification and Hazard Glossary (IRDR DATA Publication No. 1)*. Beijing : Integrated Research on Disaster Risk, 2014. 24 p.
12. Sayers P., Li Y., Galloway G., Penning-Rowsell E., Shen F., Wen K., Chen Y., Le Quesne T. *Flood Risk Management: A Strategic Approach*. UNESCO, 2013. 204 p. <https://doi.org/10.1201/b13715-137>
13. What are the two types of floods? U. S. Geological Survey. USGS.
14. Liu Y., Yuan X., Guo L., Huang Y., Zhang X. Driving force analysis of the temporal and spatial distribution of flash floods in Sichuan Province // *Sustainability*. 2017. Vol. 9, iss. 9. Art. no. 1527 (17 p.). <https://doi.org/10.3390/su9091527>
15. Liu C., Ma Q., Zhang X., Li C., Li Q., Gourbesville P., Guo L., Ding L. Identification and quantitative analysis of flash flood risks for small catchments in China: A new operational modelling approach // *LHB: Hydroscience Journal*. 2022. Vol. 108, iss. 1. Art. no. 2019561 (13 p.). <https://doi.org/10.1080/27678490.2021.2019561>. EDN: YVTOXH

16. Bhattacharya B., Islam T., Suman A., Solomatine D. P. “The use of a flood index to characterise flooding in the north-eastern region of Bangladesh”, FLOODrisk 2016 – 3rd European Conference on Flood Risk Management, 2016, vol. 10003, p. 4–8.
17. Rockembach F. A. Análise hidrodinâmica de enxurradas por meio de simulação numérica. Universidade do Estado de Santa Catarina (UFSC), 2022.
18. Kobiyama M., Goerl R. F. Quantitative method to distinguish flood and flash flood as disasters // SUISUI Hydrological Research Letters. 2007. Vol. 1. P. 11–14. <https://doi.org/10.3178/suisui.1.11>
19. Maqtan R., Othman F., Wan Jaafar W. Z., Sherif M., El-Shafie A. A scoping review of flash floods in Malaysia: Current status and the way forward // Natural Hazards. 2022. Vol. 114, iss. 3. P. 2387–2416. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05486-6>. EDN: GPRIXM
20. Schroeder A. J., Gourley J. J., Hardy J., Henderson J. J., Parhi P., Rahmani V., Reed K. A., Schumacher R. S., Smith B. K., Taraldsen M. J. The development of a flash flood severity index // Journal of Hydrology. 2016. Vol. 541, part A. P. 523–532. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.005>. EDN: XTIXEH
21. Miguez M. G., Battemarco B. P., De Sousa M. M., Rezende O. M., Veról A. P., Gusmaroli G. Urban flood simulation using MODCEL – an alternative quasi-2D conceptual model // Water. 2017. Vol. 9, iss. 6. Art. no. 445 (28 p.). <https://doi.org/10.3390/w9060445>
22. Miranda F., Franco A. B., Rezende O., da Costa B. B. F., Najjar M., Haddad A. N., Miguez M. A GIS-based index of physical susceptibility to flooding as a tool for flood risk management // Land. 2023. Vol. 12, iss. 7. Art. no. 1408 (22 p.). <https://doi.org/10.3390/land12071408>. EDN: IUQRWY

Научное издание

Геоэкологическая оценка
бассейнов горных рек:
теоретико-методологические
и методические аспекты,
региональные исследования

III Международная научная конференция

24–25 апреля 2025 г.
г. Феодосия (пгт Курортное), Россия

Вёрстка, макет: Сергеева А. В., Копытова О. Ю.

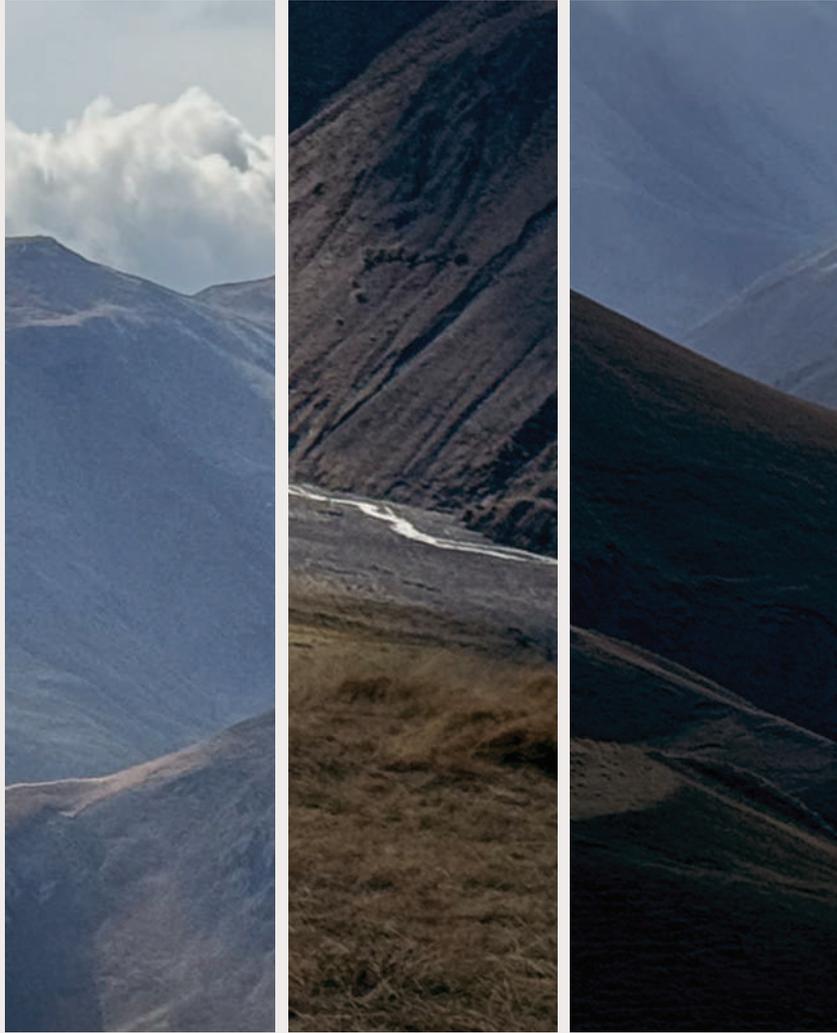
Корректурa: Копытова О. Ю.

Фотография на обложке: Никофорова А. А.

Дизайн обложки: Майборода Д. И.

*Материалы опубликованы в авторской редакции с минимальными корректорскими правками.
Ответственность за содержание материалов несут авторы.*

ФИЦ ИнБЮМ
пр-кт Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Россия
Тел.: +7 8692 54-41-10
email: ibss@ibss-ras.ru



ISBN 978-5-6052832-3-2



9 785605 283232 >