

V Международная научная конференция

«Геоэкологическая оценка бассейнов горных рек:

**теоретико-методологические
и методические аспекты,
региональные исследования»**

г. Севастополь, Россия
16–17 апреля 2026 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

V Международная научная конференция

Материалы докладов

16–17 апреля 2026 г.
Севастополь, Россия

Севастополь
ФИЦ ИнБЮМ
2026

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 V International Scientific Conference

Book of abstracts

16–17 April, 2026
Sevastopol, Russia

Sevastopol
IBSS
2026

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 V Международной научной конференции, 16–17 апреля 2026 г., Севастополь, Россия. Севастополь : ФИЦ ИнБЮМ, 2026. 168 с. EDN: [OIJUBL](#).

ISBN 978-5-6052832-6-3

В сборнике представлены материалы V 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

Geoeological Assessment of Mountain River Basins: Theoretical-Methodological and Practical Aspects, Regional Research : book of abstracts of the V International Scientific Conference, 16–17 April, 2026, Sevastopol, Russia. Sevastopol : IBSS, 2026. 168 p. EDN: [OIJUBL](#).

The proceedings include materials from the V International Scientific Conference “Geoeological Assessment of Mountain River Basins: Theoretical-Methodological and Practical Aspects, Regional Research.” 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 geoeological research are also explored. This proceedings are intended for researchers and professionals in geoeology, landscape science, natural resource management, and environmental protection.

*Сборник публикуется по решению учёного совета ФИЦ ИнБЮМ
(протокол № 13 от 06.08.2026).*

ISBN 978-5-6052832-6-3

© Авторы, 2026

© ФИЦ ИнБЮМ, 2026

Содержание

Алиева Ж. М., Керимова Э. И. Институциональные и экономические механизмы низкоуглеродного развития нефтяного комплекса Каспийского региона и рек его бассейна	8
Ануфриева Е. В., Яковенко В. А., Щапова Е. П., Гассиев Д. Д., Ржечицкий Я. А., Черкашина С. А., Широкова Ю. А., Шадрин Н. В. Золотодобыча как фактор долговременных изменений экосистем небольших горных рек. Пример реки Большие Коты (Прибайкальский национальный парк)	16
Атаев З. В. Бассейновый подход в геоэкологической оценке горных рек Северо-Восточного Кавказа: роль предгорий как узлов геосистемного напряжения	19
Атаев З. В. Перспективы применения искусственного интеллекта для анализа сезонной динамики и гидротермического режима ландшафтов горных речных бассейнов Прикаспийского Кавказа	25
Белакаев С. С. Оценка антропогенного воздействия на бассейн реки Аргун Чеченской Республики с помощью инструментов искусственного интеллекта	31
Братанов Н. С., Горбунов Р. В., Keita I., Фам К. Н., Горбунова Т. Ю., Фаерман А. В., Киселёва М. В., Diallo A. I. P. Особенности распределения и запасы биогенных элементов в бассейне реки Фатала (Западная Африка, Гвинейская Республика)	33
Гелагаев А. Ш. Селевая активность бассейна реки Сунжа	38
Джамалудинов Д. Ш., Хусаинов И. М., Атаев З. В., Абдулаев К. А. Высотная дифференциация и функционирование ландшафтов бассейнов горных рек Сулак, Уллучай и Самур на Северо-Восточном Кавказе: сравнительный анализ	43
Дрыгваль П. В. Анализ пространственных паттернов в геоэкологическом районировании бассейнов горных рек	47
Ибаев Ж. Г., Мамаев С. А., Сулейманов В. К., Мамаев А. С., Гусейнова А. Ш., Ахмедов А. С. О разработке хранилища данных опасных инженерно-геологических процессов бассейнов горных рек	52
Игнатьева Д. А., Горбунова Т. Ю., Keita I., Алексеев Я. И., Горбунов Р. В., Монахова Ю. А., Шварцев А. А., Братанов Н. С., Михайлычева М. В., Фаерман А. В., Киселёва М. В., Diallo A. I. P. Перестройка сетей совместной встречаемости бактерий как основа устойчивости почвенных экосистем бассейна реки Фатала	60
Идрисов И. А. Влияние геологического строения на природное районирование бассейна реки Сулак	65

Каширина Е. С., Вышкваркова Е. В., Линёва Н. П. Влияние климата на динамику NDVI в бассейнах рек ЮБК	68
Керимов И. А., Братков В. В., Бекмурзаева Л. Р. Климатические изменения в бассейне реки Аргун и их влияние на сток	72
Кнейб Е. Н., Яцук А. В. Сезонная изменчивость концентраций и потоков метана в приустьевой части реки Мзымта	76
Курашева О. А. Сравнительный анализ концентрации тяжёлых металлов в истоках рек Баксан и Черек	81
Кучинская И. Я., Керимова Э. Д., Атаев З. В., Абдулаев К. А., Гюльмагомедов А. М. Среднемасштабное ландшафтное картографирование бассейнов горных рек на основе полевых данных и спутниковых изображений: опыт исследования Северо-Восточного Кавказа, Азербайджана и Ирана	83
Мамадиев Н. А. Изучение экосистемных параметров потоков парниковых газов и их сезонной динамики в антропогенно изменённых и природных экосистемах Чеченской Республики	89
Мамаев С. А., Ибаев Ж. Г., Сулейманов В. К., Мамаев А. С., Ахмедов С. А. Геолого-тектоническая характеристика и пространственная типизация геосистем в геоисторическом аспекте	98
Музаев И. Х., Гайрабеков У. Т., Дидиев А. А. Геолого-геоморфологические условия и особенности бассейна реки Гумс	105
Музаев И. Х., Гайрабеков У. Т., Дидиев А. А. Природные условия и факторы формирования геоэкологического состояния бассейна реки Гумс	108
Никифорова А. А., Табунщик В. А., Вышкваркова Е. В., Горбунов Р. В., Горбунова Т. Ю., Дрыгваль А. В., Фам К. Н., Келип А. А. Анализ загрязнения воздуха диоксидом серы (SO₂) в бассейне реки Эль-Аси (Оронт) в контексте вооружённого конфликта в Сирии (2019–2024 гг.)	112
Плотникова У. Д., Голубкина Н. А., Хлебосолова О. А., Кошеваров А. А. Минеральный состав и антиоксидантный статус высших грибов заповедника «Пасвик» и прилегающей территории	116
Решетняк О. С. Оценка стока соединений минерального фосфора и трофности воды в нижнем течении реки Кубань	120
Скок Н. В., Юровских А. М. Динамика уровня воды в реке Чусовая в Свердловской области	125
Сулейманов В. К., Мамаев А. С., Сулейманова Ф. В., Ахмедов А. С., Курбанисмаилова А. С., Гусейнова А. Ш. Дистанционное зондирование как метод мониторинга бассейнов селеопасных балок горы Джалган	129
Табунщик В. А. Некоторые морфометрические характеристики бассейна реки Салгир	133

Фролов Д. А., Атаев З. В., Гюльмагомедов А. М., Нуралиев М. Э. Антропогенная трансформация ландшафтов бассейна реки Самур в условиях водохозяйственного освоения, сельскохозяйственной нагрузки и деградации дельтовых экосистем	137
Хусаинова А. У., Юрова Ю. Д. Оценка влияния морского торгового порта Находка на донные отложения акватории бухты Находка	142
Чигирова Л. Б. Особенности геоэкологических проблем бассейна реки Баксан (Центральный Кавказ)	146
Шерифова З. Х., Атаев З. В., Зангиева М. Р. Геоэкологическая оценка бассейна реки Самур в условиях трансграничного природопользования и климатических изменений	149
Шмаков А. С., Юрова Ю. Д., Широкова В. А. Геоэкологическая оценка реки Кальмиус на территории города Донецка	153
Lado M. L. R., Miranda F. M., de Sousa M. M., and Rezende O. M. Flood susceptibility assessment in a mountain river basin using the Physical Susceptibility to Floods Index in the municipality of Petrópolis, Brazil	160
Именной указатель	165

УДК 502.17:622.32(262.81)

Институциональные и экономические механизмы низкоуглеродного развития нефтяного комплекса Каспийского региона и рек его бассейна

Алиева Ж. М., Керимова Э. И.

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

✉ info@gstou.ru

Статья исследует процесс снижения углеродного следа в нефтегазовом секторе Каспийского региона. Анализируются правовые и организационные инструменты, направленные на контроль за выбросами парниковых газов, а также экономические стимулы для перехода к низкоуглеродным технологиям. Значительное внимание уделяется участию ведущих нефтедобывающих предприятий — ПАО «Лукойл», ПАО «Газпром нефть» и других недропользователей — в достижении климатических целей. Приводится сопоставительный обзор стратегий декарбонизации прикаспийских государств, выявляются как общие трудности, так и специфические национальные подходы. Исследование, основанное на статистических данных и анализе законодательной базы, выявило ряд системных проблем. К ним относятся неопределённость правового статуса принципа «нулевых выбросов» и несоответствие между общегосударственными и отраслевыми нормативными актами. В завершение работы предложены пути оптимизации механизмов регулирования декарбонизации, учитывающие текущую геополитическую и экономическую обстановку.

Ключевые слова: декарбонизация, нефтяная отрасль, Каспийский регион, парниковые газы, правовое регулирование, экономические механизмы, нулевой сброс, углеродная нейтральность, ПАО «Лукойл», сравнительный анализ

Каспийский бассейн занимает одно из центральных мест в мировой добыче нефти и газа, располагая существенными залежами углеводородного сырья. Российская часть Каспийского моря, охватывающая акватории Дагестана, Калмыкии и Астраханской области, играет значительную роль в поддержании энергетической стабильности государства. По разным данным, предполагаемые запасы каспийского углеводородного сырья — до 15–20 млрд тонн условного топлива, в том числе 2–6,5 млрд в российском секторе. По официальной оценке, начальные суммарные ресурсы углеводородов российского шельфа на Каспии составляют 6,6/4,2 (геологические ресурсы / извлекаемые ресурсы [2]) млрд тонн условного топлива. Это в совокупности свободный газ — 2,8 трлн м³, конденсат — 384,8/260,9 млн т (геол./извл.), нефть — 3,2/1,0 млрд т (геол./извл.) и растворённый газ — 185,2/72,5 млрд м³ (геол./извл.) [12].

Лидирующую позицию среди операторов нефтегазовых проектов в российской зоне Каспия занимает ПАО «Лукойл», обеспечивающее более 90 % всей добычи на морских месторождениях региона.

Разработка нефтегазовых месторождений в Каспийском регионе несёт в себе повышенные экологические риски, обусловленные уникальностью его экосистемы [16].

Не менее важным объектом антропогенного воздействия являются реки бассейна Каспийского моря — Волга, Урал, Кура, Терек, Сулак, Самур и другие водотоки, формирующие до 90 % суммарного материкового стока в водоём [16]. Именно речная сеть выступает основным каналом поступления загрязнителей, включая нефтепродукты, тяжёлые металлы и биогенные элементы, а также парниковых газов, за счёт сжигания углей, мазута и дизельного топлива в прибрежных промышленных зонах.

По данным авторитетных эколого-гидрологических обзоров, вклад речного транспорта и портовой инфраструктуры в суммарные эмиссии CO₂ и метана по Прикаспию достигает 12–15 % от выбросов прибрежного нефтегазового сектора [19]. В низовьях Волги и в дельте Терека фиксируется устойчивое превышение предельно допустимых концентраций взвешенных углеводородов, что коррелирует с высоким уровнем факельного сжигания попутного нефтяного газа и с отсутствием замкнутых циклов водоотведения на ряде сухопутных месторождений [12, 16].

Каспийское море, как крупнейший на планете внутренний водоём, обладает ценными биологическими ресурсами, в том числе популяциями осетровых, имеющими глобальное значение. В свете этого вопросы снижения углеродного следа и обеспечения экологической безопасности в нефтедобывающей отрасли приобретают первостепенное значение.

Декарбонизация подразумевает всесторонние мероприятия по минимизации выбросов парниковых газов, внедрение низкоуглеродных технологий и повышение эффективности использования энергии. Нефтегазовые компании по всему миру предпринимают всё более активные меры. Это внедрение декарбонизации в систему корпоративного управления, принятие целевых показателей по декарбонизации, развитие добровольной системы мониторинга и независимого аудита парниковых газов, а также раскрытия климатической отчётности [2]. Для нефтегазовой отрасли Каспийского региона этот процесс имеет ряд характерных особенностей, связанных как с технологическими аспектами добычи на морских платформах, так и с законодательной и нормативной базой. Ответственность за реализацию этих задач лежит на нефтяных компаниях, являющихся основными участниками инвестиционной и технологической деятельности в регионе.

Актуальность исследования. Актуальность работы обусловлена комплексом взаимосвязанных причин. В 2021 г. законодательство РФ пополнилось Федеральным законом № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов», который заложил новую нормативную базу для регулирования соответствующих отношений [17]. Параллельно с этим международные обязательства страны, вытекающие из Парижского соглашения, диктуют необходимость формирования и внедрения действенных мер по сокращению углеродного следа.

Кроме того, введение Европейским союзом механизма трансграничного углеродного регулирования (СВАМ) ставит перед отечественными экспортёрами нефти и нефтепродуктов, в том числе работающими в Прикаспийском регионе, новые экономические задачи [8]. Наряду с этим сохраняется неопределённость правовых норм, регулирующих экологические требования к разработке месторождений на шельфе и влекущих за собой риски как для пользователей недр, так и для природной среды.

Наконец, текущий период отмечен значительными трансформациями в геополитической и экономической сферах, что требует переосмысления стратегий декарбонизации с учётом сложившейся ситуации [8].

В этих условиях нефтяные компании оказываются перед необходимостью самостоятельной корректировки своих бизнес-стратегий, что обуславливает особую значимость анализа их практической деятельности.

Нормативно-правовая база декарбонизации в Российской Федерации. Россия находится на начальном этапе формирования и развития своей климатической политики, что определяет необходимость дальнейшей кропотливой работы [1]. Несмотря на это, законодательная база РФ в области декарбонизации претерпела существенные изменения. Центральным элементом этой эволюции явилось введение в действие Федерального закона № 296-ФЗ от 2 июля 2021 г. «Об ограничении выбросов парниковых газов» [17]. Этот нормативный акт сформировал фундамент государственной политики по контролю за эмиссией парниковых газов.

Основные принципы, закреплённые в законе, предусматривают достижение целей устойчивого экономического роста параллельно со снижением объёма выбросов, установление обязанности субъектов регулирования по регулярному представлению отчётности, безусловность выполнения установленных квот на сокращение эмиссии, добровольный характер реализации проектов климатической направленности, а также применение мер, базирующихся на научных данных, и обеспечение целостности принимаемых решений.

В соответствии с положениями закона создаётся государственная система учёта выбросов на основе специального реестра. Порядок его ведения был конкретизирован в Постановлении Правительства РФ № 707 [11].

На организации, подпадающие под регулирование, возложена обязанность по предоставлению сведений об объёмах эмиссии парниковых газов. Также установлена юридическая ответственность за нарушение сроков представления отчётов или за предоставление недостоверных данных.

Однако в действующем правовом регулировании сохраняется ряд нерешённых вопросов. Принятый закон имеет в основном рамочную конструкцию, и для внедрения многих его норм требуется разработка детализированных подзаконных актов. Кроме того, остаётся недостаточно эффективным механизм правового принуждения, обеспечивающий сокращение выбросов. Также к числу проблемных областей относится отсутствие прозрачной и комплексной системы экономических стимулов, побуждающих промышленные предприятия снижать углеродоёмкость выпускаемой продукции.

Роль нефтяных компаний в декарбонизации Каспийского региона. ПАО «Лукойл» как ключевой оператор. ПАО «Лукойл» является основным недропользователем в российском секторе Каспийского моря. На долю «Лукойла» приходится практически вся добыча углеводородов на российском шельфе Каспия. В настоящее время этот регион включает несколько месторождений нефти и газа, освоение которых требует применения специальных технологий нефтегазодобычи [9].

Компания признаёт важность мероприятий по предотвращению глобального изменения климата, принимает меры по сокращению выбросов парниковых газов, а также поддерживает участие России в глобальных усилиях по предотвращению изменения климата. Кроме того, ПАО «Лукойл» поддерживает глобальные усилия по сокращению выбросов парниковых газов. Климатическая стратегия включена в Программу стратегического развития Группы «Лукойл».

В компании создана система по учёту выбросов парниковых газов, внедрён бизнес-процесс «Декарбонизация и адаптация к изменению климата» и разработана программа «Декарбонизация» на основе рекомендаций, сформулированных в оценочных докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата и Всемирной метеорологической организации [6]. В рамках реализации своей климатической стратегии ПАО «Лукойл» приняло ряд обстоятельств по снижению углеродного следа, что предусматривает достижение углеродной нейтральности по Scope 1 и Scope 2 к 2050 г. В российском секторе Каспия эта стратегия реализуется через внедрение технологии попутного нефтяного газа с целевым показателем его полезного использования на уровне 95 % и выше. Компания также реализует проекты по обратной закачке газа в пласт для поддержания пластового давления, что позволяет сократить объём сжигания и выбросов CO₂.

Осознавая свою ответственность за сохранение уникальной экосистемы Каспийского моря, компания «Лукойл» создала на принадлежащих ей объектах морской нефтегазодобычи мощный локальный комплекс охранных технических средств промышленной и экологической безопасности. Он позволяет своевременно выявлять возникающие техногенные и экологические риски, предупреждать их и при необходимости в самые короткие сроки ликвидировать последствия [7].

Вместе с тем экологические организации отмечают, что фактическое соблюдение принципа «нулевого сброса» на Каспийских месторождениях ПАО «Лукойл» не имеет достаточного правового обеспечения. Проектная документация компании содержит требования по вывозу всех отходов на берег, однако эти нормы не закреплены в федеральном законодательстве и могут быть пересмотрены при изменении экономической конъюнктуры.

ПАО «Газпром нефть» и перспективные проекты. ПАО «Газпром нефть» также является недропользователем в Каспийском регионе, реализуя проекты по освоению месторождений и акватории Каспийского моря в рамках деятельности ООО «Газпром нефть шельф».

Климатическая стратегия компании «Газпром нефть» предусматривает достижение углеродной нейтральности по основным производственным активам к 2050 г. с промежуточной целью сокращения выброса на 30 % к 2030 г. В стратегии определены приоритеты дальнейшей работы компании в области низкоуглеродного развития с учётом целей РФ по достижению баланса между антропогенными выбросами парниковых газов и их поглощением не позднее 2060 г. [5]. В каспийских проектах «Газпром нефть» делает ставку на применение технологий электроцентрилизации с использованием электроэнергии с берега вместо автономной генерации на платформах, что позволяет снизить углеродный след добычи.

Особенностью проектов ПАО «Газпром нефть» является их расположение в непосредственной близости от особо охраняемых природных территорий и нерестилищ осетровых рыб. Это накладывает дополнительные обязательства в сфере экологической безопасности и требует усиленного контроля за выбросами и сбросами.

Помимо крупных вертикально интегрированных кампаний, в Каспийском регионе присутствуют и другие недропользователи, осуществляющие геологоразведку и добычу на сухопутных участках, прилегающих к акватории. К ним относится группа компаний «Каспийская Энергия», а также ряд небольших компаний в Республике Дагестан и в Астраханской области. Для них вопросы декарбонизации часто отходят на второй план ввиду ограниченности инвестиционных ресурсов и отсутствия жёстких требований со стороны регулятора. Это создаёт риск формирования «разноскоростного» режима декарбонизации, при котором крупные компании внедряют передовые технологии, а мелкие недропользователи остаются вне климатической повестки.

Проблема правового регулирования «нулевого сброса» в Каспийском регионе. Особую проблему для нефтяной отрасли региона представляет правовое регулирование принципа «нулевого сброса». Он предполагает запрет на сброс буровых и иных отходов в морскую среду и обязательный их вывоз на берег для утилизации и переработки [16].

Несмотря на широкое декларирование принципа «нулевого сброса», в российском законодательстве нет его нормативно-правового определения. Это создаёт ситуацию правовой неопределённости: компании формально следуют принципу, но его содержание не закреплёно в федеральных законах или подзаконных актах.

Принцип «нулевого сброса» был закреплён в постановлении Правительства РФ 1998 г., разрешающем нефтяным компаниям освоение Северного Каспия при условии соблюдения специальных экологических и рыбохозяйственных требований. На международном уровне этот принцип был закреплён в Тегеранской конвенции (Рамочной конвенции по защите морской среды Каспийского моря), принятой в ноябре 2003 г. представителями всех пяти прикаспийских государств [16]. Инициатором включения данной нормы в конвенцию выступила Россия, при этом имплементация международно-правового обязательства остаётся в РФ незавершённой.

Экономические аспекты декарбонизации нефтяной отрасли. Экономические механизмы декарбонизации нефтяной отрасли Каспийского региона находятся на этапе становления. Можно выделить следующих основные проблемы:

1. Отсутствие предсказуемых тарифных механизмов, субсидий и лицензионных процедур затрудняет привлечение долгосрочных инвестиций в низкоуглеродные проекты.
2. Неспешность административных процедур согласования экологических и климатических проектов создаёт дополнительные барьеры. Получение разрешений, обеспечение доступа к сетям и прохождение экспертиз требуют значительного времени, что снижает скорость и эффективность внедрения низкоуглеродных технологий [3].
3. Сохраняется проблема курсовой неустойчивости национальной валюты и её влияния на инвестиционные расчёты. Для Каспийского региона, где значительная часть оборудования и технологий является импортной, валютные риски приобретают особое значение.
4. Введение Евросоюзом механизма трансграничного углеродного регулирования создаёт новые экономические вызовы. Для нефтяных компаний, ориентированных на европейский рынок, это означает дополнительные издержки, связанные с углеродным следом продукции.
5. Отсутствие механизмов «зелёного» финансирования в российском правовом поле ограничивает возможности компаний привлекать капитал для низкоуглеродных проектов. В 2022–2025 гг. большинство зарубежных «зелёных» инвесторов прекратили сотрудничество с российскими нефтяными компаниями, что потребовало перестройки инвестиционных стратегий.

Сравнительный анализ подходов прикаспийских государств к декарбонизации. Для понимания специфики российского подхода к декарбонизации и для выявления возможных направлений совершенствования правового регулирования необходим сравнительный анализ страны с другими прикаспийскими государствами. У каждого из пяти государств Каспийского региона своя модель климатической политики, обусловленная национальными экономическими, правовыми и институциональными особенностями.

Российская Федерация: рамочное регулирование при сохранении углеводородной специализации. Российский подход к декарбонизации характеризуется сочетанием принятия базового климатического законодательства с сохранением приоритета развития нефтегазового сектора.

Как отмечено выше, ключевым нормативным актом является Федеральный закон № 296-ФЗ [17], дополненный Стратегией социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. [14].

Особенностью российской модели является акцент на добровольность реализации климатических проектов при одновременном введении обязательной отчётности для крупных эмитентов. Налоговые стимулы для снижения углеродоёмкости производства развиты слабо, что создаёт дисбаланс между декларируемыми целями и практическими механизмами их достижения.

В отношении Каспийского региона Россия сохраняет жёсткую позицию по суверенитету над ресурсами и недропользованием, что находит отражение в национальном законодательстве о континентальном шельфе. При этом говорить о соблюдении принципа «нулевого сброса», закреплённого в Тегеранской конвенции, пока рано: имплементация не завершена [8, 16].

Республика Казахстан: амбициозные цели при ограниченных инвестиционных ресурсах. Казахстан, обладающий значительными запасами нефти, газа и угля, сделал наиболее амбициозные шаги по формированию правовой базы для низкоуглеродного развития среди всех прикаспийских государств. Страна установила цель достижения углеродной нейтральности к 2060 г., что закреплено в соответствующей стратегии [15].

Ключевыми элементами казахстанской модели являются введение с 2013 г. механизма торговли квотами на выбросы парниковых газов, обязательная инвентаризация выбросов для крупных природопользователей, развитие возобновляемой энергетики с целью достижения доли 50 % к 2050 г., а также реализация проектов по улавливанию, хранению и использованию углерода в нефтегазовом секторе.

Казахстан ввёл систему торговли выбросами парниковых газов. В 2013 г. стартовал пилотный этап, охвативший 178 компаний энергетического, нефтегазового, горнодобывающего и химического секторов, на которые в совокупности пришлось 55 % выбросов. На первом этапе компании получили разрешения на выбросы на основе своих исторических значений — на 100 % выбросов 2010 г. [4].

Несмотря на амбициозные цели, фактическая доля возобновляемой энергетики в Казахстане остаётся незначительной — около 3 % от общей установленной мощности (2360 МВт) [18]. Инвестиционные ресурсы для модернизации устаревшей угольной генерации и внедрения низкоуглеродных технологий в нефтегазовом комплексе ограничены. Кроме того, сохраняются институциональные барьеры, связанные с административной сложностью процедур согласования климатических проектов.

Для Казахстана характерна высокая зависимость экономики от экспорта углеводородов, что создаёт конфликт между климатическими обязательствами и необходимостью поддержания объёмов добычи. Введение Евросоюзом механизма трансграничного углеродного регулирования оказывает значительное давление на казахстанских экспортёров, стимулируя ускоренную декарбонизацию.

Азербайджанская Республика: стратегия «зелёной энергетики». Азербайджан обладает развитой нефтегазовой инфраструктурой и значительными запасами углеводородов. В последней версии своего определяемого на национальном уровне вклада страна поставила целью сократить выбросы на 40 % к 2050 г. по сравнению с базовым значением 1990 г. [4].

Ключевыми направлениями климатической политики Азербайджана являются:

- масштабное развитие возобновляемой энергетики, включая ветроэнергетику в Каспийском море;
- реализация проекта «Каспийский зелёный коридор» для экспорта в Европу электроэнергии из возобновляемых источников;
- модернизация нефтегазовой инфраструктуры с целью сокращения выбросов метана;
- активное привлечение международных инвестиций в климатические проекты.

Особенностью азербайджанской модели является активная дипломатическая поддержка климатической повестки. В 2024 г. Азербайджан принимал 29-ю сессию Конференции сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата (COP29), что существенно повысило международный статус страны в климатической сфере.

Нефтегазовый сектор остаётся основой экономики Азербайджана, и реальные темпы декарбонизации в добывающих отраслях пока отстают от декларативных целей. Сохраняются проблемы с утилизацией попутного нефтяного газа, особенно на старых месторождениях.

Туркменистан: ограниченное участие в климатической повестке. Принятая Национальная стратегия Туркменистана по изменению климата является в настоящее время основным документом страны, регламентирующим деятельность в области изменения климата. Стратегия отражает национальное видение вопросов, связанных с изменением климата, и является основой формирования и реализации государственной политики в области климатических изменений и их последствий [13].

Туркменистан, обладающий четвёртыми по величине запасами природного газа в мире, характеризуется наименьшей степенью вовлечённости в процессы декарбонизации среди прикаспийских государств. Страна присоединилась к Парижскому соглашению ещё в 2016 г., однако детальные механизмы реализации климатической политики до конца не разработаны.

Ключевыми чертами туркменского подхода являются:

- приоритет развития газовой отрасли как основы экономики;
- ограниченное использование возобновляемых источников энергии;
- высокий уровень выбросов метана при добыче и транспортировке газа;
- отсутствие развитой системы мониторинга и отчётности по парниковым газам [3].

Туркменистан остаётся одной из стран с наименьшей прозрачностью в отношении климатической статистики. Повышение выбросов CO₂ в основном происходит за счёт роста населения и развития промышленности, а это, в свою очередь, приводит к увеличению количества газа, используемого для выработки электроэнергии. Доля метана в общих выбросах парниковых газов сократилась относительно доли 2010 г. вследствие постоянно проводимого обновления инфраструктуры в нефтегазовой отрасли [10]. По оценкам международных организаций, выбросы метана в туркменском секторе Каспия являются одними из самых высоких в мире, что создаёт трансграничные экологические риски для всего региона.

В последние годы Туркменистан принимает отдельные меры по модернизации газовой инфраструктуры и по сокращению факельного сжигания, однако системного подхода к декарбонизации в стране нет. Приоритетом остаётся наращивание объёмов экспорта газа, в том числе по маршрутам через Каспийское море.

Исламская Республика Иран: санкционные ограничения и вынужденная декарбонизация. Иран, обладающий одними из крупнейших запасов природного газа и нефти в мире, находится в уникальной ситуации: международные санкции выступают одновременно ограничивающим и стимулирующим фактором для декарбонизации. С одной стороны, они затрудняют доступ к передовым низкоуглеродным технологиям и международному финансированию. С другой стороны, санкции стимулируют развитие внутреннего производства, технологий и энергоэффективности.

Климатическая политика Ирана характеризуется высокой зависимостью экономики от нефтегазового сектора и субсидируемых цен на энергоносители, значительными выбросами метана и факельным сжиганием попутного газа и развитием возобновляемой энергетики, прежде всего солнечной и ветровой, с целью высвобождения углеводородов на экспорт. Страна ратифицировала Парижское соглашение в 2016 г. с обязательством сокращения выбросов.

Иран сталкивается с серьёзными экологическими проблемами, включая загрязнение воздуха в крупных городах и дефицит водных ресурсов, что создаёт дополнительные стимулы для энергоперехода. Однако темпы декарбонизации сдерживаются экономическими трудностями и приоритетом поддержания объёмов экспорта углеводородов в условиях санкций.

Сравнительный анализ подходов прикаспийских государств к декарбонизации выявил значительную дифференциацию национальных моделей. Казахстан обладает наиболее развитой институциональной системой, включающей механизм торговли квотами на выбросы. Азербайджан активно использует климатическую дипломатию. Туркменистан и Иран демонстрируют более низкий уровень вовлечённости в климатическую повестку, обусловленный как экономическими, так и геополитическими факторами.

Для Каспийского региона особо острой остаётся проблема правового регулирования «нулевого сброса» [8, 16]. Несмотря на декларирование этого принципа на международном уровне, в России, как уже сказано выше, его имплементация не завершена. Это создаёт риски как для недропользователей, так и для экологической безопасности уникального водоёма.

Экономические механизмы декарбонизации находятся на начальном этапе своего формирования. Отсутствие стабильных и предсказуемых инвестиционных условий, неспешность административных процедур, валютные риски и различные внешнеэкономические факторы препятствуют масштабному внедрению низкоуглеродных технологий. Санкционное давление и переориентация экспортных потоков требуют пересмотра подходов к стимулированию декарбонизации.

В современных геополитических и экономических реалиях нужны новые подходы к декарбонизации, учитывающие необходимость технологического суверенитета, адаптации к санкционным ограничениям и сохранения конкурентоспособности российских нефтяных компаний.

В качестве перспективных направлений совершенствования организационно-правового механизма декарбонизации Каспийского региона можно рассмотреть:

- 1) разработку и принятие федерального закона, определяющего правовые основы принципа «нулевого сброса» в российском секторе Каспийского моря, с закреплением обязательств недропользователей и мер государственной поддержки;
- 2) создание системы экономического стимулирования внедрения низкоуглеродных технологий, включая налоговые льготы для компаний, соблюдающих принцип «нулевого сброса», и льготное кредитование климатических проектов;
- 3) развитие механизмов государственно-частного партнёрства в сфере декарбонизации, в том числе создание специализированных институтов развития;
- 4) активизацию научных исследований по адаптации низкоуглеродных технологий к специфическим условиям Каспийского региона с формированием технологического суверенитета;
- 5) введение дифференцированных требований к недропользователям в зависимости от масштаба деятельности, и создание стимулов для малых компаний по внедрению климатических практик;
- 6) развитие регионального сотрудничества в рамках Тегеранской конвенции для гармонизации подходов к декарбонизации и для создания системы мониторинга трансграничных выбросов.

Реализация указанных мер позволит обеспечить баланс между экономическим развитием нефтяной отрасли и сохранением уникальной экосистемы Каспийского моря, а также выполнение международных обязательств Российской Федерации в сфере климата.

Низкоуглеродное развитие нефтяного комплекса Каспийского региона не может ограничиваться совершенствованием морских платформ: необходима синхронизация мер декарбонизации на всей площади водосборного бассейна — от верховий рек до приустьевых зон. В противном случае эффект от внедрения «нулевого сброса» в море будет частично нивелирован трансграничным переносом загрязнений через речные системы.

Список использованных источников

1. Веселова Д. Н. Климатическая политика Российской Федерации: законодательные и институциональные аспекты // Дискурс-Пи. 2021. Т. 18. № 3. С. 96–111. https://doi.org/10.17506/18179568_2021_18_3_96
2. Декарбонизация нефтегазовой отрасли: международный опыт и приоритеты России / под ред. Т. Митровой. Москва : Московская школа управления «Сколково», 2021. 220 с.
3. Дегтярев К. С., Синюгин О. А., Березкин М. Ю. Развитие финансово-рыночных инструментов низкоуглеродного развития в России // Окружающая среда и энерговедение. 2023. № 2 (18). С. 16–29. <https://elibrary.ru/oszrdm>
4. Климатическая политика Восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии: обзор и рекомендации для 11 стран. URL: <https://canecca.org/wp-content/uploads/2024/11/co2e-rus.pdf> [дата обращения: 03.03.2026].

5. Климатическая стратегия «Газпром нефть».
6. Климатическая стратегия ПАО «Лукойл». URL: <https://rspp.ru/download/4b6f33df4196370503f33394081a1a675435211e266eb994/> [дата обращения: 03.03.2026].
7. Кузин А. В., Колмыков Е. В., Бакун О. И., Исмагулов А. Л., Степанищева Е. А. Меры по обеспечению экологической безопасности Компании «Лукойл» при разведке и разработке месторождений нефти и газа на Северном Каспии. URL: https://tehranconvention.org/system/files/russia/publication_part-4_ru_2.pdf [дата обращения: 03.03.2026].
8. Монахов С. К. О «нулевом сбросе» на Каспии // Каспийский информационный портал «Каспика». 2017. 06 июня. URL: <https://kaspika.org/ru/2017/06/06/o-nulevom-sbrose-na-kaspii/> [дата обращения: 03.03.2026].
9. Нурмакова Ж. И., Егоров В. С. Особенности обустройства морских нефтегазовых месторождений Северного Каспия // 69-я Международная научная конференция АГТУ, посвящённая 95-летию со дня основания АИРХ – АТИРПИХ – АГТУ, Астрахань, 26–30 мая 2025 г. : сборник материалов. Астрахань : Изд-во Астраханского государственного технического университета. С. 464–465. <https://elibrary.ru/ynkzww>
10. Первый двухгодичный доклад о прозрачности Туркменистана по РКИК ООН. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/BTR1_Turkmenistan_2025_for%20UNFCCC.pdf [дата обращения: 03.03.2026].
11. Постановление Правительства РФ от 21.04.2022 № 707 «Об утверждении Правил ведения реестра выбросов парниковых газов».
12. Приморский нефтегазохимический кластер Дагестана: проблемы и перспективы. URL: <https://casp-geo.ru/primorskij-neftegazohimicheskij-klaster-dagestana-problemy-i-perspektivy/> [дата обращения: 03.03.2026].
13. Принятие Национальной стратегии Туркменистана по изменению климата. URL: <https://www.mfa.gov.tm/ru/news/1615> [дата обращения: 03.03.2026].
14. Распоряжение Правительства РФ от 29.10.2021 № 3052-р «Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года».
15. Стратегия достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/U2300000121> [дата обращения: 03.03.2026].
16. Тегеранская рамочная конвенция по защите морской среды Каспийского моря (подписана 04.11.2003). URL: https://tehranconvention.org/system/files/tc-interim-secretariat/tehran_convention_text_final_rus.pdf [дата обращения: 03.03.2026].
17. Федеральный закон от 02.07.2021 № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» // Собрание законодательства РФ. 2021. № 27. Ст. 5124. URL: <https://leap.unep.org/en/countries/ru/national-legislation/federal-law-no-296-fz-limiting-greenhouse-gas-emissions> [дата обращения: 03.03.2026].
18. Энергетика Центральной Азии: модернизация энергетического сектора и энергопереход. URL: <https://analytics.eabr.org/energetika-tsentralnoy-azii-modernizatsiya-i-energoperekhod/> [дата обращения: 03.03.2026].
19. Совместный доклад ЮНЕП-Каспий (UNEP/CASP). Речной сток и углеводородное загрязнение трансграничных водотоков Прикаспия. Найроби – Астрахань, 2024. 88 с.

УДК 574.5

Золотодобыча как фактор долговременных изменений экосистем небольших горных рек. Пример реки Большие Коты (Прибайкальский национальный парк)

Ануфриева Е. В.¹, Яковенко В. А.¹, Щапова Е. П.², Гассиев Д. Д.¹, Ржечицкий Я. А.²,
Черкашина С. А.², Широкова Ю. А.², Шадрин Н. В.¹

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

²Научно-исследовательский институт биологии Байкала ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет», Иркутск, Россия

✉ lena_anufrieva@mail.ru

В 1930–1970 гг. на реке Большие Коты, впадающей в Байкал, с использованием драги добывали золото, в результате чего образовалось более 30 лесных техногенных озёр, связанных в разной степени между собой и с рекой. В 2022, 2024 и 2025 гг. изучены физико-химические и биологические особенности техногенных лесных озёр и четырёх рек, впадающих в Байкал. Отмечена высокая пространственная и временная вариабельность всех абиотических и биотических параметров в озёрах. В обследованных реках Большие Коты, Малые Коты, Жилище и Чёрная всего найдено 34 вида, а в техногенных озёрах — 68 видов. Безусловно, негативные последствия золотодобычи на реках очевидны, но в то же время формирование техногенных водоёмов в долине реки Большие Коты привело к обогащению регионального водного биоразнообразия.

Ключевые слова: техногенные водоёмы, золотодобыча, биоразнообразие, метаэкосистема

Деятельность человека с доисторических времён изменяет экосистемы и ландшафты, в частности создавая новые водоёмы или преобразуя существующие естественные [6, 14]. Причины этого — строительство, гидромелиорация, добыча полезных ископаемых и другие виды активности людей. Золотодобыча с использованием драг существенным образом модифицирует рельеф, а также водные и наземные экосистемы в долинах лесных горных рек. В разных регионах мира добыча россыпного золота в реках существенно трансформирует природные ландшафты и экосистемы, что сказывается на них не только в период добычи, но и спустя многие годы [2, 11, 12]. Ландшафты преобразуются, становясь более неоднородными, с разнообразием небольших водоёмов [2, 3], но также загрязняются бассейны рек. В частности, одним из крупнейших в мире источников антропогенных выбросов ртути является мелкомасштабная добыча золота [10].

Первое золото в России в 1714 г. было добыто в Забайкалье [4]. На западном побережье Байкала золото нашли в 1839 г. — и началась «золотая лихорадка». Что касается рек Большие и Малые Коты, впадающих в Байкал, то первое упоминание о добыче золота в них относится к 1856 г. [5]. Сначала добычу золота осуществляли вручную, но в 1937–1938 гг. в реку Большие Коты ввели драгу, которую в 1953 г. бросили, начав использовать большую драгу. Её использование прекратили в середине 1970-х гг. Работа драги требует достаточной глубины и ширины водоёма. Для обеспечения этого на реке были созданы запруды с заводами. После отработки участка реки драгу перемещали выше по течению. В результате образовались разнообразные валунные отвалы и более 30 небольших водоёмов. Долина реки Большие Коты преобразилась. Формирование растительности на таких отвалах описано в ряде работ [2, 11, 12], однако исследований по биологии подобных озёр/прудов авторам не известно.

Цель исследования — понять долговременный эффект золотодобычи на экосистему реки Большие Коты. Задачи: 1) изучить физико-химические особенности рек и техногенных лесных озёр; 2) оценить биоразнообразие ненарушенных участков рек и техногенных водоёмов. Для этого авторы в 2020–2025 гг. провели исследование 6 озёр и 4 рек, впадающих в Байкал.

Район исследования находится в падах Приморского хребта — горной цепи, протянувшейся почти на 300 км вдоль западного берега Байкала. Объекты изучения — 6 техногенных озёр и реки Большие Коты, Малые Коты, Жилище и Чёрная, впадающие в Байкал. Исследования проведены в 2022, 2024 и 2025 гг.

Отбор биологических проб проводили фильтрацией 100 л воды через планктонные сети (размер ячеек — 60 мкм). Пробы фиксировали 4%-ным формалином. С помощью GPS-навигатора Garmin GPSMap 64 RUS (США) определяли координаты точек и высоту. Освещённость измеряли люксметром СЕМ DT-1309 (Китай), температуру — термометром Checktemp 1, HANNA Instruments (Румыния), pH — карманным pH-метром HI 98129 Combo (Германия), концентрацию кислорода — кислородомером Extech 407510 (США). Осадки и облачность оценивали визуально.

Реки и озёра расположены в лесной зоне и затенены в разной степени, что обусловлено рельефом и береговой растительностью. Техногенные озёра в долине реки Большие Коты визуально существенно отличаются друг от друга размером, формой, глубиной, донными отложениями, проточностью, береговой и водной растительностью и т. д. Между собой они связаны поверхностным и подповерхностным стоком в единую гидрологическую систему; также они связаны с рекой. В летние периоды 2022, 2024 и 2025 гг. обнаружена высокая пространственная и суточная вариабельность всех абиотических параметров в озёрах. На затенённые участки озёр и рек в среднем поступало в 11,2 раза меньше солнечной радиации, чем на освещённые: в облачные дни — в 6,6 раза, а в солнечные — в 14,8 раза. В периоды исследований температура поверхностного слоя в дневное время различалась в разных озёрах от +6,6 до +30 °С, значительно меняясь в течение суток. В реке Большие Коты средняя концентрация кислорода обычно была выше, чем в озёрах, а диапазон суточных колебаний — меньше.

Суммарно в изученных озёрах и реках найдено 6 типов, 10 классов и 74 вида беспозвоночных животных, при этом Arthropoda составляли 86 % всех видов. В обследованных реках Большие Коты, Малые Коты, Жилище и Чёрная всего обнаружено 34 вида, а в техногенных озёрах — 68 видов. Из найденных в реках видов только 6 ни разу не были отмечены в техногенных озёрах. В верхних участках рек средняя численность животных составляла 89 экз.·м⁻³, а в местах впадения в Байкал — 9973 экз.·м⁻³. В техногенных озёрах значение колебалось в широких пределах — от 190 до 41 220 экз.·м⁻³, медианная величина составила 1575 экз.·м⁻³. Наибольшая суммарная численность животных выявлена в водоёмах с высоким уровнем развития водной растительности и относительно небольшим затенением, а наименьшая — в озёрах с визуально высокой проточностью.

Эколого-гидрологическую систему реки Большие Коты и техногенных озёр следует рассматривать как единую метаэкосистему, которая характеризуется высокой гетерогенностью и временной изменчивостью на разных пространственно-временных масштабах. Это обусловлено в первую очередь сложным техногенным рельефом и неоднородностью светового режима. Мелкомасштабная гетерогенность структуры сообществ и их несинхронизированные изменения в отдельных экосистемах обеспечивают долгосрочную устойчивость метаэкосистемы [7–9]. Взгляд с позиций концепций речного континуума и метаэкосистемы [1, 9] позволяет понять, что отмеченное авторами высокое биоразнообразие является результатом связности местообитаний и несинхронности изменений в них популяций и сообществ [7, 15]. В этом случае стратегия охраны биоразнообразия должна быть ориентирована на сохранение как можно большего количества элементов единой метаэкосистемы.

Безусловно, негативные последствия золотодобычи на реках очевидны. В то же время формирование техногенных водоёмов в долине реки Большие Коты привело к обогащению регионального водного биоразнообразия и, скорее всего, биоразнообразия прилегающих наземных сообществ.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-66-00001 (<https://rscf.ru/project/24-66-00001/>).

Список использованных источников

1. Богатов В. В., Федоровский А. С. Основы речной гидрологии и гидробиологии. Владивосток : Дальнаука, 2017. 384 с. <https://elibrary.ru/yohsjz>

2. Ветлужских Н. В. Растительные сообщества естественных и последражных водоёмов Салаирского края // Бюллетень Ботанического сада Саратовского государственного университета. 2018. Т. 16, № 4. С. 3–17. <https://elibrary.ru/ynpwot>
3. Егидарев Е. Г., Симонов Е. А. Оценка экологических последствий добычи россыпного золота в бассейне реки Амур // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2014. № 5. С. 429–441. <https://elibrary.ru/svzmpx>
4. Иванов В. Ф. Старатели золотоносных приисков Забайкалья (середина XIX – середина XX в.) // Известия Лаборатории древних технологий. 2024. Т. 20, № 3 (52). С. 99–107. <https://elibrary.ru/nzupmv>
5. Суходолов А. История иркутской золотодобычи // Золото и технологии. 2017. № 4. С. 150–162. <https://elibrary.ru/vbhknl>
6. Anufrieva E. V., Goher M. E., Hussian A. M., El-Sayed S. M., Hegab M. H., Tahoun U. M., Shadrin N. V. Ecosystems of artificial saline lakes. A case of Lake Magic in Wadi El-Rayan depression (Egypt). Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems, 2020, no. 421, art. 31 (13 p.). <https://doi.org/10.1051/kmae/2020024>
7. Anufrieva E., Kolesnikova E., Revkova T., Shadrin N. Spatio-temporal variability of zooplankton and zoobenthos as the elements of integrated zoocenosis in a marine lake (Crimea, Black Sea): What is a general pattern? Journal of Sea Research, 2022, vol. 185, art. 102231 (11 p.). <https://doi.org/10.1016/j.seares.2022.102231>
8. Arumugam R., Lutscher F., Guichard F. Tracking unstable states: Ecosystem dynamics in a changing world. Oikos, 2021, vol. 130, iss. 4, pp. 525–540. <https://doi.org/10.1111/oik.08051>
9. Firkowski C. R., Thompson P. L., Gonzalez A., Cadotte M. W., Fortin M.-J. Multi-trophic metacommunity interactions mediate asynchrony and stability in fluctuating environments. Ecological Monographs, 2022, vol. 92, iss. 1, art. e01484 (16 p.). <https://doi.org/10.1002/ecm.1484>
10. Gerson J. R., Topp S. N., Vega C. M., Gardner J. R., Yang X., Fernandez L. E. Artificial lake expansion amplifies mercury pollution from gold mining. Science Advances, 2020, vol. 6, iss. 48, art. eabd4953 (7 p.). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd4953>
11. Grove J., Turnbull J., Lawrence S., Davies P., Rutherford I., Silvester E., Colombi F., Macklin M. Mining to mud: A multidisciplinary approach to understanding Victoria's riverine landscape as a product of historical gold mining. Preview, 2019, vol. 2019, iss. 200, pp. 44–56. <https://doi.org/10.1080/14432471.2019.1625123>
12. Lawrence S., Grove J., Davies P., Turnbull J., Rutherford I., Macklin M. Historical dredge mining as a significant anthropomorphic agent in river systems: A case study from south-eastern Australia. The Holocene, 2021, vol. 31, iss. 7, pp. 1158–1174. <https://doi.org/10.1177/09596836211003272>
13. Philipp L., Klauschies T., Guill C. Metacommunity connectance and emergent patterns drive diversity via spatial eco-evolutionary feedback. Oikos, 2025, vol. 2025, iss. 9, art. e11039 (19 p.). <https://doi.org/10.1002/oik.11039>
14. Shadrin N., Yakovenko V., Moseychenko I., Anufrieva E. Zooplankton in the technogenic aquatic ecosystem of the North Crimean Canal, the longest in Europe. Water, 2023, vol. 15, iss. 13, art. 2327 (14 p.). <https://doi.org/10.3390/w15132327>
15. Vagnon C., Olden J. D., Boulêtreau S., Bruel R., Chevalier M., Garcia F., Holtgrieve G., Jackson M., Thebault E., Tedesco P. A., Cucherousset J. Ecosystem synchrony: An emerging property to elucidate ecosystem responses to global change. Trends in Ecology & Evolution, 2024, vol. 39, iss. 12, pp. 1085–1095. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2024.08.003>

УДК 911.2:556.5(470.67)

Бассейновый подход в геоэкологической оценке горных рек Северо-Восточного Кавказа: роль предгорий как узлов геосистемного напряжения

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

Обоснован бассейновый подход как методологическая основа интегральной геоэкологической оценки горных рек Северо-Восточного Кавказа. На материалах полевых исследований, ландшафтного картирования и анализа данных дистанционного зондирования в бассейнах рек Сулак, Уллучай и Самур показано, что предгорные ландшафты выступают узлами геосистемного напряжения — зонами концентрации и трансформации потоков вещества и энергии, а также ключевых форм природопользования. Актуальность определяется совокупным воздействием антропогенной нагрузки, климатических изменений и регрессии Каспийского моря, меняющей условия функционирования нижних звеньев бассейнов и дельтовых экосистем. Предложен индекс геоэкологического напряжения предгорий (ИГНП), предназначенный для первичного ранжирования предгорных сегментов по приоритетам мониторинга и управления.

Ключевые слова: бассейновый подход, предгорные ландшафты, горные реки, геоэкологическая оценка, климатические изменения, регрессия Каспийского моря, интегрированное управление

Бассейновый подход трактует речной бассейн как целостную природно-антропогенную систему, в пределах которой устойчиво проявляются связи между литогенной основой, рельефом, климатом, поверхностными и подземными водами, почвенно-растительным покровом и структурой землепользования. Для горных стран он особенно продуктивен, поскольку именно здесь формируются основные водные ресурсы — «водные башни» суши [17]. Современные климатические изменения, включая деградацию криосферы и перестройку сезонности увлажнения, повышают неопределённость водных ресурсов и устойчивости геосистем [9].

Для Северо-Восточного Кавказа характерна высокая контрастность природных условий на коротких расстояниях — от высокогорий и среднегорий до предгорий, равнин и прикаспийских дельт. Это усиливает роль каскадных эффектов: процессы, развивающиеся в верховьях, реализуются в среднем и нижнем течении, формируя интегральный геоэкологический эффект всего бассейна. На практике же мониторинг и управленческие решения нередко смещаются либо к источниковым зонам, либо к низовьям, тогда как предгорные сегменты рассматриваются фрагментарно.

В настоящей работе предгорья интерпретируются как узлы геосистемного напряжения. Именно здесь меняются режимы латеральных потоков и перераспределения вещества, концентрируются землепользование и инфраструктура, а также усиливается чувствительность к экстремальным событиям и опасным процессам. Актуальность такого подхода определяется действием трёх взаимосвязанных драйверов: антропогенной нагрузки, современных климатических изменений и регрессии Каспийского моря.

Цель исследования — обосновать бассейновый подход для интегральной геоэкологической оценки горных рек Северо-Восточного Кавказа и показать роль предгорий как узлов геосистемного напряжения на примере бассейнов Сулака, Уллучая и Самура.

Теоретико-методологические основания. В учении о геосистемах бассейн может рассматриваться как иерархическая система, где пространственная дифференциация сопряжена с потоками вещества и энергии [11]. Ландшафтоведческий подход дополняет эту позицию представлением о структурно-функциональной организации природных комплексов и о закономерностях их трансформации под действием природных и антропогенных факторов [8].

Ключевым для данной статьи является принцип триадной организации горы — предгорья — равнины, согласно которому предгорья выступают не размытым переходом, а самостоятельным функциональным звеном бассейна [1]. Такая трактовка позволяет уйти от формально-орографического понимания предгорий [2] и перейти к анализу их роли в парадинамике горно-равнинных систем.

В терминах геоэкологической оценки предгорья целесообразно рассматривать как узлы напряжения, если одновременно проявляются три признака: 1) усиление концентрации вещественно-энергетических потоков по сравнению с соседними звеньями; 2) пространственное наложение разнотипных природных и антропогенных воздействий; 3) повышенная уязвимость системы и частота её перехода в неустойчивые режимы — эрозионные, оползневые, селевые и деградационные.

Материал и методы. Рассмотрены бассейны рек Сулак, Уллучай и Самур, относящиеся к западно-каспийскому сектору стока. Их базовые морфометрические характеристики (длина и площадь бассейна) — 169 км и 15 200 км²; 111 км и 1440 км²; 213 км и 7330 км² соответственно [4–6]. Выбор именно этих объектов обусловлен тем, что они представляют разные типы горных рек Восточного Кавказа и вместе охватывают ключевые варианты взаимодействия горы — предгорья — низовья.

Использованы материалы полевых ландшафтно-геоэкологических исследований 2024–2025 гг., результаты ландшафтного картографирования и ГИС-анализа, данные дистанционного зондирования Sentinel-2 [12] и цифровой модели рельефа SRTM [13]. Климатический контекст оценён по официальным материалам Росгидромета [9], а каспийский фактор — по современным наблюдательным и обзорным публикациям [3, 14–16].

Исследование выполнено в логике бассейнового анализа с выделением функциональных зон — горной, предгорной и равнинно-приморской — и с сопоставлением их роли в перераспределении потоков, формировании нагрузок и проявлении опасных процессов. Предгорные сегменты выделены по совокупности морфоструктурных и функциональных признаков — по изменению уклонов и расчленения рельефа, росту роли пролювиально-аллювиальных форм, смене режимов транзита и аккумуляции наносов, а также концентрации землепользования и инфраструктуры.

Для сравнительного ранжирования предгорных сегментов нами предложен формализованный показатель — индекс геоэкологического напряжения предгорий (ИГНП):

$$\text{ИГНП} = wA \cdot A + wC \cdot C + wK \cdot K + wG \cdot G, \quad (1)$$

где A — нормированный показатель антропогенной нагрузки (землепользование, плотность дорожной сети / застройки, интенсивность водозабора);

C — нормированный показатель гидроклиматического стресса (темпы потепления, тенденции сухости/аридизации, экстремальность осадков/паводков);

K — нормированный «каспийский фактор» (чувствительность нижних частей бассейна и устьевой зоны к регрессии Каспийского моря);

G — нормированный показатель геоморфологической уязвимости (склоновые процессы, расчленённость, литолого-структурные предпосылки).

Для демонстрационного ранжирования использована схема весов: $wA = 0,35$; $wC = 0,25$; $wK = 0,20$; $wG = 0,20$. Интерпретация шкалы следующая: ИГНП < 0,33 — низкое напряжение; 0,33–0,66 — умеренное; > 0,66 — высокое.

Пространственная полнота полевых материалов наиболее наглядно прослеживается на примере трансграничного бассейна Самура, где сеть ключевых точек охватывает горные, предгорные и дельтовые сегменты единой бассейновой системы (рис. 1).

Результаты и обсуждение. Во всех трёх рассматриваемых бассейнах выявляется иерархия горы — предгорья — равнины/приморская низменность. Горные участки выполняют источниковую функцию — формируют сток и твёрдый материал; равнинно-приморские сегменты играют аккумулятивно-трансформационную роль; предгорья же выступают зоной перераспределения, где усиливаются как природные, так и антропогенные эффекты.

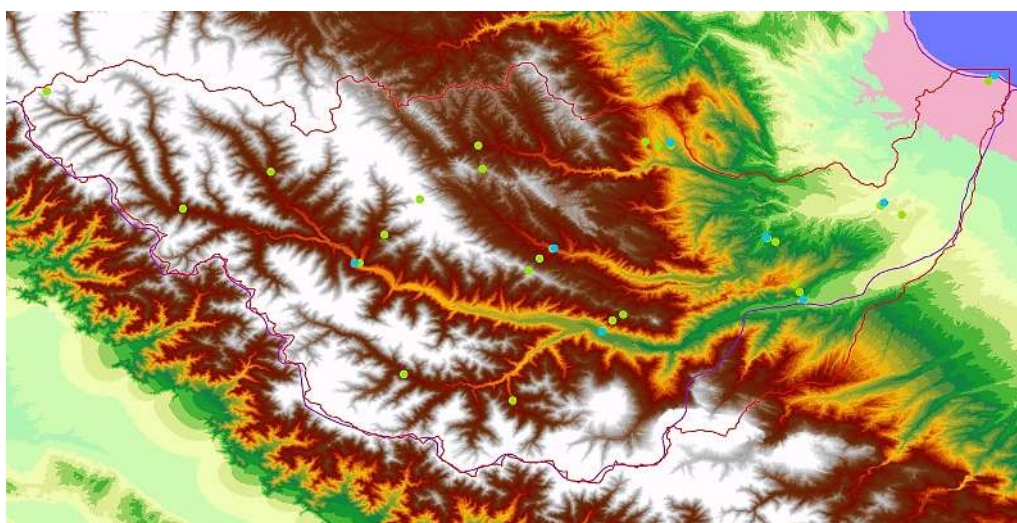


Рис. 1. Ключевые точки полевых исследований в бассейне Самура

Предгорные сегменты характеризуются максимальной концентрацией антропогенных воздействий: аграрного освоения, линейной инфраструктуры и локальных узлов водохозяйственного регулирования. Для трансграничного Самура дополнительное значение имеют режимы вододеления и экологического попуска [7], закреплённые межправительственным соглашением [10].

Снижение уровня Каспийского моря влияет на нижние звенья бассейнов и устойчивость дельтовых и прибрежных комплексов, изменяя условия базиса эрозии, режимы увлажнения и осушения приморской зоны. В этих условиях предгорья выступают центральным звеном каскада горы — предгорья — низовья — море, где собираются и преобразуются эффекты как вышерасположенных, так и нижерасположенных частей бассейна.

Сопоставление бассейнов показывает, что наиболее высокое геоэкологическое напряжение характерно для Самура, где сочетаются трансграничный статус, интенсивный водозабор, высокая уязвимость дельты и выраженный каспийский фактор (табл. 1). Для Сулака ведущую роль играют аграрная трансформация и инфраструктурная насыщенность предгорий на фоне активных эрозионно-склоновых процессов. Для Уллучая решающее значение имеют ливневая эрозия, паводковая опасность и диффузное загрязнение.

Таблица 1. Сравнительная характеристика предгорных сегментов бассейнов Сулака, Уллучая и Самура

Бассейн	Ключевая роль предгорий	Доминирующие стрессоры	ИГНП / уровень
Сулак	Перераспределение стока; концентрация инфраструктуры; усиление эрозионно-склоновых процессов	Аграрная трансформация; линейная инфраструктура; локальные техногенные воздействия	0,62 / умеренно высокий
Уллучай	Контакт горы — равнина; чувствительность к ливневой эрозии и диффузному загрязнению	Паводковая опасность; полевой сток; дорожная сеть	0,50 / умеренный
Самур	Узел водопользования и вододеления; связь с дельтой и Каспием; высокая уязвимость низовьев	Водозабор; трансграничное регулирование; регрессия Каспия	0,74 / высокий

Предлагаемый ИГНП следует рассматривать как скрининговый инструмент. Его достоинство — простота и возможность ранжирования территорий даже при ограниченности исходных данных. Ограничение методики связано с необходимостью последующей калибровки весов и компонент

на основе наблюдений. Тем не менее уже на первом этапе ИГНП позволяет связать бассейновую диагностику с практикой мониторинга, природоохранного планирования и водохозяйственного управления.

Как следует из табл. 1, наиболее напряжённым звеном является бассейн Самура. Именно для него в приоритете принятие мер для мониторинга и адаптивного водохозяйственного управления. В случае Сулака на первый план выходят меры по стабилизации предгорных агроландшафтов и снижению эрозионной нагрузки, тогда как для Уллучая ключевыми являются адресные противоэрозионные и противопаводковые мероприятия.

С прикладной точки зрения предложенная схема означает необходимость смещения акцента мониторинга именно в предгорные сегменты бассейнов. Здесь целесообразно размещать ключевые наблюдательные площадки, фиксирующие одновременно состояние склоновых процессов, качество поверхностных вод, структуру землепользования и изменения растительности. Такой узловой мониторинг позволяет получить интегральную картину быстрее и надёжнее, чем разрозненные наблюдения только в верховьях или только в дельтах.

Для трансграничного Самура бассейновый подход имеет и прямое управленческое значение. Он требует увязки режимов вододеления, экологического попуска и охраны дельтовых экосистем с состоянием предгорий как промежуточного, но критически важного звена. Игнорирование этой зоны ведёт к недооценке каскадных эффектов, тогда как включение предгорий в схемы территориального планирования создаёт основу для более устойчивого водопользования и для профилактики геоэкологических рисков.

Визуальные материалы по бассейну Самура подтверждают, что предгорно-низовое звено является зоной наложения аккумулятивных форм рельефа, уязвимых дельтовых экосистем и антропогенной нагрузки на оросительную сеть (рис. 2).



Рис. 2. Проявления геоэкологического напряжения в бассейне реки Самур;
а — конусы выноса, используемые под огороды; б — лиановый лес дельты;
в — загрязнение оросительного канала

Заключение. Проведённое исследование подтверждает, что бассейновый подход является адекватной методологической основой интегральной геоэкологической оценки горных рек Северо-Восточного Кавказа. Его применение позволяет рассматривать бассейны Сулака, Уллучая и Самура не как набор изолированных участков, а как целостные каскадные системы, в которых верхние, горные звенья, предгорья и равнинно-приморские низменности связаны потоками воды, вещества и энергии и антропогенными воздействиями.

Особое значение в этой системе имеют предгорные сегменты. Они функционально выступают узлами геосистемного напряжения, поскольку именно здесь концентрируются и преобразуются вещественно-энергетические потоки, основные формы природопользования, инфраструктурные узлы и проявления опасных процессов. Совокупное действие антропогенного давления, современных климатических изменений и регрессии Каспийского моря усиливает геоэкологические риски и повышает требования к адаптивному управлению предгорными территориями. Наиболее ярко этот эффект проявляется в трансграничном бассейне Самура, где природная уязвимость дельтовых комплексов сочетается с водозабором, трансграничным регулированием и воздействием каспийского фактора.

Регрессия Каспийского моря должна рассматриваться как системообразующий фактор для нижних звеньев бассейнов и дельтовых комплексов, а потому её учёт необходим при разработке бассейновых схем мониторинга, природоохранного планирования и водохозяйственного управления. Предложенный индекс геоэкологического напряжения предгорий (ИГНП) может служить инструментом первичного ранжирования предгорных сегментов по приоритетам мониторинга и управления. Его дальнейшее развитие связано с калибровкой весов, уточнением компонент и расширением системы наблюдений, что позволит перейти от предварительной диагностики к более надёжной оценке устойчивости и управляемости горно-бассейновых геосистем.

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. Атаев З. В. Теоретико-методологические основы и региональные особенности выделения предгорных ландшафтов как самостоятельных геосистем // Геология и геофизика Юга России. 2025. Т. 15, № 4. С. 151–168. <https://doi.org/10.46698/o0195-2486-7930-v>
2. Беручашвили Н. Л. Кавказ: ландшафты, модели, эксперименты. Тбилиси : Изд-во ТГУ, 1995. 314 с.
3. Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А. Межгодовые изменения уровней в системе Каспийское море – залив Кара-Богаз-Гол и гидрометеорологических параметров Каспийского региона в первой четверти XXI века // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22, № 6. С. 312–325. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-6-312-325>
4. Государственный водный реестр (ГВР). Река Сулак: карточка водного объекта (электронный ресурс). 2026. URL: <https://textual.ru/gvr/index.php?card=173686> [дата обращения: 17.03.2026].
5. Государственный водный реестр (ГВР). Река Уллучай: карточка водного объекта (электронный ресурс). 2026. URL: <https://textual.ru/gvr/index.php?card=173944> [дата обращения: 17.03.2026].
6. Государственный водный реестр (ГВР). Река Самур: карточка водного объекта (электронный ресурс). 2026. URL: <https://textual.ru/gvr/index.php?card=174013> [дата обращения: 17.03.2026].
7. Демин А. П., Шаталова К. Ю. Принципы и практика распределения водных ресурсов трансграничных рек России // География и природные ресурсы. 2015. № 1. С. 22–29. <https://elibrary.ru/tkkwcl>

8. Исаченко А. Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование : учебник. Москва : Высшая школа, 1991. 366 с.
9. Росгидромет. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. Санкт-Петербург : Научно-технологические, 2022. 124 с. URL: https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/compressed.pdf [дата обращения: 17.03.2026].
10. Соглашение между Правительством Российской Федерации и Правительством Азербайджанской Республики о рациональном использовании и охране водных ресурсов трансграничной реки Самур (Баку, 03.09.2010). URL: <https://voda.gov.ru/regulatory/doc-3276/> [дата обращения: 17.03.2026].
11. Сочава В. Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск : Наука, Сибирское отделение, 1978. 320 с. <https://elibrary.ru/tarvmp>
12. Drusch M., Del Bello U., Carlier S., Colin O., Fernandez V., Gascon F., Hoersch B., Isola C., Laberinti P., Martimort P., Meygret A., Spoto F., Sy O., Marchese F., Bargellini P. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. Remote Sensing of Environment, 2012, vol. 120, pp. 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
13. Farr T. G., Rosen P. A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D. The Shuttle Radar Topography Mission. Reviews of Geophysics, 2007, vol. 45, art. RG2004 (43 p.). <https://doi.org/10.1029/2005rg000183>
14. Koriche S. A., Singarayer J. S., Cloke H. L. The fate of the Caspian Sea under projected climate change and water extraction during the 21st century. Environmental Research Letters, 2021, vol. 16, art. 094024 (11 p.). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1af5>
15. Lahijani H., Leroy S. A. G., Arpe K., Crétaux J.-F. Caspian Sea level changes during instrumental period, its impact and forecast: A review. Earth-Science Reviews, 2023, vol. 241, art. 104428 (27 p.). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104428>
16. Samant R., Prange M. Climate-driven 21st century Caspian Sea level decline estimated from CMIP6 projections. Communications Earth & Environment, 2023, vol. 4, art. 357 (12 p.). <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01017-8>
17. Viviroli D., Dürri H. H., Messerli B., Meybeck M., Weingartner R. Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. Water Resources Research, 2007, vol. 43, art. W07447 (13 p.). <https://doi.org/10.1029/2006wr005653>

УДК 911.52:556.5:004.8

Перспективы применения искусственного интеллекта для анализа сезонной динамики и гидротермического режима ландшафтов горных речных бассейнов Прикаспийского 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

Рассмотрены возможности применения методов искусственного интеллекта для анализа сезонной динамики растительности и гидротермического режима ландшафтов горных речных бассейнов Прикаспийского Кавказа. Исследование основано на комплексном использовании спутниковых временных рядов MODIS NDVI/EVI и MODIS Snow Cover за 2000–2025 гг., архивных и современных снимков Landsat, данных 42 метеорологических станций России, Азербайджана и Ирана за 1960–2025 гг., а также полевых материалов по 87 ключевым точкам. Для решения поставленных задач применены алгоритм TIMESAT, Random Forest, метод k -средних и иерархическая кластеризация, градиентный бустинг XGBoost, многослойная нейронная сеть и свёрточная сеть ResNet-18. Установлено, что в среднегорных ландшафтах начало вегетации смещается на более ранние сроки со скоростью 3–4 дня за десятилетие, а продолжительность вегетационного периода увеличивается на 12–15 дней; выделены пять устойчивых типов сезонной динамики; для индекса аридности получены прогнозы на ближайшие десятилетия, а для бассейна Самура зафиксированы признаки ускорения антропогенной трансформации дельтовых экосистем. Сделан вывод о высокой эффективности методов искусственного интеллекта в задачах автоматизированного мониторинга, классификации и прогноза при условии опоры на полевые наблюдения и географическую интерпретацию результатов.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, сезонная динамика, NDVI, гидротермический режим, горный речной бассейн, Прикаспийский Кавказ, геоэкологическая оценка, дистанционное зондирование Земли

Современная геоэкологическая оценка горных речных бассейнов требует одновременной работы с разнородными и разномасштабными данными: спутниковыми изображениями, многолетними климатическими рядами, гидрологическими наблюдениями и полевыми описаниями ландшафтов. В условиях горных стран классические статистические процедуры далеко не всегда позволяют надёжно выявлять нелинейные связи, учитывать пространственно-временную неоднородность и быстро обрабатывать растущие объёмы информации. Именно поэтому методы искусственного интеллекта, прежде всего машинного обучения и нейросетевого анализа, всё чаще рассматриваются как инструмент не вспомогательный, а методологически значимый [4].

Прикаспийский Кавказ представляет в этом отношении весьма показательный регион. Здесь сочетаются влажные субтропики юго-западного побережья Каспия и аридные равнинные территории Апшерона и северо-западного Прикаспия. Высотный диапазон — от каспийского побережья с отрицательными отметками до высокогорий Восточного Кавказа и Северного Ирана. На этом фоне формируются резко контрастные типы сезонной динамики ландшафтов: в горах преобладает моноциклический ход вегетации, тогда как на аридных равнинах нередко фиксируется бициклический, связанная с весенне-осенними максимумами и с летней депрессией растительности. Гидротермический режим определяет не только продуктивность экосистем, но и водность рек, состояние дельтовых комплексов, частоту засух, паводков и других опасных процессов [1, 2, 5, 6].

Цель работы — оценить возможности методов искусственного интеллекта для анализа и прогнозирования сезонной динамики растительности и гидротермических параметров ландшафтов горных речных бассейнов Прикаспийского Кавказа. Для достижения цели решались четыре задачи:

- 1) извлечение фенологических дат начала, пика и окончания вегетационного сезона из многолетних рядов NDVI;

- 2) объективная классификация типов сезонной динамики ландшафтов по спутниковым данным;
- 3) прогнозирование гидротермических параметров, прежде всего индекса аридности (AI, Aridity Index) и речного стока;
- 4) оценка антропогенной трансформации ландшафтов по многолетним космическим снимкам.

Материал и методы. Исследование базируется на трёх взаимодополняющих блоках данных (табл. 1). Первый блок составляют спутниковые временные ряды: продукты MODIS NDVI и EVI за 2000–2025 гг. с пространственным разрешением 250 м и 16-дневным шагом, данные MODIS Snow Cover для анализа сезонной динамики снежного покрова и многолетний архив Landsat с пространственным разрешением 30 м [3]. Второй блок включает климатические ряды 42 метеорологических станций России, Azerbaijan и Ирана за 1960–2025 гг., а также данные реанализа ERA5-Land, обеспечивающего более детальное пространственное покрытие и сопоставимость климатических полей [11]. Третий блок представляет полевые материалы по 87 ключевым точкам с описанием ландшафтных фаций и отбором проб почв, воды и растительности.

Таблица 1. Исходные данные исследования

Блок данных	Состав	Охват	Назначение
Спутниковые данные	MODIS NDVI/EVI, MODIS Snow Cover, архив Landsat	2000–2025 гг.; 250 м, 16 дней; Landsat 30 м	Извлечение фенодат, анализ снежного режима, оценка изменений земного покрова
Климатические данные	42 метеостанции России, Azerbaijan и Ирана, ERA5-Land	1960–2025 гг.; сетка реанализа 9 км	Климатические предикторы, моделирование гидротермических условий, верификация результатов
Полевые материалы	87 ключевых точек, описания фаций, пробы почв, воды и растительности	Маршрутные и стационарные наблюдения	Обучение и валидация моделей, географическая интерпретация спутниковых данных

Примечание: MODIS — Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (спектрорадиометр среднего разрешения); NDVI — Normalized Difference Vegetation Index (нормализованный разностный вегетационный индекс); EVI — Enhanced Vegetation Index (улучшенный вегетационный индекс); ERA5-Land — наземный компонент реанализа ERA5 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды.

Наряду с общими климатическими и дистанционными показателями в качестве входных признаков использованы количественные характеристики предгорных ландшафтов, позволяющие формализовать орографические и экспозиционные различия. Барьерный эффект горной системы оценён по введённой нами формуле:

$$Jx = ((Pg - Pm) / Pm) \times 100 \%, \quad (1)$$

где Pg — среднегодовая сумма атмосферных осадков в горной зоне;

Pm — среднегодовая сумма осадков в предгорьях.

Для интегральной оценки фактической контрастности увлажнения противоположных макросклонов использован авторский коэффициент асимметрии увлажнения:

$$Ka = Pnaw / Ppodw, \quad (2)$$

где $Pnaw$ — среднееголетняя сумма атмосферных осадков на наветренном, наиболее увлажнённом макросклоне;

$Ppodw$ — среднееголетняя сумма атмосферных осадков на подветренном макросклоне.

Для количественной характеристики радиационной экспозиционной асимметрии применён коэффициент инсоляционной асимметрии:

$$K_{ins} = R_s / R_n, \quad (3)$$

где R_s — суммарная солнечная радиация на склонах южной экспозиции;

R_n — суммарная солнечная радиация на склонах северной экспозиции.

В условиях Прикаспийского Кавказа циркуляционный фактор не вводился как самостоятельный коэффициент через отношение осадков на макросклонах различной экспозиции, поскольку такая запись либо не отражает реальную конфигурацию влагонесущих потоков, либо приводит к дублированию коэффициента асимметрии увлажнения. Поэтому циркуляционное влияние учитывалось при интерпретации коэффициента K_a и барьерного эффекта J_x . Введение подобных показателей позволяет перейти от качественных описаний к численно выраженным признакам, пригодным для алгоритмического анализа.

Результаты и обсуждение. Фенологическое моделирование временных рядов NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, нормализованный разностный вегетационный индекс) показало, что для каждого пикселя и для каждого года могут быть устойчиво извлечены даты начала вегетации (SOS, Start of Season), даты максимального развития растительности (POS, Peak of Season) и даты окончания вегетации (EOS, End of Season). Наиболее выраженная высотная закономерность состоит в более позднем начале вегетации и в сокращении активного сезона с увеличением абсолютной высоты. Использование алгоритма случайного леса (Random Forest) [7] для прогноза фенологических дат по климатическим предикторам показало, что для среднегорных ландшафтов ошибка прогноза начала вегетации составляет около $\pm 5 \dots 7$ дней, а для высокогорий — $\pm 8 \dots 10$ дней. Для альпийского пояса выявлена сильная связь между датой схода снежного покрова по данным спектрорадиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и началом вегетации. Коэффициент корреляции достигает 0,85, что указывает на принципиальную возможность оперативного фенологического мониторинга по спутниковым данным.

Обработка рядов с применением непараметрического теста Манна — Кендалла и оценщика Сена выявила статистически значимые тренды сезонной динамики за период с 2000 по 2025 г. (табл. 2). В среднегорьях зафиксировано смещение SOS на более ранние сроки со скоростью до 3,8 дня за десятилетие, в предгорьях — до 3,2 дня, тогда как в высокогорьях показатель несколько ниже. Одновременно наблюдается увеличение длительности вегетационного периода: в среднегорьях — на 15 дней, в предгорьях — на 14. На аридных равнинах выраженного смещения начала вегетации не установлено, однако отмечено снижение максимальных значений NDVI на 5–10 %, что согласуется с усилением летних засух и с ростом влагодефицитности. Для гирканских лесов динамика сезонных параметров статистически менее выражена, что объясняется сглаживающим влиянием влажного субтропического климата [9].

Таблица 2. Тренды сезонной динамики в основных высотных поясах
Прикаспийского Кавказа

Высотный пояс	SOS, дн. за 10 лет	POS, дн. за 10 лет	EOS, дн. за 10 лет	LOS, дн.	NPP, г С·м ² ·год ⁻¹	<i>p</i>
Высокогорья (2500–3000 м)	–2,5	–1,2	0,5	7	300–400	< 0,05
Среднегорья (1000–2500 м)	–3,8	–2,0	2,3	15	800–1200	< 0,01
Низкогорья и предгорья (500–1000 м)	–3,2	–1,8	2,5	14	600–900	< 0,01
Аридные равнины (–29,3–500 м)	–1,0	0,2	–1,2	–3	150–300	> 0,05
Гирканские леса (–29,3–700 м)	–0,4	–0,2	0,8	2	1100–1400	> 0,05

Примечание: SOS — дата начала вегетации (Start of Season); POS — дата сезонного максимума развития растительности (Peak of Season); EOS — дата окончания вегетации (End of Season); LOS — длительность вегетационного периода (Length of Season); NPP — чистая первичная продукция (Net Primary Production); *p* — уровень статистической значимости.

На основе многолетних профилей NDVI методом k -средних выделены пять устойчивых типов сезонной динамики, хорошо согласующихся с высотной поясностью региона: горный моноциклический (альпийские луга), лесной моноциклический удлинённый (буковые и дубовые леса среднегорий), предгорный переходный (лесостепь), аридный бициклический (полупустыни с весенне-осенними пиками) и субтропический непрерывный (гирканские леса). Пространственное распределение этих типов показано на рис. 1.

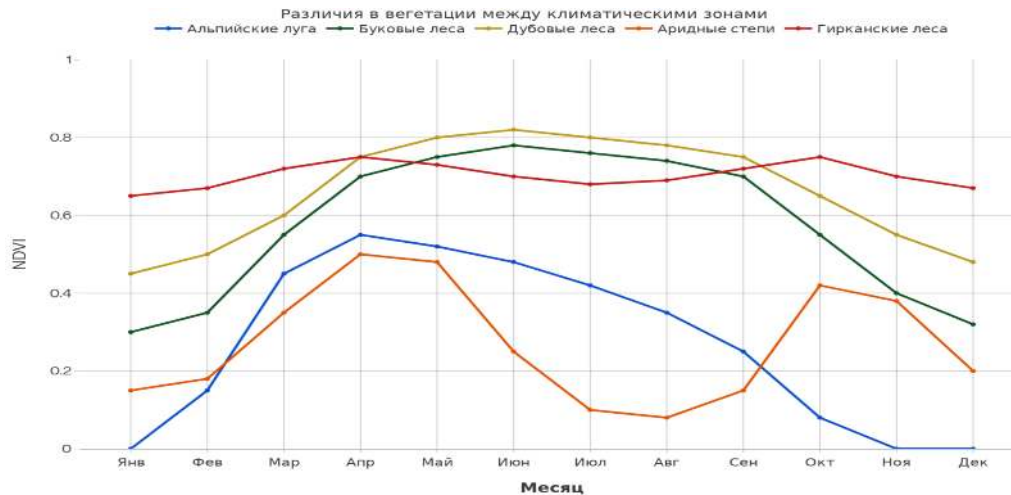


Рис. 1. Пространственное распределение типов сезонной динамики растительности на территории горных речных бассейнов Прикаспийского Кавказа (Дагестан, Азербайджан, север Ирана). Кластеризация выполнена по 16-дневным композитам MODIS NDVI за 2000–2025 гг. методом k -средних. Типы сезонной динамики обозначены цифрами: 1 — горный моноциклический (альпийские луга); 2 — лесной моноциклический удлинённый (буково-дубовые леса); 3 — предгорный переходный (лесостепь); 4 — аридный бициклический (полупустыни); 5 — субтропический непрерывный (гирканские леса)

Для прогноза гидротермического режима была обучена многослойная нейронная сеть с тремя скрытыми слоями (64, 32 и 16 нейронов). Входными параметрами служили средняя температура предыдущего месяца, индекс североатлантического колебания и абсолютная высота местности; выходом являлся прогноз индекса аридности (AI, Aridity Index) на следующий вегетационный сезон. Средняя ошибка прогноза составила 12–15 %, что представляется приемлемым для оперативной оценки риска засухи. Для бассейна Самура модель показала рост индекса аридности с 2,3 в 2020 г. до 2,6–2,8 к 2035 г. по сценарию RCP8.5. В геоэкологическом отношении это означает дальнейшее усиление аридности и возрастание риска деградации уникальных дельтовых лесов.

Отдельное направление исследования было связано с оценкой антропогенной трансформации ландшафтов по многолетним спутниковым снимкам. Свёрточная нейронная сеть ResNet-18 была обучена на сериях Landsat за 1990, 2000, 2010 и 2025 гг. и осуществляла классификацию земного покрова по пяти классам: лес, агроландшафты, застройка, болота и открытая вода. Точность классификации на валидационной выборке составила 87–92 %. Для бассейна Самура установлено сокращение площади лесов на 12–15 % за 35 лет, при этом основные потери пришлись на предгорья и дельту. Одновременно площадь агроландшафтов увеличилась на 18–22 %. Особого внимания заслуживает факт ускорения деградации дельтовых экосистем после 2010 г., что совпадает с усилением водозабора, изменением режима увлажнения и нарастающей регрессией уровня Каспийского моря.

Полученные результаты позволяют обозначить и более широкие перспективы применения искусственного интеллекта в ландшафтных исследованиях. Во-первых, это автоматизированное дешифрирование ландшафтных карт по снимкам высокого разрешения, что способно многократно ускорить обновление картографической основы. Во-вторых, прогнозирование опасных процессов — паводков, селей и оползней — с использованием ансамблей деревьев решений и нейросетевых архитектур [8]. В-третьих, это создание систем постоянного мониторинга дельтовых экосистем с автоматическим выделением зон усыхания леса, засоления почв и зарастания русловых протоков. В-четвёртых,

трансграничная гармонизация данных России, Азербайджана и Ирана, при которой методы машинного обучения могут выступать средством «сшивания» разновременных и разномасштабных картографических материалов [12].

Вместе с тем применение искусственного интеллекта в геоэкологических исследованиях имеет ограничения. Первая проблема — недостаточность обучающих выборок для редких ландшафтных комплексов, прежде всего гляциально-нивальных. Здесь перспективны аугментация данных (искусственное увеличение объёма обучающей выборки путём модификации существующих данных) и трансферное обучение. Вторая проблема — ограниченная интерпретируемость результатов, характерная для сложных нейросетевых моделей. Для её преодоления целесообразно использовать методы объяснимого искусственного интеллекта, в частности SHAP и LIME [10, 13]. Третья проблема — значительные вычислительные затраты при работе с длинными спутниковыми рядами и многомерными климатическими полями. Однако развитие облачных платформ и сервисов распределённых вычислений заметно снижает этот барьер и расширяет доступ исследователей к современным инструментам.

Заключение. Апробация комплекса методов искусственного интеллекта на материалах по горным речным бассейнам Прикаспийского Кавказа показала их высокую эффективность в решении задач фенологического анализа, классификации сезонной динамики, прогноза гидротермических параметров и оценки антропогенной трансформации ландшафтов. Использование TIMESAT, Random Forest, XGBoost и нейросетевых моделей позволило перейти от преимущественно описательного анализа к количественному выявлению закономерностей и к построению прогностических сценариев.

Наиболее значимым результатом является установление статистически выраженного смещения начала вегетации на более ранние сроки и удлинения вегетационного периода в среднегорных и низкогорно-предгорных ландшафтах. Одновременно выделены пять устойчивых типов сезонной динамики, хорошо согласующихся с высотной поясностью и региональной климатической дифференциацией. Для бассейна Самура получены оценки роста индекса аридности на ближайшие десятилетия, а анализ многолетних спутниковых снимков выявил признаки ускорения антропогенной трансформации и деградации дельтовых экосистем.

Искусственный интеллект в данном случае не заменяет полевые наблюдения, регионально-географический анализ и профессиональную интерпретацию, но существенно усиливает их. В эпоху лавинообразного роста данных именно сочетание ландшафтоведческого подхода, дистанционного зондирования и современных алгоритмов машинного обучения становится одним из наиболее перспективных путей развития геоэкологических исследований горных речных бассейнов.

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. Атаев З. В., Братков В. В., Абдулаев К. А., Балгуев Т. Р., Гаджибеков М. И. Географические аспекты сохранения биологического и ландшафтного разнообразия в проектируемом Самурском национальном парке на Восточном Кавказе // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2016. Т. 10, № 3. С. 91–102. <https://elibrary.ru/wxjkkp>
2. Атаев З. В., Братков В. В., Абдулаев К. А., Гаджибеков М. И. Ландшафты национального парка «Самурский» // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2020. Т. 14, № 3. С. 63–80. <https://elibrary.ru/ocmmnn>
3. Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А. Состояние и перспективы развития методов спутникового картографирования растительного покрова России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 5. С. 203–221. <https://elibrary.ru/uzndsz>

4. Барталев С. А., Лупян Е. А. Исследования и разработки ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 1. С. 197–214. <https://elibrary.ru/qixeux>
5. Братков В. В., Кравченко И. В., Туаев Г. А., Атаев З. В., Абдулжалимов А. А. Применение вегетационных индексов для картографирования ландшафтов Большого Кавказа // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2016. Т. 10, № 4. С. 97–111. <https://elibrary.ru/xyetcr>
6. Гаджимурадова З. М., Атаев З. В., Братков В. В. Влияние современных климатических изменений на динамику растительного покрова южной части предгорных ландшафтов Дагестана (по материалам дистанционного зондирования Земли) // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2017. Т. 11, № 3. С. 109–117. <https://elibrary.ru/yqxqbg>
7. Breiman L. Random forests. Machine Learning, 2001, vol. 45, no. 1, pp. 5–32. <https://doi.org/10.1023/a:1010933404324>
8. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. In: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York : ACM, 2016, pp. 785–794. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
9. Ghadimi S., Ahrari A., Patro R., Akbari M., Sefidi K., Klöve B., Haghighi A. Satellite-based phenology analysis of the Hyrcanian forest in the Alborz Mountains and Caspian Sea shores, Iran. International Journal of Water Resources Development, 2025, vol. 41, iss. 1, pp. 78–101. <https://doi.org/10.1080/07900627.2023.2293862>
10. Lundberg S. M., Lee S.-I. A unified approach to interpreting model predictions. In: Advances in Neural Information Processing Systems 30 : Annual Conference on Neural Information Processing Systems, December 04–09, 2017, Long Beach, CA, USA / I. Guyon, U. Von Luxburg, S. Bengio, H. Wallach, R. Fergus, S. Vishwanathan, R. Garnett (Eds). New York : Curran Associates, Inc., 2017, pp. 4766–4774. <https://doi.org/10.48550/arxiv.1705.07874>
11. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D. G., Piles M., Rodríguez-Fernández N. J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J.-N. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. Earth System Science Data, 2021, vol. 13, iss. 9, pp. 4349–4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
12. Reichstein M., Camps-Valls G., Stevens B., Jung M., Denzler J., Carvalhais N., Prabhat. Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science. Nature, 2019, vol. 566, pp. 195–204. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0912-1>
13. Ribeiro M. T., Singh S., Guestrin C. “Why Should I Trust You?”: Explaining the predictions of any classifier. In: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York : ACM, 2016, pp. 1135–1144. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939778>

УДК 556.5:504.05:004.8(470.661)

Оценка антропогенного воздействия на бассейн реки Аргун Чеченской Республики с помощью инструментов искусственного интеллекта

Белакаев С. С.

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

✉ info@gstou.ru

Ключевые слова: река Аргун, Чеченская Республика, антропогенное воздействие, искусственный интеллект, машинное обучение, дистанционное зондирование, NDVI, ГИС, мониторинг горных бассейнов

Река Аргун — правый приток Сунжи (бассейн Терека), крупнейшая горная река Чеченской Республики (рис. 1). Её длина — 148 км, площадь водосбора — 3390 км², средний расход воды — 45,6 м³·с⁻¹. Несмотря на природоохранный статус значительной части бассейна (Аргунский заказник), экосистема реки испытывает нарастающую антропогенную нагрузку, выражающуюся в превышении ПДК по ряду показателей в нижнем течении. Системная оценка этого воздействия с применением современных цифровых инструментов ранее не проводилась, что и определяет актуальность настоящего исследования.

Цель — разработка методологии AI-assisted оценки антропогенного воздействия на бассейн реки Аргун на основе данных дистанционного зондирования Земли и алгоритмов машинного обучения за период 2010–2026 гг.



Рис. 1. Река Аргун

В качестве источников информации использованы мультиспектральные спутниковые снимки Landsat-8/9 и Sentinel-2 из архивов NASA/USGS и ESA. На их основе рассчитаны спектральные индексы NDVI и NDWI, построены карты землепользования/землепокрытия. Классификация выполнена алгоритмом Random Forest по 8 тематическим классам; для автоматизированного обнаружения несанкционированных свалок применена CNN-архитектура U-Net. Обработка реализована в среде Google Earth Engine и Python.

Идентифицированы основные источники антропогенного воздействия на бассейн: несанкционированные свалки твёрдых коммунальных отходов (47 объектов в буферной зоне, 500 м от русла), нерегулируемая русловая добыча инертных материалов, сельскохозяйственный диффузный сток, неконтролируемое рекреационное освоение Аргунского ущелья, коммунальные сбросы в зоне города Аргун и постконфликтное загрязнение почв нефтепродуктами.

По результатам анализа разновременных снимков установлено: за 2010–2024 гг. площадь пойменных буферных лесов сократилась на 12,3 %; доля водонепроницаемых поверхностей в бассейне возросла на 8,7 %; значение NDVI в нижнем течении снизилось с 0,61 до 0,48, что свидетельствует об устойчивой деградации прибрежных экосистем. Доля площади нарушенных земель увеличилась с 1,8 до 4,2 %.

Точность классификации Random Forest составила 87,4 % (Кappa = 0,83). Модель U-Net обеспечила обнаружение свалок с точностью 84,7 % и полнотой 81,2 %. Это позволяет рекомендовать предложенную методологию для регулярного автоматизированного мониторинга.

Предложена трёхуровневая система ИИ-мониторинга бассейна: 1) автоматизированный дистанционный мониторинг (ежеквартальная обработка снимков); 2) полевой верификационный мониторинг в флажированных точках; 3) предиктивное моделирование динамики антропогенной трансформации. Приоритетные зоны охраны — пойменные буферные леса нижнего течения, русловая зона города Аргун и территория Аргунского заказника.

Практическая значимость исследования состоит в разработке тиражируемой методологии для других горных бассейнов рек Северного Кавказа. Внедрение системы в региональный экологический мониторинг Чеченской Республики обеспечит своевременное обнаружение очагов деградации и принятие управленческих решений в области охраны водных ресурсов.

УДК 631.416(665.2)

Особенности распределения и запасы биогенных элементов в бассейне реки Фатала (Западная Африка, Гвинейская Республика)

Братанов Н. С.¹, Горбунов Р. В.², Keita I.³, Фам К. Н.¹, Горбунова Т. Ю.¹, Фаерман А. В.¹,
Киселёва М. В.¹, Diallo A. I. P.³

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

²Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

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

✉ bratanov@ibss-ras.ru

Проанализированы результаты исследований, проведённых в 2023 г. на территории бассейна реки Фатала в Гвинейской Республике (Западная Африка). Определены показатели содержания биогенных элементов, в частности углерода и азота, в почвенных горизонтах на установленных 18 участках. Рассмотрены особенности распределения содержания биогенных элементов в сухой сезон. В ходе работ выявлено, что большинство участков исследования включены в сельскохозяйственный оборот с применением метода подсеčno-огневого земледелия, что влияет на содержание элементов.

Ключевые слова: *общий углерод, общий азот, почвы, река Фатала, Гвинейская Республика*

Плодородие почвы, зависящее от содержания углерода, является одним из важнейших её свойств. При этом глобальный цикл углерода связан с плодородием почвы, её буферностью, эрозийной устойчивостью и рядом других параметров. Установлено, что в ходе глобального круговорота углерода почва способна как терять, так и накапливать органическое вещество. Для оценки скорости накопления органического вещества достаточно часто используют данные о содержании двух наиболее важных элементов — углерода и азота. Значительную роль в их распределении и накоплении играет повсеместно применяемый в Западной Африке метод подсеčno-огневого земледелия — способ быстрой расчистки лесных территорий и кратковременного повышения плодородия на возделываемых участках.

Данные и методы. Район исследования расположен в Западной Африке, на территории Гвинейской Республики, и занимает площадь 692 км². Река берёт начало на плато Фута-Джалон и протекает в двух административных регионах, Боке и Киндия, на западе впадая в Атлантический океан (рис. 1). На исследуемом участке выделяются 3 типа почв — литосоли, флювиасоли и феррасоли. Они характерны для всей территории Западной Африки [1].

Для проведения исследования были выбраны 18 точек, расположенных на условно коренных участках ландшафта (рис. 2). Были учтены положение в рельефе, геологическое строение и растительный покров. Для каждой точки провели ландшафтное описание и заложение почвенного профиля с отбором проб из всех почвенных горизонтов [2].

Первичная пробоподготовка почвенных образцов для анализа выполнена согласно ГОСТ 17.4.4.02-2017 «Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа».

Для определения содержания общего углерода (C) и общего азота (N) в почвенных образцах использовали элементный CHNS-O-анализатор ECS 4024. Диапазон определения массовой доли элемента — от 0,001 до 100 %. Относительная ошибка находится в пределах 0,1 %.

Результаты и обсуждение. В ходе эксперимента было определено содержание общего углерода (C_{общ}) и азота (N_{общ}) для серий образцов Ф1–Ф18 (рис. 3).

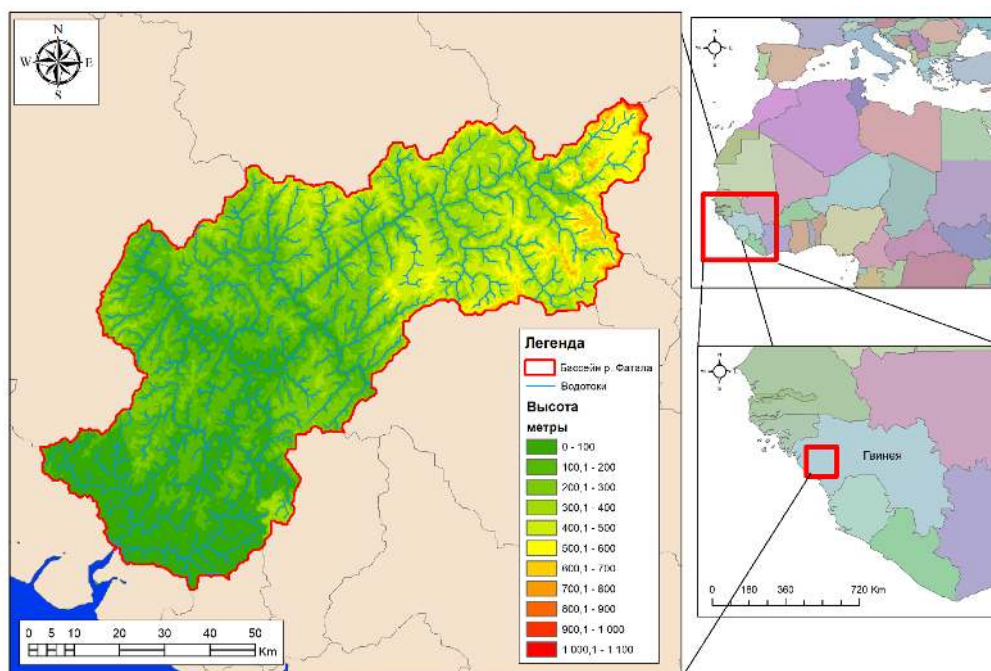


Рис. 1. Бассейн реки Фатала

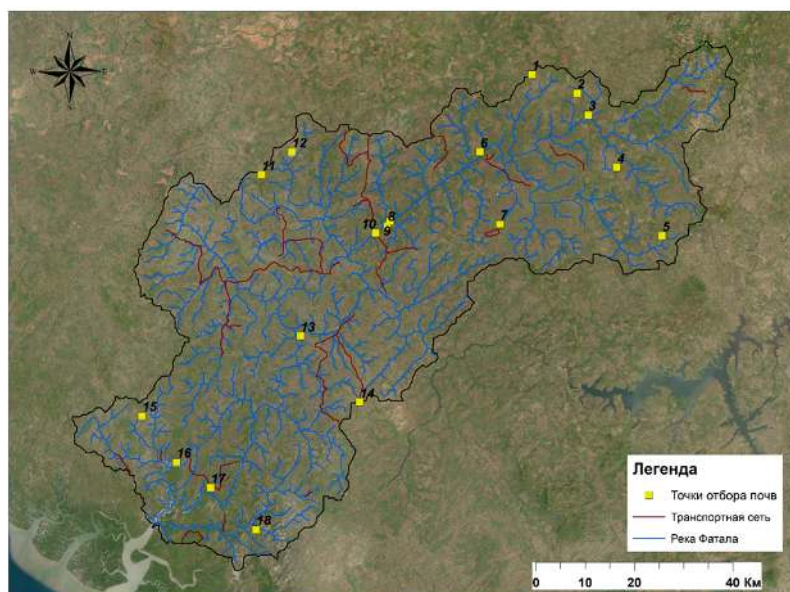


Рис. 2. Географическое расположение участков исследования на территории бассейна реки Фатала

В ходе исследования установлено, что содержание $C_{\text{общ}}$ в верхних почвенных горизонтах бассейна реки Фатала варьирует от 3,1 до 45,6 %, а $N_{\text{общ}}$ — от 0 до 0,84 %. Среднее значение $C_{\text{общ}}$ для верхнего горизонта составляет 22,20 %, среднее содержание $N_{\text{общ}}$ — 0,21 %. Наибольшие значения для обоих элементов зафиксированы для фаций Ф1, Ф3, Ф4, Ф6 и Ф10: среднее содержание C достигает 33,9 %, а N — 0,42 %. Важно, что эти участки длительное время не подвергались подсечно-огневому земледелию. Это, вероятно, и способствовало сохранению органического вещества.



Рис. 3. Распределение биогенных элементов на участках исследования
и по почвенным горизонтам

Значения мольного отношения C/N в изученных пробах варьируют в исключительно широких пределах — от 26,4 до 302,2. Это позволяет выделить три основные группы образцов, различающихся по степени азотной обеспеченности и, предположительно, по характеру органического вещества.

Первая группа характеризуется очень высоким C/N — 200–300. В неё входят образцы фаций Ф3, Ф5, Ф11–Ф14 и Ф6Bg. Так, $Ф3A = 295,4$; $Ф11AC = 302,2$; $Ф12Ad = 295,9$. Столь высокое значение указывает на крайне низкое содержание азота и может интерпретироваться как присутствие длинных углеродных цепей с редкими азотсодержащими группами либо как наличие безазотистого компонента, например углеводов. Характерно, что в фациях Ф3 и Ф11–Ф13 C/N остаётся стабильно высоким независимо от почвенного горизонта (А, АВ, АС и В1), что позволяет предположить слабое влияние типа обработки почвы на элементный состав в этой группе.

Вторая группа демонстрирует умеренные значения C/N — 80–150. Сюда относятся фации Ф1 (108,6), Ф3Ad (126,7), Ф6 (83,8–113,8), Ф14Ad (145,4), Ф17 (98,0–178,5), а также Ф4Ad со значением, примыкающим к верхней границе (184,8). Такие соотношения свидетельствуют о заметном, но не доминирующем содержании азота ($N_{\text{общ}}$ от 0,2 до 0,5 %), что типично для гуминовых веществ, белковоподобных полимеров и азотсодержащих поверхностно-активных соединений. Примечательно, что в сериях Ф1, Ф6, Ф14 и Ф17 варьирование горизонта (А, АС, Ad и АВ) приводит к близким значениям C/N , что указывает на структурную устойчивость азотного пула в этих образцах.

Третью группу образуют образцы с низким C/N — менее 50. Это фации Ф2 (35,7–33,1), Ф10 (26,4–49,0) и Ф18 (36,2–38,5). Низкое значение отражает относительно высокое содержание азота ($N_{\text{общ}}$ от 0,1 до 0,84 %). Особенно выделяются горизонты А и АС фации Ф2: значение $N_{\text{общ}}$ составляет 0,84 и 0,80 % соответственно. Это наиболее насыщенные азотом почвы среди всех изученных. Подобные значения характерны для аминокислот, пептидов, амидов и азотсодержащих гетероциклов. Отдельно стоит отметить образцы, в которых азот полностью отсутствует ($N_{\text{общ}} = 0$); это типично для углеводородных фракций и связано, вероятно, с нефтяным загрязнением. По данным исследований [3], в центральной части бассейна реки Фатала зафиксировано значительное нефтяное загрязнение почв: выявленное содержание полициклических ароматических углеводородов ($\Sigma\text{ПАУ}$) — до $50\,920\text{ нг}\cdot\text{г}^{-1}$. Содержание N зависит от конкретного местоположения фации. Так, фации Ф2, Ф10 и Ф18 стабильно содержат его во всех горизонтах, тогда как фации Ф5, Ф8, Ф9, Ф15 и Ф16 практически полностью лишены азотсодержащих групп.

Одной из ключевых причин настолько выраженного дисбаланса между С и N является многолетнее применение местным населением экстенсивных форм земледелия. На большей части бассейна реки Фатала, особенно в префектурах Боффа, Дубрека и Форекария, традиционно практикуется подсеčno-огневая система с длительными периодами залежи, которая в условиях демографического давления трансформировалась в сокращённые циклы восстановления. При такой системе происходит практически полное отчуждение всей фитомассы — как товарной части урожая, так и пожнивных остатков, часто сжигаемых или выносимых с полей, — без последующего возврата питательных веществ в почву. В отличие от интенсивных систем, где применяются органические и минеральные удобрения, в экстенсивном земледелии Гвинеи возврат азота минимален либо отсутствует вовсе. Дополнительным фактором является высокая мобильность N: он выносится с урожаем (особенно зерновыми культурами, в частности рисом), вымывается тропическими ливнями в виде нитратов за пределы корнеобитаемого слоя и теряется в процессах денитрификации при переувлажнении почв. Напротив, углерод, входящий в состав устойчивых гумусовых соединений и лигнина, накапливается медленно, главным образом из остатков корневых систем многолетней растительности, которые обладают высокой устойчивостью к микробной деструкции в кислой и алюмокислой среде, типичной для ферраллитных и ферритных почв региона.

Проведённое исследование позволило выявить три основных типа образцов по соотношению C/N : богатые азотом ($C/N < 50$), с умеренным его содержанием ($C/N 80\text{--}150$) и бедные азотом ($C/N > 200$), а также образцы с полным отсутствием N, что связано, предположительно, с нефтяным загрязнением [3]. Пространственное распределение N по фациям и горизонтам указывает на устойчивость азотного дефицита на одних участках и относительное обогащение им других участков, что требует дальнейшего изучения связей с историей землепользования и с геохимическими условиями.

Заключение. На основании результатов определения содержания общего углерода ($C_{\text{общ}}$) и общего азота ($N_{\text{общ}}$) в почвах бассейна реки Фатала (Гвинейская Республика) сделан ряд выводов. Выявлена значительная вариабельность элементного состава почв изученной территории: значения

$C_{\text{общ}}$ варьируют от 3,1 до 45,6 %, а $N_{\text{общ}}$ изменяется в диапазоне от 0 до 0,84 %. Столь широкий разброс свидетельствует о сложной и неоднородной структуре органического вещества почв, формирующейся под влиянием как природных, так и антропогенных факторов. Наиболее значимым результатом является выявление устойчивого и крайне высокого мольного отношения C/N, достигающего в ряде образцов 125–300. Также особого внимания заслуживают участки, на которых значение содержания N находится ниже предела обнаружения.

Основной причиной критического дефицита азота на фоне относительно высокого содержания углерода является многолетняя практика экстенсивного земледелия, широко распространённая в бассейне реки Фатала. Подсечно-огневая система с полным отчуждением всей фитомассы без последующего возврата питательных веществ приводит к тому, что азот выносится с урожаем, вымывается тропическими ливнями в виде нитратов и теряется в процессах денитрификации, тогда как углерод, напротив, медленно накапливается из устойчивых корневых остатков и трудноразлагаемых гумусовых соединений. Выявленное высокое отношение C/N служит надёжным диагностическим признаком деградации азотного фонда почв бассейна реки Фатала: критический дефицит азота является основным лимитирующим фактором продуктивности агроценозов и устойчивости естественных экосистем региона.

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).

Список использованных источников

1. Рабочая группа IUSS WRB. 2015. Мировая реферативная база почвенных ресурсов 2014, исправленная и дополненная версия 2015. Международная система почвенной классификации для диагностики почв и создания легенд почвенных карт. Доклады о мировых почвенных ресурсах № 106. ФАО, Рим.
2. Gorbunova T., Gorbunov R., Camara A. I., Bratanov N., Sow B. B., Pham C. N., Safonova M., Faerman A., Tabunshchik V., Nikiforova A., Lineva N., Diallo A. I. P., Keita I. Heavy metals in soils of the Fatale River basin (Republic of Guinea). *Revista de Gestao Social e Ambiental*, 2024, vol. 18, no. 9, art. e08309 (28 p.). <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n9-161>
3. Soloveva O. V., Proskurnin V. Yu., Keita I., Diallo A. I. P., Tikhonova E. A., Mirzoeva N. Yu., Barabashin T. O., Camara A. I., Sow B. B., Barry M. First data on concentrations and composition of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil, bottom sediments and suspended matter of water throughout the whole Fatale River Basin (Republic of Guinea). *Acta Geochimica*, 2025, vol. 44, iss. 3, pp. 648–662. <https://doi.org/10.1007/s11631-024-00745-8>

УДК 551.435.6(470.661)

Селевая активность бассейна реки Сунжа

Гелагаев А. Ш.

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

✉ gelagaev223344@mail.ru

Рассмотрены условия формирования, классификация, пространственное распределение и последствия проявления селевых процессов на территории бассейна реки Сунжа. Проведён анализ физико-географических, геологических и климатических факторов, обуславливающих высокую селеопасность горных районов бассейна. Рассмотрены морфологические типы селевых очагов, особенности водного режима, твёрдый сток и природная мутность реки. Оценён ущерб, наносимый паводково-селевыми явлениями населённым пунктам и инфраструктуре бассейна. Отдельное внимание уделено роли антропогенных факторов и мерам по снижению рисков.

Ключевые слова: сели, бассейн реки Сунжа, Северный Кавказ, Чеченская Республика, Ингушетия, паводки, селеопасность, экзогенные процессы, горные реки

Бассейн реки Сунжа является одним из крупнейших речных бассейнов Северного Кавказа и охватывает значительную часть территорий Чеченской Республики, Республики Ингушетия и Республики Северная Осетия — Алания. Сунжа — правый приток Терека, её длина составляет 278 км, а площадь бассейна — около 12 000 км². Река берёт начало на северных склонах Большого Кавказского хребта на высоте 1200 м [12]. Бассейн охватывает восточную часть горной области Кавказа и предгорья Скалистого хребта и протягивается по Чеченской котловине вдоль Сунженского хребта.

Горная и предгорная части бассейна характеризуются высокой интенсивностью экзогенных геологических процессов, в числе которых особое место занимают селевые потоки. Для горных районов Большого Кавказа характерно интенсивное проявление селей — стихийно-разрушительных процессов, и рассматриваемая территория относится к числу наиболее селеопасных в Российской Федерации. Под угрозой паводков и селей в Чеченской Республике находятся многие города и сёла, железные и автомобильные дороги, сельскохозяйственные угодья и объекты народного хозяйства.

Согласно данным Росгидромета, бассейн реки Терек, включающий бассейн Сунжи, является одним из наиболее паводкоопасных в России: среднегодовой ущерб от наводнений в бассейне Терека оценивается примерно в 3 млрд рублей [10]. Бассейн Сунжи отнесён к зоне умеренно опасных наводнений, в которой подъём воды может превышать норму на 0,8–1,4 м, а масштаб чрезвычайных ситуаций не превышает муниципального уровня.

Формирование селей в горных районах бассейна реки Сунжа обусловлено совокупностью геологических, геоморфологических и климатических условий — наличием значительных запасов рыхлого обломочного материала на склонах и в руслах, достаточным объёмом воды для мобилизации этого материала, крутыми уклонами склонов и водотоков [5]. Сложность орографии и гидрографии, характер выпадения атмосферных осадков и геологическое строение территории в совокупности обуславливают высокую вероятность возникновения селевых процессов.

Ведущим геологическим фактором является литологический состав пород, слагающих горные склоны. В пределах Пастбищного и Скалистого хребтов распространены меловые и палеогеновые известняки, мергели и песчаники, относительно легко подвергающиеся поверхностному разрушению. В зоне Бокового и Главного хребтов преобладают нижнеюрские — среднеюрские сланцы с большим количеством рыхлых продуктов выветривания. Система хребтов осложнена неогеновой складчатостью с антиклинальными выступами и флексурами, что придаёт рельефу эрозионно-тектонический характер.

Увлажнение горных пород увеличивает их массу и, соответственно, действие гравитационных сил, что сопровождается ослаблением прочности структурных связей и изменением консистенции грунтов на пластичную и текучую. Это приводит к снижению устойчивости склонов и к активизации экзогенных процессов. В районах с ливневым характером осадков лишь незначительная часть влаги инфильтруется, тогда как большая часть быстро стекает по поверхности склонов, размывая незакрепленный материал.

Непосредственными причинами генерации селей в бассейне Сунжи служат ливни и интенсивное таяние снежного и ледникового покрова, реже — прорыв горных озёр и землетрясения. В горных бассейнах с развитыми современными ледниками — в верховьях рек Чанты-Аргун, Шаро-Аргун и Гехи — формируются гляциальные сели, для которых главным источником твёрдого питания служат моренные отложения, вовлекаемые при интенсивном таянии льда. Весенняя активизация склоновых процессов особенно выражена в годы с холодной зимой, когда снег выпадает на промёрзшую почву и при последующем таянии преобладает поверхностный сток [4, 5, 8].

Антропогенные факторы усиления селевой активности в бассейне Сунжи включают неумеренный выпас скота на горных склонах, уничтожение растительного покрова, строительство в опасных зонах и нарушение режима водоохранных зон вдоль рек. Согласно данным Росприроднадзора, многие берегоукрепительные сооружения и водооградительные дамбы на реках Сунжа, Аргун и Асса требуют ремонта. Дополнительные угрозы создаёт нарушение режима водоохранных зон, в первую очередь в пределах населённых пунктов вдоль рек.

По происхождению в бассейне реки Сунжа выделяются три основных типа селей: дождевые, снеговые и гляциальные. Дождевой тип является доминирующим в притоках среднего и нижнего горного пояса — в реках Гехи, Мартан, Валерик и Гойта, а также в нижней части Аргуна. Гляциальный тип характерен для высокогорных бассейнов с современными ледниками в верховьях Чанты-Аргуна и Шаро-Аргуна. Смешанный (ледниково-дождевой) тип распространён в средне- и высокогорных бассейнах в переходный период.

По составу переносимого твёрдого материала в бассейне Сунжи представлены: 1) грязевые потоки — смесь воды и мелкозёма с небольшой концентрацией камней (объёмный вес потока составляет $1,5\text{--}2,0 \text{ т} \cdot \text{м}^{-3}$); 2) грязекаменные потоки — смесь воды, мелкозёма, гальки, гравия и небольших камней ($2,1\text{--}2,5 \text{ т} \cdot \text{м}^{-3}$); 3) водокаменные потоки — смесь воды с преимущественно крупными камнями и скальными обломками ($1,1\text{--}1,5 \text{ т} \cdot \text{м}^{-3}$) [5].

Наносоводные сели с трансформацией грязекаменных потоков по мере продвижения по основным руслам формируются в бассейнах рек Аргун и Чанты-Аргун. В зонах значительных уклонов при наличии рыхлого или глинистого материала возникают небольшие наносоводные потоки, вызванные ливневыми осадками высокой интенсивности. Для высокогорных бассейнов с моренным материалом характерны гляциальные сели, твёрдое питание которых обеспечивается моренными отложениями при таянии ледников.

На рис. 1 приведена карта селевой активности бассейна реки Сунжа. Как видно, наиболее высокая активность селей наблюдается на территории Итум-Калинского, Шатойского и Шаройского районов Чеченской Республики. Основная масса селей в пределах бассейна формируется за счёт дождевого выноса. По мощности сели в бассейне Сунжи относятся преимущественно к маломощным и селям средней мощности. Маломощные (вынос менее 100 тыс. м^3) происходят ежегодно в малых притоках; сели средней мощности ($10\text{--}100 \text{ тыс. м}^3$) проходят раз в 2–3 года; мощные (более 100 тыс. м^3) повторяются примерно раз в 5–10 лет [4]. Гляциальные сели в верховьях Чанты-Аргуна и Шаро-Аргуна могут достигать объёма 1 млн м^3 и более, повторяясь раз в несколько десятилетий.

Сели в горных притоках Сунжи характеризуются резким подъёмом уровня воды, волновым движением, кратковременностью действия (от 1 до 3 ч) и значительным эрозионно-аккумулятивным разрушительным эффектом. Связные потоки, обладающие свойствами пластичного вещества, разрушают и выпрямляют изгибы русла или переваливают через препятствия. Несвязные потоки движутся с большой скоростью, постоянно перемещая и истирая камни.

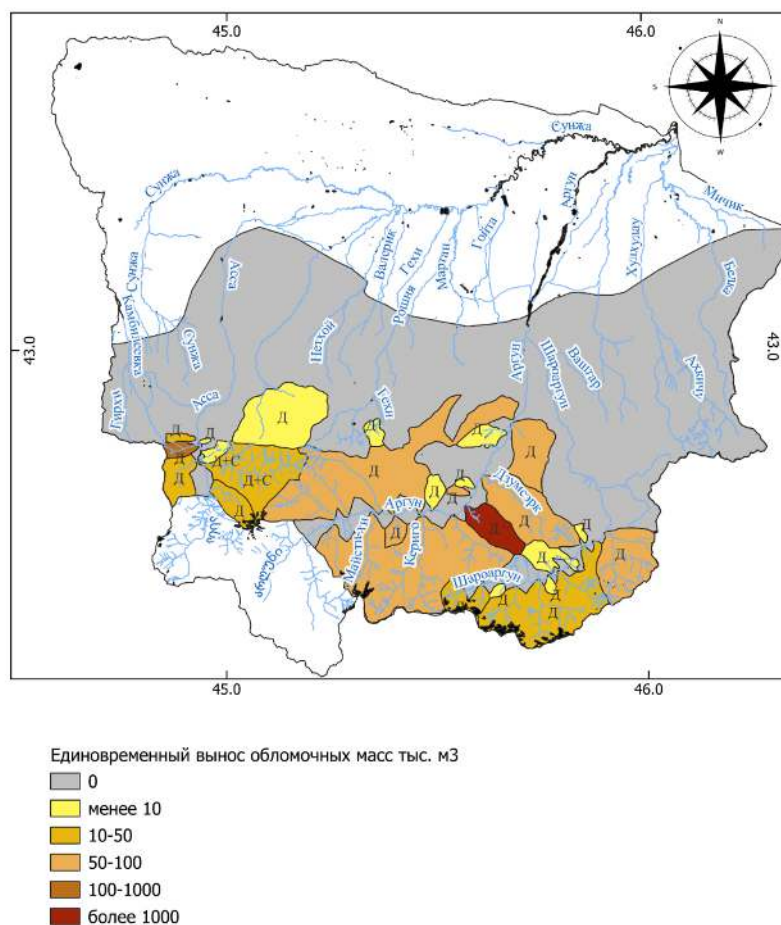


Рис. 1. Карта селевой активности бассейна реки Сунжа [7]

По данным Главного управления МЧС РФ по Чеченской Республике, в бассейне Сунжи при наихудшем развитии паводковой ситуации в зону затопления может попасть до 34 населённых пунктов в 10 муниципальных районах и городах республики. Общая площадь потенциально затопляемых территорий бассейна Сунжи в Чечне составляет 191 км². В более широком контексте следует отметить, что площадь подтапливаемых земель в бассейне Сунжи охватывает значительную часть Ингушетии и восточную часть Северной Осетии [13].

Серьёзные паводково-селевые события в горных притоках Сунжи неоднократно приводили к существенному ущербу. В Гудермесском, Шалинском и Ножай-Юртовском районах Чеченской Республики при экстремальных ливнях реки выходят из берегов, подтапливая населённые пункты и выводя из строя трансформаторы и насосы [9]. В Ножай-Юртовском районе сходы оползней и паводков разрушали сотни домовладений; в частности, в результате оползней значительные объёмы грунтовых масс перекрывали дороги и уничтожали застройку.

В зоне паводково-селевого воздействия регулярно оказывались городские округа Грозный и Аргун. Подъём уровня Сунжи и её притоков неоднократно приводил к затоплению прибрежных районов и к срыву дамб. Критический подъём воды — на 3 м и более — вызывал разрушение мостов через Аргун и нарушал транспортное сообщение.

Паводково-селевые явления в бассейне Сунжи вызывают нарушение субальпийских и горно-степных ландшафтов: обнажается подстилающая порода, а растительный покров и плодородный слой почвы стекают вместе с грязевой массой, что переводит субальпийские и горно-степные ландшафты в стадию первичных сукцессий. В массовые сходы наносов вовлекаются крупные древесные стволы, которые образуют завалы в руслах, что усиливает при последующем прорыве разрушительную силу потока.

Состояние гидротехнических сооружений в бассейне вызывает серьёзную озабоченность надзорных органов. Берегоукрепительные конструкции и водооградительные дамбы на Сунже, Аргуне и Ассе, имеющие федеральное значение, во многих местах требуют ремонта. В Чеченской Республике создана межведомственная противопаводковая комиссия, однако инфраструктурный дефицит в сфере гидрозащиты сохраняется.

В бассейне реки Сунжа в советский период и в последующие годы возводились противоселевые дамбы и плотины, сооружались обводные каналы и укреплялись склоны путём лесопосадок. На объектах МЧС России организован гидрологический мониторинг: дополнительно выставляются наблюдательные посты на мостах и на потенциально опасных участках рек. Межведомственная противопаводковая комиссия в Чечне осуществляет координацию действий по предупреждению паводков и по ликвидации их последствий.

К приоритетным мероприятиям по снижению рисков в бассейне относятся:

- реконструкция и строительство берегоукрепительных сооружений на Сунже, Аргуне, Ассе и других реках;
- разработка и внедрение систем раннего оповещения населения о паводках;
- создание актуальных карт зон затопления и сервисных моделей прогнозирования;
- ограничение застройки и хозяйственной деятельности в зонах высокой паводковой и селевой опасности;
- восстановление растительного покрова на эродированных горных склонах.

Заключение. Бассейн реки Сунжа относится к числу наиболее гидрологически активных речных систем Северного Кавказа. Сочетание горного рельефа, геологического строения, высокой интенсивности осадков и нарастающей антропогенной нагрузки обуславливает значительную степень селевой опасности в горных районах бассейна.

Ключевыми зонами генерации селевых потоков в бассейне являются горные части правых притоков Сунжи — рек Аргун, Чанты-Аргун, Шаро-Аргун, Асса, Гехи и Мартан. В этих бассейнах представлены все три генетических типа селей — дождевой, снеговой и гляциальный, причём дождевой тип преобладает в абсолютном большинстве случаев. Доминирующими морфологическими типами очагов являются зоны рассредоточенного селеобразования и врезно-рытвинные системы.

Бассейн Сунжи отнесён к зоне умеренно опасных наводнений, в которой площадь потенциально затапливаемых территорий только в Чеченской Республике достигает 191 км². Неудовлетворительное состояние части берегозащитных сооружений усугубляет риски для населённых пунктов и инфраструктуры.

Для комплексного снижения рисков необходимо обновление системы мониторинга и раннего оповещения, реконструкция защитных гидротехнических сооружений, восстановление растительного покрова на горных склонах и внедрение рискориентированного подхода при планировании освоения горных территорий бассейна.

Список использованных источников

1. Гакаев Р. А. К вопросу о связи рельефа и оползневых процессов на территории Чеченской Республики // Наука и высшая школа Чеченской Республики: перспективы развития межрегионального и международного научно-технического сотрудничества : тезисы докладов межрегионального Пагуошского симпозиума. Грозный : Академия наук Чеченской Республики, 2010. С. 273–274. <https://elibrary.ru/sbqvvr>
2. Гакаев Р. А. Роль климатических условий в активизации оползней в горной части Чеченской Республики // Глобальный научный потенциал. 2012. № 4 (13). С. 9–12. <https://elibrary.ru/pbhaor>
3. Гакаев Р. А., Агаев Р. И., Убаева Р. Ш. Селевая активность в Чеченской Республике // Актуальные проблемы экологии и природопользования. 2012. Вып. 14, ч. 1. С. 317–321. <https://elibrary.ru/wgzgwx>

4. Гакаев Р. А., Даукаев А. А. Очаги селеобразования и селевая опасность в горной Чечне // ГЕОРИСК-2015 : материалы 9-й Международной научно-практической конференции. Москва : Российский университет дружбы народов, 2015. С. 154–158. <https://elibrary.ru/unzzvz>
5. Демельханов М. Д. Условия возникновения селевых потоков в Чеченской Республике // Молодой учёный. 2015. № 14 (94). С. 649–651. <https://elibrary.ru/sbxloy>
6. Демельханов М. Д., Косумов Р. С. Опасность возникновения селевых процессов в долине реки Аргун (Чеченская Республика) // Молодой учёный. 2016. № 2 (106). С. 285–289. <https://elibrary.ru/vibwnj>
7. Карта селевых бассейнов Северного Кавказа (масштаб 1 : 200 000) / отв. ред. В. Ф. Перов ; авт. В. Ф. Перов, О. И. Бударина, Т. Л. Сидорова, И. Б. Сейнова. Москва : НИЛ снежных лавин и селей МГУ, 2012.
8. Керимов И. А., Гакаев Р. А., Даукаев А. А., Гацаева Л. С. Сели и их проявление в Чеченской Республике // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа : материалы всероссийской научно-технической конференции / ред. Г. Г. Матишов. Грозный : УРАН КНИИ, 2011. С. 433–434. <https://elibrary.ru/rybatx>
9. Наводнение на Северном Кавказе: режим ЧС в Чечне // Газета, 2026. URL: <https://www.gazeta.press/social/2026/03/29/22711111.shtml> [дата обращения: 01.04.2026].
10. Наводнения и паводки на территории Северного Кавказа // Кавказ сегодня, 2021. URL: <https://kavtoday.ru/article/6040> [дата обращения: 01.04.2026].
11. Паводки, наводнения и подтопления в России 2012–2017 гг. Досье // ТАСС, 2017. URL: <https://tass.ru/info/4291130> [дата обращения: 01.04.2026].
12. Панов В. Д., Базелюк А. А., Лурье П. М. Река Терек: гидрография и режим стока. Ростов-на-Дону : Донской издательский дом, 2015. 606 с. <https://elibrary.ru/utqgrj>
13. Разумов В. В., Беккиев М. Ю., Разумова Н. В., Шагин С. И. Масштабы и опасность наводнений на Северном Кавказе // Социально-экологические технологии. 2018. № 1. С. 143–160. <https://elibrary.ru/rtdfxjv>

УДК 911.2:556.5(470.67)

Высотная дифференциация и функционирование ландшафтов бассейнов горных рек Сулак, Уллучай и Самур на Северо-Восточном Кавказе: сравнительный анализ

Джамалудинов Д. Ш.¹, Хусаинов И. М.¹, Атаев З. В.^{1,2,3}, Абдулаев К. А.⁴

¹Кабардино-Балкарский научный центр РАН, Нальчик, Россия

²Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН, Махачкала, Россия

³Дагестанский государственный педагогический университет имени Р. Гамзатова, Махачкала, Россия

⁴Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

✉ zagir05@mail.ru

Представлены результаты сравнительного анализа высотной дифференциации и особенностей функционирования ландшафтов бассейнов рек Сулак, Уллучай и Самур на северо-восточном макросклоне Большого Кавказа. На основе полевых исследований 2024–2025 гг., среднемасштабного ландшафтного картографирования, анализа спутниковых изображений и климатических рядов показано, что три бассейна отражают разные варианты высотной поясности Восточного Кавказа: среднегорный лесной с межгорными котловинами, низкогорно-степной и высокогорный ледниково-луговой. Выявлены различия в структуре ландшафтов, в климатических градиентах, эрозионно-гидрологических процессах и степени антропогенной трансформации. Наиболее высокогорным и эрозионно активным является бассейн Самура, а наиболее освоенным — бассейн Уллучая; бассейн Сулака отличается максимальной полнотой набора поясов и широким развитием межгорных котловин. Полученные результаты важны для дифференцированного природопользования, мониторинга опасных процессов и адаптации горных территорий к современным климатическим изменениям.

Ключевые слова: высотная поясность, ландшафт, Сулак, Уллучай, Самур, Северо-Восточный Кавказ, горные реки, сравнительный анализ

Бассейны горных рек Сулак, Уллучай и Самур представляют собой три контрастные геосистемы северо-восточного макросклона Большого Кавказа. При общности орографической принадлежности и общей логике высотной поясности они существенно различаются по площади водосбора, абсолютным высотам, степени увлажнения, полноте набора ландшафтных поясов и интенсивности антропогенной трансформации [2, 8].

Актуальность сравнительного анализа определяется тем, что именно различия в структуре ландшафтов и в режимах их функционирования задают неодинаковую реакцию речных бассейнов на современные климатические изменения, эрозионно-склоновые процессы и хозяйственное освоение. Цель работы — выявление закономерностей высотной дифференциации ландшафтов и оценка особенностей их современного функционирования в трёх бассейнах.

Материал и методы. Объектами исследования послужили бассейны рек Сулак, Уллучай и Самур. Бассейн Сулака является крупнейшим в Дагестане (13 400–15 200 км²), бассейн Уллучая относится к типичным среднегорным водосборам (1440 км²), а бассейн Самура имеет трансграничный характер (7330 км²). В 2024–2025 гг. в пределах трёх бассейнов выполнены полевые исследования [6], включавшие описание более чем 120 ландшафтных фаций, отбор проб почв, воды и растительности, а также фиксацию проявлений эрозионных, селевых и антропогенных процессов.

Камеральный этап предполагал анализ среднемасштабных ландшафтных карт, дешифрирование спутниковых снимков Landsat и Sentinel-2, сопоставление материалов дистанционного зондирования с полевыми наблюдениями, а также анализ гидроклиматических рядов. Сравнение проводилось по единой схеме, включавшей полноту набора высотных поясов, долевое соотношение основных типов ландшафтов, климатические градиенты [14], особенности гидрологического режима [13] и степень антропогенной трансформации.

Результаты и обсуждение. Для всех трёх бассейнов характерна классическая высотная поясность Восточного Кавказа, однако полнота набора поясов и их соотношение существенно различаются (рис. 1, табл. 1). Бассейн Сулака охватывает практически полный спектр ландшафтов —

от гляциально-нивалых комплексов высокогорий до аридных низменных и дельтовых ландшафтов [5, 7]. В его структуре важнейшую роль играют межгорные котловины с семигумидными и семиаридными ландшафтами, что связано с максимальным расширением горного сооружения в пределах Дагестана [4, 9, 10].

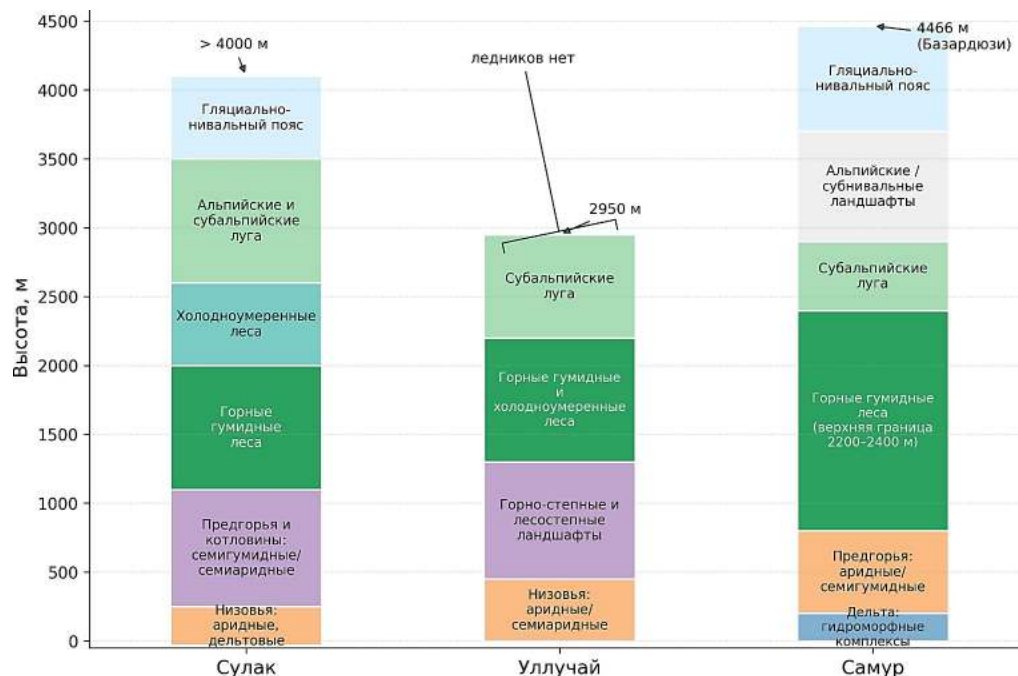


Рис. 1. Схема высотной дифференциации и полноты набора ландшафтных поясов в бассейнах Сулака, Уллучая и Самура

Таблица 1. Распределение основных типов ландшафтов в бассейнах Сулака, Уллучая и Самура, % от площади бассейна

Тип ландшафтов	Сулак	Уллучай	Самур
Гляциально-нивалые	1,2	–	0,3
Высокогорные луговые (альпийские + субальпийские)	18,5	12,0	57,0
Горные холодноумеренные (верхнегорные леса)	4,5	8,0	5,6
Горные гумидные (широколиственные леса)	12,0	18,0	15,0
Горные семигумидные (лесостепь, кустарники)	22,0	15,0	9,0
Предгорные и равнинные аридные/семиаридные	15,0	25,0	8,0
Гидроморфные (дельтовые, пойменные)	5,0	–	12,0

Бассейн Уллучая отличается меньшей амплитудой высот и отсутствием постоянных ледников. Верхний пояс здесь представлен субальпийскими лугами, а основную роль играют горно-лесные, горно-степные и предгорные аридные комплексы. Бассейн Самура, напротив, является наиболее высокогорным: его максимальная высота достигает 4466 м, а в верховьях насчитывается 29 ледников общей площадью 9,45 км² [1]. Высокая увлажнённость обуславливает поднятие верхней границы леса до 2200–2400 м [15].

Количественное распределение основных типов ландшафтов подтверждает структурные различия трёх бассейнов. В бассейне Самура доминируют высокогорные луговые ландшафты (57 %), что делает его наиболее выраженным высокогорным бассейном. В бассейне Сулака максимальна доля горных семигумидных ландшафтов межгорных котловин (22 %), а для Уллучая характерны наиболее высокие доли горных гумидных лесов (18 %) и предгорно-равнинных аридных комплексов (25 %).

Сравнение климатических и гидрологических параметров показывает, что минимальный вертикальный температурный градиент наблюдается в бассейне Самура (0,50–0,55 °С на 100 м), а максимальный — в бассейне Сулака (0,57–0,63 °С на 100 м). Годовые суммы осадков достигают максимума в бассейне Самура (до 1200 мм в высокогорьях). В бассейне Уллучая значения составляют 300–600 мм, что усиливает ксерофитизацию его нижних и средних частей [12].

Различия проявляются и в функционировании ландшафтов. Для Сулака характерна высокая роль снегово-ледникового питания и значительный транспорт взвешенного материала. Уллучай отличается ступенчатым продольным профилем русла и выраженной паводковой опасностью: максимальные расходы многократно превышают средние. Бассейн Самура характеризуется наиболее высокой эрозионной активностью [3], при этом важную роль здесь играют легкоразмываемые породы и слабая закреплённость склонов в верховьях.

Антропогенная трансформация наиболее выражена в бассейне Уллучая, где распаханность низовий достигает 25–30 %, а лесной покров в нижнем течении практически отсутствует. В бассейне Сулака высокая степень трансформации наблюдается в межгорных котловинах, тогда как верховья и каньоны сохраняют естественный облик. В бассейне Самура хозяйственное давление минимально в высокогорьях, но резко возрастает в дельтовом звене, где сочетается с трансграничным водопользованием и с уязвимостью низовий [11].

Заключение. Сравнительный анализ показывает, что бассейны Сулака, Уллучая и Самура представляют собой три разные модели высотной дифференциации и функционирования горно-речных ландшафтов Восточного Кавказа. Бассейн Самура следует рассматривать как высокогорный ледниково-луговой тип с максимальной долей высокогорных луговых комплексов и с высокой эрозионной активностью. Бассейн Сулака представляет среднегорный лесной тип с широким развитием межгорных котловин и с наиболее полным набором высотных поясов. Бассейн Уллучая характеризуется как низкогорно-степной и предгорно-аридный тип с высокой степенью хозяйственной освоённости нижних звеньев.

Полученные результаты подтверждают, что единая схема анализа высотной поясности, климатических градиентов, гидрологических режимов и антропогенной трансформации позволяет выявлять не только общие закономерности функционирования горно-речных бассейнов Северо-Восточного Кавказа, но и их индивидуальные геоэкологические особенности. Это имеет практическое значение для дифференцированного природопользования, для мониторинга эрозионных, селевых и паводковых процессов, а также для оценки уязвимости ландшафтов в условиях современных климатических изменений. При планировании природоохранных и хозяйственных мероприятий в бассейнах Сулака, Уллучая и Самура необходимо учитывать, что одинаковые по происхождению горные гео-системы обладают разной устойчивостью, характеризуются разными лимитирующими факторами и, следовательно, требуют разных режимов управления.

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. Абдулаев К. А., Атаев З. В. Характеристика ландшафтов горной части бассейна реки Самур // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2008. № 1 (2). С. 68–71. <https://elibrary.ru/inlypd>
2. Абдулаев К. А., Атаев З. В., Братков В. В. Современные ландшафты Горного Дагестана. Махачкала : ДГПУ, 2011. 116 с. <https://elibrary.ru/qkcdhx>
3. Физическая география Дагестана : учебное пособие / Б. А. Акаев, З. В. Атаев, Б. С. Гаджиев [и др.]. Москва : Школа, 1996. 384 с. <https://elibrary.ru/upwtvt>
4. Атаев З. В. Котловинные ландшафты Внутригорного Дагестана // Естественные и технические науки. 2008. № 4 (36). С. 176–178. <https://elibrary.ru/juzbgx>

5. Атаев З. В. Ландшафтное разнообразие бассейна реки Сулак // Наука и образование: состояние, проблемы, перспективы развития : материалы научной сессии профессорско-преподавательского состава, Махачкала, 23–24 апреля 2025 г. Махачкала : ДГПУ имени Р. Гамзатова, 2025. С. 559–566. <https://elibrary.ru/elgjwy>
6. Атаев З. В. Полевые экспедиционные исследования ландшафтов бассейнов малых и средних горных рек водосбора Каспийского моря (Северо-Восточный и Юго-Восточный Кавказ) // Геоэкологическая оценка бассейнов горных рек: теоретико-методологические и методические аспекты, региональные исследования : материалы II Международной научной конференции, Грозный, 25 декабря 2024 г. Грозный : ГГНТУ имени М. Д. Миллионщикова, 2025. С. 9–15. <https://elibrary.ru/kmuskh>
7. Атаев З. В., Абдулаев К. А. Ландшафты бассейна реки Сулак (Северо-Восточный Кавказ) // Геоэкологическая оценка бассейнов горных рек: теоретико-методологические и методические аспекты, региональные исследования : материалы II Международной научной конференции, Грозный, 25 декабря 2024 г. Грозный : ГГНТУ имени М. Д. Миллионщикова, 2025. С. 23–27. <https://elibrary.ru/wqmltv>
8. Атаев З. В., Абдулаев К. А. Ландшафты северного макросклона Восточного Кавказа (Северо-Восточный и Юго-Восточный Кавказ) // Геоэкологическая оценка бассейнов горных рек: теоретико-методологические и методические аспекты, региональные исследования : материалы II Международной научной конференции, Грозный, 25 декабря 2024 г. Грозный : ГГНТУ имени М. Д. Миллионщикова, 2025. С. 16–22. <https://elibrary.ru/yydmye>
9. Атаев З. В., Абдулаев К. А., Магомедова А. З. Географические особенности котловинных ландшафтов Внутригорного Дагестана // Юг России: экология, развитие. 2008. Т. 3, № 2. С. 96–98. <https://elibrary.ru/jviimb>
10. Атаев З. В., Братков В. В. Горно-котловинные ландшафты Северо-Восточного Кавказа: современные климатические изменения и сезонная динамика. Махачкала : ДГПУ, 2011. 128 с. <https://elibrary.ru/qkkdhn>
11. Атаев З. В., Братков В. В. Горные ландшафты Северного Кавказа // Географический вестник. 2013. № 3 (26). С. 26–31. <https://elibrary.ru/rejrvv>
12. Братков В. В., Абдулаев К. А., Атаев З. В. Ландшафты Горного Дагестана // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2007. № 5 (141). С. 78–81. <https://elibrary.ru/kzqpmb>
13. Гюль К. К., Власова С. В., Кисин И. М., Тертеров Ф. Ф. Реки Дагестанской АССР. Махачкала : Дагкнигоиздат, 1961. 370 с.
14. Росгидромет. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. Санкт-Петербург : Научно-технологические, 2022. 124 с. URL: https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/compressed.pdf [дата обращения: 17.03.2026].
15. Федина А. Е. Физико-географическое районирование северного склона Большого Кавказа // Ландшафтное картографирование и физико-географическое районирование горных областей. Москва : Изд-во Московского университета, 1972. С. 5–96.

УДК 504.064

Анализ пространственных паттернов в геоэкологическом районировании бассейнов горных рек

Дрыгваль П. В.

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

✉ drygval-pv@ibss-ras.ru

Рассмотрен подход к геоэкологическому районированию территории на основе данных дистанционного зондирования Земли. В качестве примера приведён Прикаспийский регион с использованием выборки пространственных данных и широкого набора природных и антропогенных факторов. Предложен двухэтапный метод, включающий кластеризацию параметров с помощью алгоритма *k-means* и последующее ранжирование факторов с применением *random forest*. Отмечены преимущества и ограничения метода, а также необходимость учёта целей районирования при интерпретации значимости факторов окружающей среды.

Ключевые слова: геоэкологическое районирование, дистанционное зондирование Земли, алгоритм анализа, *random forest*, *k-means*, пространственный анализ, Прикаспийский регион

Геоэкологическое районирование является важным этапом в анализе природно-социальных условий конкретного района. Оно помогает в разработке методики и в реализации региональных систем природопользования и экологического мониторинга [1, 6].

До настоящего времени не существует общепринятой концепции геоэкологического районирования, а ни одна из предложенных методик не рассматривает и не решает общих вопросов геоэкологического анализа территорий, выработки принципов выделения геоэкологических территориальных единиц, их классификации и систематики [2].

При районировании учитывается множество факторов, среди которых можно выделить геологические, климатические, гидрологические, биотические, почвенные и антропогенные. Для целей длительного мониторинга и наблюдения на обширных участках часто используют данные, доступные со спутников. Их приборы фиксируют показатели относительно непрерывно и обеспечивают необходимый спектр данных для мониторинга актуальных явлений.

В настоящем исследовании для примера геоэкологического районирования использованы только данные дистанционного зондирования Земли из открытых баз. Среди применённых показателей можно выделить такие группы:

- метеорологические и радиационные факторы — температуру воздуха, давление воздуха, скорость ветра, облачность, количество осадков, коротковолновую радиацию, тепловое излучение, альbedo поверхности, температуру поверхности Земли;
- качество воздуха — аэрозольный индекс, концентрацию газов в атмосферном воздухе (O_3 , CO , NO_2 , SO_2 , CH_4 , $HCHO$, H_2O);
- факторы водного баланса — общее испарение, испарение с почвы, испарение с полога, испарение от снега, испарение с водных поверхностей, испарение из-за транспирации;
- биотические факторы — долю площади листьев (низкая растительность), долю площади листьев (высокая растительность), подземную биомассу;
- почвенный фактор — запас органического углерода в почве;
- геоморфологический фактор — высоту над уровнем моря, уклон склонов, экспозицию склонов;
- гидрографический фактор — плотность водных путей;
- антропогенные факторы — плотность дорожной сети, плотность железнодорожных путей, плотность населения.

Для алгоритма районирования территории была учтена относительно регулярная сетка пространственных данных за 2025 г. (плотность населения была учтена за 2024 г., подземная биомасса — за 2010 г., а запас органического углерода в почве — за 2012 г.). Рассматриваемый участок водосбора Каспийского моря содержит более 2 млн пространственных узлов (точек), которые относятся к генеральной совокупности данных. Из них были равномерно выбраны 1500 узлов (точек), относящихся к выборке пространственных данных, на основе которых и строилось ранжирование 35 используемых параметров (рис. 1).

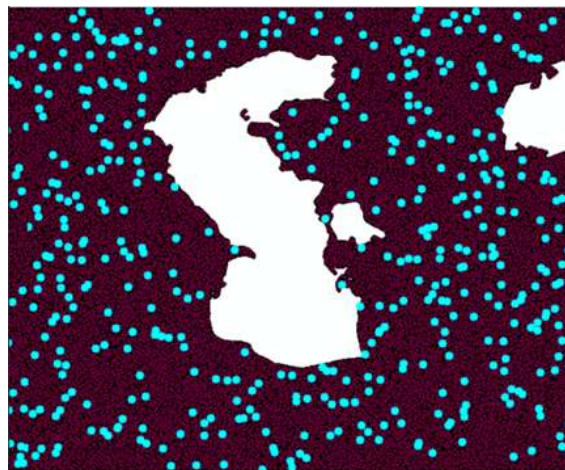


Рис. 1. Узлы пространственных данных для ранжирования

На примере Прикаспийского региона на основе алгоритма random forest выполнено ранжирование рассматриваемых параметров. Применён двухэтапный подход. На первом этапе провели группировку параметров в отдельные зоны (алгоритм k -means) без учёта их важности (табл. 1). Группировку выполнили на основе стандартизированных данных исходных факторов.

На втором этапе на основе анализа этих кластеров осуществили ранжирование исходных факторов. Алгоритм random forest автоматически вычисляет важность каждого признака на основе уменьшения его неоднородности (дисперсии) при разделении узлов дерева (схемы алгоритма). Соответственно, данные с большим разбросом будут считаться как наиболее вариативные для территории и при этом будут иметь больший вклад в возможное геоэкологическое районирование. Однако следует отметить, что выбор того или иного параметра окружающей среды должен определяться целью будущего геоэкологического районирования, а оценка важности должна проводиться отдельно с учётом различных групп факторов, используемых в анализе.

Далее каждый признак получает нормированный показатель важности, выраженный в %. Данные о ранжировании всех исследуемых параметров представлены в табл. 2.

Табл. 2 отражает вклад различных природных и антропогенных параметров среды в результирующую модель геоэкологического районирования, если учитывать эти параметры в одной общей группе факторов.

Рассмотренный в качестве примера метод можно использовать как один из подходов к геоэкологическому районированию. Он включает широкий набор признаков, как равномерно, так и неравномерно распределённых в пространстве, а также характеризующихся различной степенью взаимной корреляции и важностью проявления для целей районирования. Однако нужно учитывать и ограничения этого подхода. Одно из них — сложность стандартизации некоторых параметров среды, описываемых качественными характеристиками (например, флористический состав территории). Кроме того, в этом подходе не учтены ландшафтные особенности изучаемого участка.

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 Минобрнауки РФ № 075-15-2024-644).

Таблица 1. Средние значения параметров для кластеров (зон для геоэкологического районирования)

Параметр	Зона для районирования				
	1	2	3	4	5
Аэрозольный индекс (AI)	0,01058	0,01913	0,53787	–0,25748	0,56529
CH ₄ , моль·м ^{–2}	1925,24	1924,80	1943,47	1920,10	1947,91
CO, моль·м ^{–2}	0,02571	0,03251	0,02986	0,03258	0,03208
HCHO, моль·м ^{–2}	0,00011	0,00008	0,00011	0,00011	0,00008
NO ₂ , моль·м ^{–2}	0,00008	0,00006	0,00009	0,00007	0,00006
O ₃ , моль·м ^{–2}	0,13657	0,14623	0,1354	0,14548	0,14217
SO ₂ , моль·м ^{–2}	0,00004	0,00002	0,00008	0,00005	0,00003
H ₂ O, моль·м ^{–2}	590,51	925,77	745,03	1073,22	907,45
Облачность, эф. рад. фракция (дробь)	0,41999	0,46907	0,29872	0,5625	0,43215
Температура воздуха, °C	+12,08	+12,33	+20,48	+13,04	+16,76
Количество осадков, мм·год ^{–1}	357,15	213,96	140,09	483,68	104,08
Ветер (U-направление), м·с ^{–1}	–0,08285	–0,17462	–0,07837	–0,2587	–1,00035
Ветер (V-направление), м·с ^{–1}	0,12255	–0,16751	–0,95323	0,04191	–0,77539
Альбедо поверхности	0,2426	0,24592	0,25311	0,17655	0,25918
Коротковолновая радиация, Дж·м ^{–2}	14790146	11122111	15119706	11668421	12532224
Тепловое излучение, Дж·м ^{–2}	–8448372	–6458578	–10126026	–5668494	–8148097
Испарение с почвы, мм водного эквивалента	–210,34	–87,68	–20,33	–289,87	–3,82
Испарение с водных поверхностей, мм водного эквивалента	–85,79	–105,93	–95,66	–84,25	–95,58
Испарение с полога, мм водного эквивалента	–36,18	–18,94	–6,50	–68,55	–3,14
Испарение из-за транспирации, мм водного эквивалента	–6,77	–33,08	–15,27	–30,88	–26,71
Испарение от снега, мм водного эквивалента	–9,46	–12,70	–0,39	–6,80	–2,50
Общее испарение, мм водного эквивалента	–348,41	–258,32	–138,15	–480,31	–131,76
Давление воздуха, Па	83102	100936	92916	99271	100273
Доля площади листьев для высокого типа растительности	1,29551	0,16372	0,44295	2,18912	0,09245
Доля площади листьев для низкого типа растительности	1,08822	0,68453	0,52813	1,67309	0,46415
Подземная биомасса, т·га ^{–1}	1,48087	2,33471	0,89866	3,31508	1,06977
Запас органического углерода в почве (0–30 см), т·га ^{–1}	36,63	24,12	18,63	68,51	10,08
Плотность дорожной сети, кв. ед. карты	76,21	17,60	53,73	101,50	10,24
Плотность железнодорожных путей, кв. ед. карты	1,44454	1,157	1,70292	3,63094	0,813
Плотность водных путей, кв. ед. карты	15,51	2,82	13,55	23,12	2,66
Высота над уровнем моря, м	1663,53	72,74	721,75	185,69	113,78
Уклоны склонов, °	10,87	2,28	4,36	3,85	3,29
Экспозиция склонов, °	177,97	168,28	173,27	169,55	172,66
Плотность населения, чел. на кв. ед. карты	108,50	4,44	95,20	53,86	4,23
Температура поверхности Земли, °C	+21,87	+19,74	+31,11	+20,06	+27,22

Таблица 2. Ранжирование параметров по их вкладу в районирование территории

Параметр	Вклад, %	Источник данных
O ₃ , моль·м ⁻²	9,69	[10]
Тепловое излучение, Дж·м ⁻²	8,73	[3]
Температура поверхности Земли, °C	7,00	[7]
Испарение с полога, мм водного эквивалента	5,84	[3]
Температура воздуха, °C	5,54	[3]
Аэрозольный индекс (AI)	5,35	[10]
Испарение от снега, мм водного эквивалента	4,91	[3]
Давление воздуха, Па	4,73	[3]
Коротковолновая радиация, Дж·м ⁻²	4,65	[3]
CO, моль·м ⁻²	4,57	[10]
Высота над уровнем моря, м	3,81	[8]
H ₂ O, моль·м ⁻²	3,56	[10]
Доля площади листьев для низкого типа растительности	3,54	[3]
Доля площади листьев для высокого типа растительности	3,11	[3]
Количество осадков, мм·год ⁻¹	3,09	[3]
NO ₂ , моль·м ⁻²	3,07	[10]
Запас органического углерода в почве (0–30 см), т·га ⁻¹	2,85	[11]
Испарение с почвы, мм водного эквивалента	2,58	[3]
Плотность водных путей, кв. ед. карты	2,18	[9]
Общее испарение, мм водного эквивалента	1,95	[3]
CH ₄ , моль·м ⁻²	1,59	[10]
Ветер (U-направление), м·с ⁻¹	1,49	[3]
Облачность, эф. рад. фракция (дробь)	1,23	[10]
Плотность дорожной сети, кв. ед. карты	0,97	[9]
Альбедо поверхности	0,82	[3]
Ветер (V-направление), м·с ⁻¹	0,67	[3]
НСНО, моль·м ⁻²	0,64	[10]
Уклоны склонов, °	0,41	[8]
Испарение с водных поверхностей, мм водного эквивалента	0,39	[2]
Подземная биомасса, т·га ⁻¹	0,35	[4]
SO ₂ , моль·м ⁻²	0,18	[10]
Испарение из-за транспирации, мм водного эквивалента	0,13	[3]
Плотность железнодорожных путей, кв. ед. карты	0,13	[9]
Экспозиция склонов, °	0,13	[8]
Плотность населения, чел. на кв. ед. карты	0,12	[5]

Список использованных источников

1. Бондарик Г. К., Ярг Л. А. Инженерно-геологические изыскания. 3-е изд. Москва : Книжный дом «Университет», 2014. 418 с.
2. Шахвердов В. А. О новых принципах геоэкологического районирования // Региональная геология и металлогения. 2021. № 88. С. 33–38. https://doi.org/10.52349/0869-7892_2021_88_33-38
3. Climate Data Store. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land?tab=overview> [accessed: 06.12.2025].
4. Global Aboveground and Belowground Biomass Carbon Density Maps. URL: https://daac.ornl.gov/VEGETATION/guides/Global_Maps_C_Density_2010.html [accessed: 01.02.2026].
5. LandScan Population Data Global. URL: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/projects_sat-io_open-datasets_ORNL_LANDSCAN_GLOBAL?hl=ru#:~\protect\protect\leavevmode@ifvmode\kern+.2222em\relaxtext=The%20LandScan%20dataset%20provides%20a%20high-resolution%20global%20population,counts%20and%20density%20at%20a%2030%20arc-second%20resolution [accessed: 11.11.2025].
6. Manevich A. I., Kolikov K. S., Egorova E. A., Geoecological aspects of stress-strain state modeling results of Leninsky coal deposit (Kuzbass, Russia). Russian Journal of Earth Science, 2019, vol. 19, art. es4002 (8 p.). <https://doi.org/10.2205/2019es000663>
7. MODIS Land Surface Temperature and Emissivity (MOD11). URL: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod11.php> [accessed: 06.12.2025].
8. NASADEM Global Digital Elevation Model. URL: <https://portal.opentopography.org/raster?opentopoID=OTSDEM.032021.4326.2> [accessed: 13.12.2025].
9. Planet OSM. URL: <https://planet.openstreetmap.org/> [accessed: 31.10.2025].
10. Sentinel-5P Level 2 Cloud. URL: <https://documentation.dataspace.copernicus.eu/Data/SentinelMissions/Sentinel5P.html#sentinel-5p-level-2-cloud> [accessed: 06.12.2025].
11. Soil Organic Carbon Content. URL: <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/themes/soil-organic-carbon-content> [accessed: 11.10.2025].

УДК 551.1/4:504.03

О разработке хранилища данных опасных инженерно-геологических процессов бассейнов горных рек

Ибаев Ж. Г., Мамаев С. А., Сулейманов В. К., Мамаев А. С., Гусейнова А. Ш., Ахмедов А. С.

Институт геологии ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия

✉ ibaev77@mail.ru

Разработка хранилища данных опасных инженерно-геологических процессов (ОИГП) бассейнов горных рек — это создание специализированной системы для систематизации, хранения, анализа и прогнозирования природных рисков. Такая система объединяет данные о селях, оползнях, обвалах, эрозии берегов и других процессах, характерных для горных территорий. Анализ динамики развития ОИГП важен для предупреждения чрезвычайных ситуаций и оценки устойчивости инженерных сооружений. В данной работе предложена информационная модель ОИГП. Приведена методика составления хранилища данных ОИГП, возникающих в бассейнах горных рек и его описание.

Ключевые слова: опасные геологические процессы, базы данных, информационная модель

В конце марта 2026 г. в Дагестане и Чеченской Республике отмечена активизация оползневых процессов, сопровождавшаяся деформациями территории и угрозой жилой застройке (рис. 1). В частности, оползневой процесс в микрорайоне Приреченск следует рассматривать как результат совместного действия природных и антропогенных факторов. Природную основу формируют геологическое строение, рельеф, гидрологические и климатические условия. Антропогенное воздействие связано с застройкой надпойменной террасы, с изменением поверхностного и подземного стока, дополнительной нагрузкой на территорию, возможными утечками из коммуникаций, поливом садов и работой индивидуальных систем водоотведения.



Рис. 1. Растрескавшееся дорожное полотно на оползневом участке в городе Буйнакске (Республика Дагестан)

Одной из важнейших предпосылок активизации этого оползневого процесса стала высокая степень хозяйственного освоения надпойменной террасы реки Эрпели-озень. По материалам обследования, на рассматриваемой территории расположено примерно 100 частных домовладений с садами,

приусадебными участками, хозяйственными постройками, гаражами, навесами, заборами, внутридворовыми проездами, локальными подпорными стенками и инженерными коммуникациями. Возникает вопрос: почему такие геологические процессы не прогнозировали в эпоху повсеместного внедрения цифровых технологий? В настоящей статье предложена организация хранилища данных опасных инженерно-геологических процессов в бассейнах горных рек, использование которого способно помочь в решении проблем с помощью искусственного интеллекта.

В эпоху бурного развития вычислительных систем и цифровых технологий данные об экзогенных и эндогенных геологических процессах превратились в важнейший ресурс. Применение новейших технологий позволяет отображать пространственную информацию в виде разнообразных электронных карт. Такая организация данных помогает на высоком научно-методическом уровне решать широкий спектр научных и прикладных задач, связанных с рациональным использованием природных ресурсов и с охраной окружающей среды. На основе информационной базы данных можно разрабатывать специальные тематические карты, которые будут характеризоваться достаточной степенью детальности для решения задач анализа и прогноза развития геологических процессов, возникающих вследствие использования природных ресурсов в хозяйственной деятельности. Опираясь всеми имеющимися геологическими сведениями об объекте, в том числе хранящимися в базах графических и семантических данных, можно разработать методику и создать математические модели. В научной литературе уже приведены требования к системе моделей, детализированы цели и задачи моделирования, определены критерии оценки качества решения и его оптимальные сроки, проанализированы необходимые финансовые, людские и материальные ресурсы и т. п. [2–5].

Чтобы разрозненные данные превратились в полезную информацию, необходимо применение соответствующих подходов к управлению ими, а также к их хранению и обработке. Хранилище данных — это совокупность инфраструктуры и инструментов для эффективного выполнения таких функций, поэтому исследования по созданию хранилищ данных являются актуальными.

Перед формированием хранилища данных необходимо разработать информационную модель. Создание любой информационной модели начинается с определения класса (шаблона), на основании которого можно сконструировать различные объекты этого класса; каждый из них будет характеризоваться набором собственных специфических свойств, называемых атрибутами и позволяющих однозначно идентифицировать эти объекты.

Для выбора шаблона можно воспользоваться «классическим» определением опасного инженерно-геологического процесса (далее — ОИГП). Согласно данному определению, ОИГП — это изменение состояния геологической среды, обусловленное естественными или техногенными причинами, которое может привести к негативным последствиям для человека, объектов хозяйства и окружающей среды [1, 6].

Очевидно, что в основу классификации ОИГП можно положить причины, которые приводят к его возникновению. В зависимости от этого ОИГП можно разделить на два класса. Первый — класс эндогенных процессов, обусловленных воздействием внутренней энергии Земли; второй — класс экзогенных процессов, обусловленных внешними, поверхностными воздействиями, которые вызваны энергией Солнца и силой тяжести.

Этим классам присущи три атрибута — географическая привязка, время возникновения и степень опасности / геологический риск.

Дальнейшая типизация ОИГП производится по характеру движения грунтов и по физико-химическим процессам, которые приводят к их возникновению. В таком случае объектами первого класса являются:

- тектонические движения — медленные механические перемещения блоков литосферы;
- землетрясения — внезапное смещение и движение тектонических плит;
- вулканизм — возникновение трещин при движении литосферных плит;
- метаморфизм — воздействия высокой температуры;
- магматизм — кристаллизация магмы.

Объектами второго класса являются:

- выветривание — процессы, вызванные суточными и сезонными колебаниями температуры;
- эрозия — процессы, вызванные воздействием воды и ветра;
- деятельность рек, ветра, ледников и морей;
- склоновые процессы — процессы, вызванные действием силы тяжести Земли.

Из этого списка для нас представляют интерес в основном те экземпляры объектов, которые наиболее часто встречаются в исследуемых районах, — землетрясения (объект первого класса) и склоновые процессы (объект второго класса).

Землетрясениями называются быстрые толчки земной поверхности, вызываемые сериями колебаний, которые проходят через породы Земли.

Первый ключевой атрибут землетрясения — это глубина расположения гипоцентра, в соответствии с которой их можно классифицировать как:

- мелкофокусные (очаг лежит не глубже 60 км);
- промежуточные (глубина залегания очага — 60–150 км);
- глубокофокусные (очаг расположен глубже 150 км).

Второй ключевой атрибут землетрясения — это его происхождение, в соответствии с которым их можно классифицировать как:

- тектонические, обусловленные мгновенной разрядкой напряжений в слоях горных пород;
- вулканические, связанные с давлением поднимающейся магмы и выделяющихся из неё газов;
- экзогенные, происходящие при обрушении кровли карстовых пустот, при обвалах и оползнях, падении метеоритов и т. д.;
- техногенные, спровоцированные деятельностью человека — заполнением водохранилищ, взрывами, закачкой жидкостей в шахты и др.

Также важным атрибутом землетрясений является его абсолютная сила, оцениваемая по шкале магнитуды. Она опирается на действительную энергию, выделяющуюся в очаге землетрясения: измеряется максимальная амплитуда колебаний частиц грунта, записанная на сейсмограмме на расстоянии 100 км от эпицентра. Магнитуда толчка соответствует величине десятичного логарифма амплитуды колебаний.

Склоновые процессы можно классифицировать по характеру движения горных пород следующим образом:

1. Движения, обусловленные собственно гравитацией:

- обвалы — процесс отрыва от основного массива горных пород крупных ($> 10 \text{ м}^3$) блоков и их последующее перемещение вниз по склону с опрокидыванием и перекачиванием без воздействия воды (перемещение блоков объёмом 1–10 м^3 называется камнепадом);
- осыпи — скатывание по очень крутым склонам и накопление в их основании обломков объёмом до 1 м^3 ;
- лавины — значительный объём снежной массы, падающей или соскальзывающей с крутых горных склонов со скоростью около 20–30 $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$.

2. Блоковые движения:

- оползни — смещение горных пород на склонах, при котором преобладает скольжение по имеющимся или формирующимся поверхностям или по системе поверхностей под действием веса грунта и объёмных и поверхностных сил (различают оползни скольжения, оползни выдавливания, вязкопластические оползни, оползни внезапного разжижения и оползни гидродинамического разрушения);
- оплывы — спливание маломощного слоя рыхлых пород по склону обычно вследствие пересыщения породы талыми, дождевыми или грунтовыми водами;

- проседания — вертикальное движение поверхности Земли вниз, вызываемое уплотнением грунта или горных пород.

3. Массовое смещение чехла рыхлого материала:

- солифлюкция — медленное, пластичное течение насыщенных водой почв и грунтов по склону под действием силы тяжести, чаще всего в условиях попеременного промерзания и протаивания;
- дефлюкция — медленное пластичное движение грунта вниз по склону под действием сил тяжести, которое происходит в результате циклов замерзания и оттаивания и увлажнения и высыхания;
- плоскостной смыв — послойное удаление верхнего слоя почвы или продуктов выветривания горных пород дождевыми или талыми водами, стекающими по склону.

Таким образом информационную модель опасных геологических процессов можно представить в виде схемы (рис. 2).

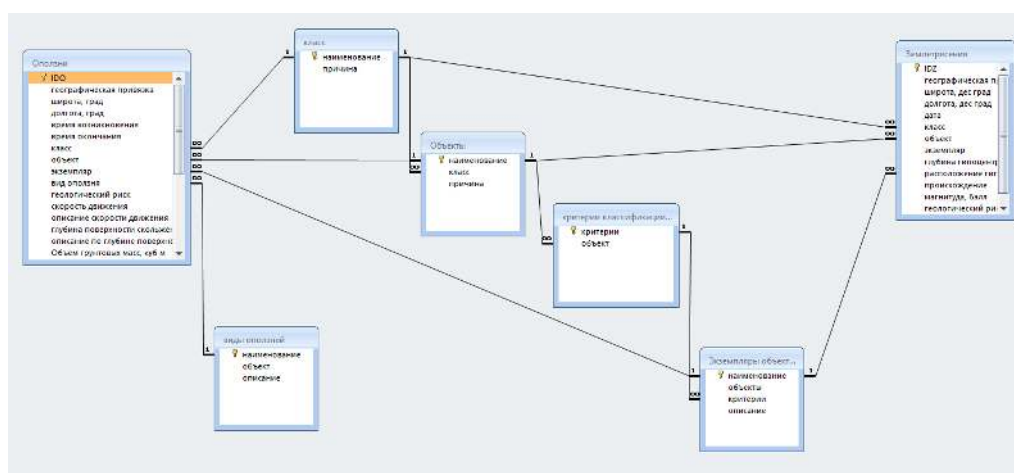


Рис. 2. Общая схема организации хранилища данных опасных инженерно-геологических процессов

Как видно из рис. 2, информационная модель ОИГП начинается с блока «класс». В нём хранится информация, по которой производится первоначальная классификация ОИГП (табл. 1).

Таблица 1. Классификация опасных инженерно-геологических процессов

Классы опасных инженерно-геологических процессов	
эндогенные	экзогенные
Объекты	
тектонические движения	выветривание
землетрясения	эрозия
вулканизм	деятельность рек, ветра, ледников и морей
магматизм	склоновые процессы
метаморфизм	

Классификацию и атрибуты интересующего нас объекта — «землетрясение» — можно представить в следующем виде (табл. 2).

Классификацию экземпляра «склоновые процессы» можно представить в следующем виде (табл. 3).

Для наиболее распространённого на исследуемой территории экземпляра — «оползень» — можно выделить следующие атрибуты (табл. 4).

Таблица 2. Разновидности землетрясений и их характеристики

Экземпляры объекта «землетрясение»	
По расположению гипоцентра: • мелкофокусные; • промежуточные; • глубокофокусные	По характеру происхождения: • тектонические; • вулканические; • экзогенные; • техногенные
Атрибуты: • географическая привязка; • широта; • долгота; • время возникновения; • геологический риск; • абсолютная сила землетрясения	

Таблица 3. Разновидности склоновых процессов

Экземпляры объекта «склоновые процессы»		
По движению, обусловленному собственно гравитацией: • обвал; • осыпь; • лавина	По блоковому движению: • оползень; • оплыв; • проседание	По массовому смещению чехла рыхлого материала: • солифлюкция; • дефлюкция; • плоскостной срыв

Используя описанную выше информационную модель, мы разработали хранилище данных ОИГП, основанное на реляционных принципах, в системе управления базами данных MS Access.

Основными объектами этой базы данных являются две таблицы, в которых хранится информация о ОИГП, характерных для исследуемого района. Первая таблица — «Землетрясения». В ней будет храниться информация обо всех эндогенных процессах изучаемой территории (рис. 3).

Землетрясения									
IDZ	Географическая привязка	Широта, дес. град.	Долгота, дес. град.	Дата	Класс	Объект	Экземпляр	Глубина гипоцентра, км	Расположение гипоцентра
111						землетрясения		10	мелкофокусные
									тектонические
									3
									умеренное

Рис. 3. Таблица «Землетрясения» для хранения информации по эндогенным процессам

Формат данных для полей этой таблицы приведён на рис. 4.

Информация об экзогенных процессах собрана во второй таблице — «Оползни» (рис. 5). Формат данных для её полей приведён на рис. 6.

Помимо основных таблиц, разработаны пять вспомогательных, в которых хранятся повторяющиеся атрибуты объектов из основных таблиц. Информационные поля вспомогательных таблиц привязаны к соответствующим полям основных: это позволяет вносить сведения в основные таблицы по значению идентификатора.

В представленном хранилище данных сконцентрированы как пространственные, так и временные характеристики ОИГП. Соответственно, на основе этой информации можно проводить анализ как по пространственным, так и по временным измерениям.

Таблица 4. Свойства оползней

Атрибуты экземпляра «оползень»:

- географическая привязка;
- широта;
- долгота;
- время возникновения;
- время окончания;
- геологический риск;
- скорость движения (очень медленные и стремительные, $3\text{--}5\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$);
- глубина залегания поверхности скольжения (поверхностные — не глубже 1 м; мелкие — до 5 м, глубокие — до 20 м; очень глубокие — глубже 20 м);
- объём схода грунтовых масс;
- тип материала;
- степень активности (активные — двигались в течение последних 12 месяцев; неактивные — не двигались в течение последних 12 месяцев);
- границы и структура;
- трещины на стенах зданий;
- искривление или перекося дверных и оконных проёмов, заклинивание дверей;
- наклон столбов, деревьев и других сооружений;
- появление трещин или проседание грунта на склонах;
- просачивание воды из склонов;
- наличие «пьяного леса» (кривых, наклонных стволов деревьев)

Имя поля	Тип данных
Географическая привязка	Числовой
Широта	Числовой
Долгота	Числовой
Дата	Числовой
Время	Числовой
Объём	Числовой
Тип материала	Числовой
Активность	Числовой
Глубина залегания поверхности скольжения	Числовой
Структура	Числовой
Трещины на стенах зданий	Числовой
Искривление или перекося дверных и оконных проёмов	Числовой
Наклон столбов, деревьев и других сооружений	Числовой
Появление трещин или проседание грунта на склонах	Числовой
Просачивание воды из склонов	Числовой
Наличие «пьяного леса»	Числовой
...	...

Рис. 4. Формат данных таблицы «Землетрясения»

В дальнейшем эта база данных преобразовывается в базу геоданных с помощью программного пакета ArcGis 10.22, а вся информация, представленная в базе, переносится на электронную топографическую карту. Всё это позволяет сформировать единую геоинформационную систему опасных инженерно-геологических процессов Юго-Восточного Кавказа, Азербайджана и Ирана.

На основе созданной ГИС можно успешно решать задачи территориального планирования при необходимости оценки геологических рисков и разрабатывать меры, позволяющие предотвратить возникновение катастрофических процессов при хозяйственном освоении различных территорий.

5. Создание гидрогеологических карт с применением компьютерных технологий. Москва : ВСЕГИНГЕО МПР РФ, 2001. 196 с.
6. Сулейманов В. К., Мамаев С. А., Черкашин В. И., Идрисов И. А., Ибаев Ж. Г. Экзогенные геологические процессы в бассейнах рек горного Дагестана // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2025. № 1 (100). С. 62–65. <https://elibrary.ru/iaxnjb>
7. Фондовые материалы по инженерно-геологическим изысканиям по городу Махачкала, 2004–2020 гг. ООО «Геолог-Эколог», ООО «Сигма», ООО «Геология-Поиск».

УДК 579.26:631.46

Перестройка сетей совместной встречаемости бактерий как основа устойчивости почвенных экосистем бассейна реки Фатала

Игнатъева Д. А.¹, Горбунова Т. Ю.¹, Keita I.², Алексеев Я. И.^{1,3,4,5}, Горбунов Р. В.⁶,
Монахова Ю. А.³, Шварцев А. А.³, Братанов Н. С.¹, Михайлычева М. В.^{3,7,8}, Фаерман А. В.¹,
Киселёва М. В.¹, Diallo A. I. P.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

³ООО «НПФ Синтол», Москва, Россия

⁴Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁵Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарах»
НИЦ «Курчатовский институт», Ялта, Россия

⁶Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

⁷Московский физико-технический институт, Москва, Россия

⁸Федеральный научно-клинический центр физико-химической медицины имени академика Ю. М. Лопухина
Федерального медико-биологического агентства, Москва, Россия

✉ da_ignateva@ibss-ras.ru

Рассмотрены особенности структурной организации сетей совместной встречаемости бактериальных сообществ при продвижении по почвенному профилю бассейна реки Фатала (Гвинейская Республика) в сухой и влажный сезоны. На основе анализа топологических параметров и роли таксонов в сети (Zi-Pi) установлено, что с глубиной происходит переход от высокоинтегрированной сети гумусоаккумулятивного горизонта к максимално модульной структуре материнской породы. В гумусоаккумулятивном горизонте выявлены таксоны-коннекторы *Pajaroellobacter*, *Actinoallomurus* и JG30a-KF-32, обеспечивающие связи между модулями сети. Установлено, что сезонная динамика приводит к пересборке сети иллювиального горизонта при сохранении таксономического ядра в гумусоаккумулятивном горизонте. Показано, что устойчивость экосистемы обеспечивается не статичностью состава, а топологической пластичностью сети при стабильности предсказанного функционального профиля.

Ключевые слова: почвенный микробиом, тропические почвы, сети совместной встречаемости, Zi-Pi-анализ, 16S rPHK, река Фатала, Гвинейская Республика

Почвенные микробные сообщества регулируют глобальные биогеохимические циклы, при этом для тропических экосистем с выраженной сезонной динамикой механизмы устойчивости микробиома остаются недостаточно изученными, особенно на уровне глубоких генетических горизонтов [3, 5]. Одним из ограничений является тот факт, что традиционные индексы альфа- и бета-разнообразия не всегда позволяют выявить ранние перестройки структуры сообщества, которые могут сигнализировать о дальнейшем нарушении функционирования экосистемы, в то время как анализ топологии сетей совместной встречаемости позволяет оценить устойчивость микробиома как целостной системы. Моделью для проведения подобного анализа в данном исследовании выбран бассейн реки Фатала Гвинейской Республики, контрастная смена сухого и влажного сезонов на территории которого приводит к циклическим колебаниям влажности и к поступлению лабильной органики [1], что непосредственно влияет на функционирование микробных сообществ.

Цель работы — выявление закономерностей топологической организации бактериальных сетей в профиле тропических почв и определение механизмов, обеспечивающих устойчивость сообществ к сезонным изменениям за счёт перестройки взаимодействий между таксонами.

Образцы почв ($n = 121$) отобраны из 18 полнопрофильных разрезов в бассейне реки Фатала в сухой (ноябрь — декабрь 2023 г.) и влажный (июль — август 2024 г.) сезоны. Горизонты агрегированы в четыре группы: гумусоаккумулятивный, элювиальный, иллювиальный и материнская порода.

ДНК выделяли набором «Почва Экспресс», библиотеки ампликонов V3–V4 16S рРНК готовили с помощью набора MetaGen-16sRNA и секвенировали на платформе Illumina MiSeq. Таксономическую идентификацию проводили через Kraken2 по базе данных SILVA v138.2, функциональный потенциал предсказывали с помощью FAPROTAX.

Сети совместной встречаемости реконструировали методом SpiecEasi с CLR-трансформацией и отбором устойчивых связей по алгоритму StARS. Для каждого горизонта выполнено 100 бутстреп-итераций, рассчитаны топологические параметры (число узлов/рёбер, плотность, модулярность, средняя длина пути) и проведён Zi-Pi-анализ для выявления ключевых таксонов. Сезонные различия оценены *U*-критерием Манна — Уитни и PERMANOVA.

Сети совместной встречаемости продемонстрировали закономерное упрощение структуры с глубиной (табл. 1, рис. 1), при этом гумусоаккумулятивный горизонт характеризовался максимальным числом рёбер (405 ± 52) и плотностью ($0,030 \pm 0,004$), что отражает интенсивные биотические взаимодействия в условиях обилия лабильной органики. Материнская порода, напротив, имела наименьшее число связей (278 ± 59) и наибольшую модулярность ($0,693 \pm 0,053$, $p < 0,001$), что свидетельствует о наличии геохимического барьера и о формировании изолированных функциональных кластеров в олиготрофных условиях [7].

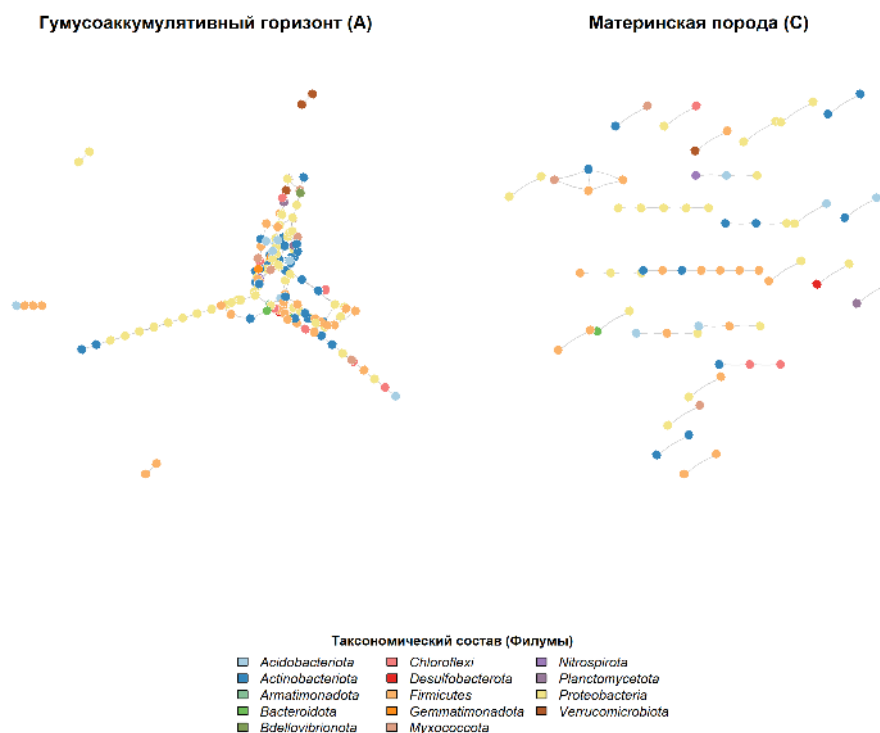


Рис. 1. Структура консенсусных микробных сетей совместной встречаемости гумусоаккумулятивного горизонта (А) и материнской породы (С). Узлы соответствуют родам микроорганизмов, цвета отражают таксономическую принадлежность на уровне филумов

Таксоны-коннекторы ($Z_i < 2,5$, $P_i \geq 0,62$) обнаружены только в гумусоаккумулятивном горизонте и включают *Actinoallomurus* (Actinobacteriota, $P_i = 0,625$), JG30a-KF-32 (Chloroflexi, $P_i = 0,667$) и *Pajaroellobacter* (Mycococcota, $P_i = 0,720$) (рис. 2). При этом *Pajaroellobacter* особенно интересен как представитель хищных бактерий, социальная стратегия которых позволяет координировать потоки вещества между разными функциональными модулями [4]. В нижележащих горизонтах коннекторы отсутствуют, что может указывать на функциональную фрагментацию сообщества и на доминирование локальных взаимодействий в рамках отдельных модулей.

Таблица 1. Усреднённые топологические параметры таксономических сетей ($M \pm SD$)

Почвенный горизонт	Число узлов	Число рёбер	Плотность	Модулярность	Средняя длина пути
Гумусоаккумулятивный	166 $\pm$ 0,0	405 $\pm$ 52,5	0,0296 $\pm$ 0,0038	0,573 $\pm$ 0,041	3,815 $\pm$ 0,313
Элювиальный	166 $\pm$ 0,0	342 $\pm$ 43,1	0,0250 $\pm$ 0,0032	0,592 $\pm$ 0,043	4,340 $\pm$ 0,418
Иллювиальный	166 $\pm$ 0,0	330 $\pm$ 35,3	0,0241 $\pm$ 0,0026	0,594 $\pm$ 0,033	4,304 $\pm$ 0,285
Материнская порода	166 $\pm$ 0,0	278 $\pm$ 58,9	0,0203 $\pm$ 0,0043	0,693 $\pm$ 0,053	5,971 $\pm$ 1,144

Примечание: значения представлены как среднее $\pm$ стандартное отклонение, рассчитанные по множественным сетям (бутстреп-анализ). Модулярность $> 0,4$ во всех горизонтах указывает на выраженную кластерную структуру сообществ.

Функциональные сети, построенные по предсказанным профилям FAPROTAX, во всех горизонтах имели крайне низкую связность (среднее число рёбер $< 1,2$) и близкую к нулю модулярность. Подобный контраст, соответствующий высокой структурированности таксономических связей и размытости взаимосвязей на уровне предсказанных функций, демонстрирует проявление гипотезы функциональной избыточности, согласно которой стабильность биогеохимических процессов поддерживается за счёт метаболической гибкости и взаимозаменяемости таксонов [2].

Интересно, что сезонный анализ выявил две принципиально разные адаптивные стратегии. Так, в гумусоаккумулятивном горизонте топологические параметры сети между сезонами значимо не менялись ($p > 0,05$), однако перекрытие по рёбрам составило лишь 7,6 % при сохранении 71,5 % узлов. Именно поэтому можно предположить, что один и тот же набор доминирующих родов перестраивает паттерны взаимодействий, сменяя ключевых игроков, а именно в сухой сезон мы наблюдаем модульные хабы *Chthonomonas* и *Pantoea*, а во влажный сезон эта роль переходит к роду *Planosporangium* и появляется коннектор *Domibacillus*. В иллювиальном горизонте, напротив, влажный сезон вызывал резкое увеличение числа рёбер и плотности ($p < 0,01$) при одновременном снижении модулярности, причём перекрытие как по узлам (37 %), так и по рёбрам (~ 0 %) было минимальным. Можно заключить, что приток влаги и растворённой органики активирует здесь не простую перестройку связей, а полноценную смену сообщества [6].

Двухфакторный анализ PERMANOVA подтвердил значимое взаимодействие горизонта и сезона ($R^2 = 0,053$, $p = 0,001$), а также то, что реакция микробиома на климатические сдвиги детерминирована положением в профиле. Можно предположить, что гумусоаккумулятивный горизонт реализует стратегию динамической стабильности, выраженной в быстрой смене топологических ролей при сохранении таксономического ядра, в то время как иллювиальный горизонт функционирует как более пластичная экосистема, микробиом которой способен к полной пересборке сети при изменении гидрологического режима.

Структура бактериальных сетей совместной встречаемости в тропических почвах бассейна реки Фатала отражает градиент от биотического контроля в верхних горизонтах к геохимическому барьеру на глубине, при этом устойчивость экосистемы к сезонным стрессам обеспечивается не статичностью состава, а топологической пластичностью сетей, которая выражена в смене ролей ключевых таксонов, включая коннекторы-миксобактерии, в поверхностных горизонтах, а также через гидрологически обусловленную пересборку сообщества в иллювиальном горизонте. При этом функциональная избыточность позволяет сохранять стабильность метаболического профиля при значительных перестройках таксономических взаимодействий. Полученные данные важны для прогнозирования отклика тропических почв на глобальные изменения климата.

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).

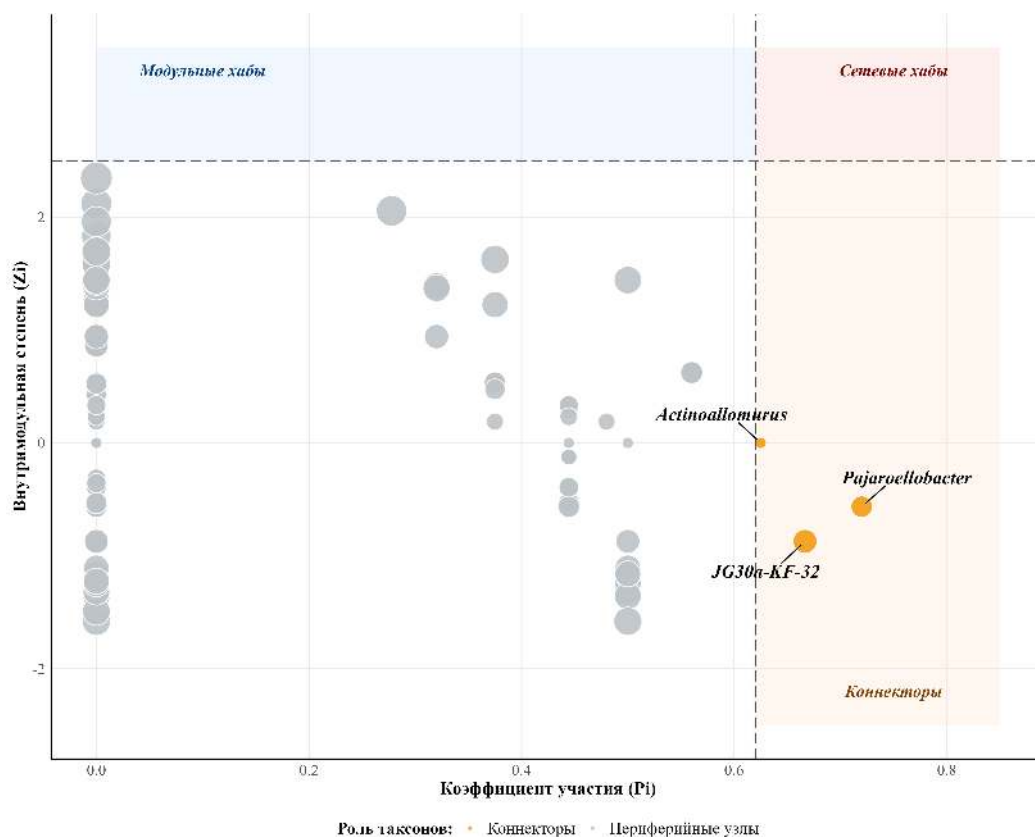


Рис. 2. Классификация ключевых таксонов гумусового горизонта на основе внутримодульной степени (Z_i) и коэффициента участия (P_i); пунктирные линии обозначают пороги ($Z_i = 2,5$ и $P_i = 0,62$)

Работа выполнена на базе научно-образовательного центра коллективного пользования «Филологеномика и транскриптомика» ФИЦ ИнБЮМ. Данные секвенирования доступны в NCBI SRA (PRJNA1303039).

Список использованных источников

1. Ignateva D. A., Gorbunova T. Yu., Keita I., Alekseev Ya. I., Gorbunov R. V., Shvartsev A. A., Volkov A. A., Monakhova Yu. A., Tabunshchik V. A., Diakité S., Baldé A. M., Sow M. D., Diallo A. I. Bacterial composition of soils in the Fatale River basin (Guinea) during the dry season: An examination of its relationship with ecological landscape characteristics. South of Russia: Ecology, development, 2024, vol. 19, no. 4, pp. 110–130. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2024-4-9>
2. Louca S., Polz M. F., Mazel F., Albright M. B. N., Huber J. A., O'Connor M. I., Ackermann M., Hahn A. S., Srivastava D. S., Crowe S. A., Doebeli M., Parfrey L. W. Function and functional redundancy in microbial systems. Nature Ecology & Evolution, 2018, vol. 2, iss. 6, pp. 936–943. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0519-1>
3. Naylor D., McClure R., Jansson J. Trends in microbial community composition and function by soil depth. Microorganisms, 2022, vol. 10, iss. 3, art. 540 (26 p.). <https://doi.org/10.3390/microorganisms10030540>
4. Petters S., Groß V., Söllinger A., Pichler M., Reinhard A., Bengtsson M. M., Urich T. The soil microbial food web revisited: Predatory myxobacteria as keystone taxa? The ISME Journal, 2021, vol. 15, iss. 9, pp. 2665–2675. <https://doi.org/10.1038/s41396-021-00958-2>

5. Rumpel C., Kögel-Knabner I. Deep soil organic matter – a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant and Soil*, 2011, vol. 338, iss. 1–2, pp. 143–158. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0391-5>
6. Vidal L. O., Abril G., Artigas L. F., Melo M. L., Bernardes M. C., Lobão L. M., Reis M. C., Moreira-Turcq P., Benedetti M., Tornisiello V. L., Roland F. Hydrological pulse regulating the bacterial heterotrophic metabolism between Amazonian mainstems and floodplain lakes. *Frontiers in Microbiology*, 2015, vol. 6, art. 1054 (10 p.). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01054>
7. Zhang Q., Goberna M., Liu Y., Cui M., Yang H., Sun Q., Insam H., Zhou J. Competition and habitat filtering jointly explain phylogenetic structure of soil bacterial communities across elevational gradients. *Environmental Microbiology*, 2018, vol. 20, no. 7, pp. 2386–2396. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.14247>

УДК [551.43:911.6](282.247.443)

Влияние геологического строения на природное районирование бассейна реки Сулак

Идрисов И. А.

Институт геологии ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия

✉ idris_gun@mail.ru

Природная дифференциация бассейна реки Сулак как центрального элемента Восточного Кавказа обусловлена различными факторами. Одним из важнейших является его геологическое строение. Это основа, на которую воздействуют экзогенные процессы. Геологическое строение играет ведущую роль при определении границ регионов разных уровней. В практике районирования используются различные подходы и вводные данные, что позволило создать ряд схем для региона.

Бассейн реки Сулак занимает различные природные зоны — от высокогорий выше 4000 м до уреза Каспийского моря ниже –29 м. Его площадь, по нашим данным, составляет 15,7 тыс. км².

Бассейн разделяется на две крупные области — равнинную и горную. Равнинная расположена на территории с преимущественным погружением и представляет собой аккумулятивную низменность. Горная расположена в пределах территории с неотектоническим воздыманием и представляет собой преимущественно эрозионные участки. Аккумулятивные отложения речных террас, подпрудных озёр и ледников занимают в горной области ограниченные площади, но на отдельных участках имеют большую мощность.

Равнинная область занимает немногим более 2,2 тыс. км² и имеет овальную форму (вытянута с запада на восток). Выделение её точных контуров — во многом предмет дискуссий. Это связано с тем, что на юге Прикаспийской низменности для всех рек, в том числе для реки Сулак, характерны многократные перестройки речной сети [1]. Здесь развито множество русел различных генераций. В некоторые периоды такие реки, как Акташ и Аксай, впадали в отдельные рукава реки Сулак. В настоящее время практически весь сток этих рек собирается в канал, воды которого также поступают в реку Сулак. Однако мы будем рассматривать равнинную область только реки Сулак, включая её многочисленные русла и территорию между руслами и исключая бассейны рек Акташ и Аксай. Районирование этой области на основе геолого-геоморфологических особенностей относительно хорошо обосновано [2 и др.].

Горная область занимает 13,4 тыс. км². Она имеет треугольную форму (расширяется к верховьям бассейна в юго-западном направлении). В её пределах по распространению разных горных пород, обусловленному различиями в тектоническом строении [3] и развитии, можно выделить 6 районов. Районы 6 и 7 относятся к России и Грузии соответственно и по природным особенностям могут быть объединены.

В пределах распространения терригенных юрских отложений можно выделить два важнейших этапа развития [4], определяющих многие современные особенности природы региона. Первым является ранняя юра — аален (низ средней юры), отложения которого представлены многокилометровой толщей переслаивания песчаников и аргиллитов, занимающих юго-запад бассейна. Эти породы формируют крупные хребты, фрагменты Бокового хребта (Снеговой, Богос, Нукатль, Шалиб и Дюльтыдаг). Этому этапу и сформированным породам соответствуют районы 6 и 7 (рис. 1); район 6 относится к России, а район 7 (Тебулосмта) — к Грузии. Здесь доминируют хребты, расчленённые долинами глубиной до нескольких километров. В юго-западной части, в зоне развития крупных тектонических разломов и преимущественно аргиллитов, территория в целом значительно ниже, около 2,5–3,5 км.

Второй — это байосский и батский ярусы средней юры, которые представлены преимущественно аргиллитами и занимают северо-восточную периферию области развития сланцевых пород, расширяясь в восточном направлении. Эти отложения слабо устойчивы к эрозии. В пределах распространения этих пород развиты крупные понижения и котловины. Этим отложениям соответствует район 5 — Кулинско-Датунский (см. рис. 1). Для Центрального и Западного Кавказа район обособляется в виде Северо-Юрской депрессии. Три района — 5, 6 и 7 — часто объединяют в Сланцевый Дагестан.

Ещё одним крупным районом является район 4 — Известняковый Дагестан (рис. 1). Его характерная особенность — наличие нескольких зон антиклиналей и синклиналей протяжённостью десятки километров. Район сформирован тремя комплексами отложений. Первый — верхняя юра и низы нижнего мела, образующие толщу с доминированием известняков мощностью в сотни метров. Скальные обрывы этого комплекса являются уникальной особенностью природы региона. Они образуют резкую границу между Сланцевым и Известняковым Дагестаном, бронируют либо оконтуривают антиклинальные хребты и котловины последнего. Также они формируют отдельные синклинальные плато и останцовые горы: Гуниб, Тлимеэр, Шунудаг и др. На Центральном и Западном Кавказе обрывы этого комплекса формируют Скалистый хребет. Второй комплекс представлен песчаниками и аргиллитами аптского и альбского ярусов верхов нижнего мела. Эти отложения слабо устойчивы к эрозии, они формируют котловины и оконтуривают известняковые хребты. Третий комплекс представлен известняками верхнего мела и палеогена. Они формируют синклинальные плато и внешний контур района Известнякового Дагестана.

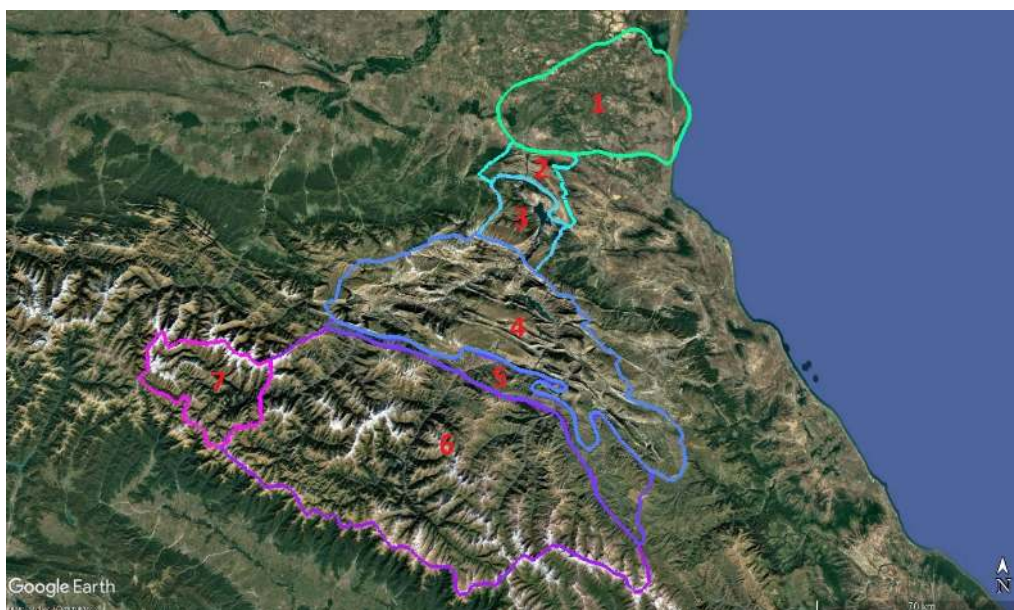


Рис. 1. Природные районы бассейна реки Сулак

Следующим по направлению является район 3 — Салатау-Хадумский. Он сформирован внешними хребтами, которые оконтуривают Горный Дагестан. Хребты района и его простирания на восток (Салатау и Гимринский) расположены на моноклиналях и, соответственно, являются куэстовыми. Северная граница во многом условна, и район постепенно перекрывается участками распространения терригенных пород палеогена и неогена. Основная часть хребтов сложена толщей известняков и мергелей верхнего мела и палеогена мощностью более километра. Хребты пересекаются глубокими ущельями с субвертикальными бортами. В северной части район осложняется крупной сводовой возвышенностью Хадум, также сложенной известняками верхнего мела.

Район 2 — Чирюртовский — соответствует области распространения терригенных пород (песчаников и глин) палеогена и неогена. Это относительно молодой район. Здесь относительно устойчивые к эрозии породы (песчаники и слои мергелей) формируют хребты и гряды. Области развития

глин представлены котловинами и протяжёнными долинами. С северна район оконтурен областью распространения морских террас и лёссовых отложений плейстоцена. Северная граница проходит по области распространения морских отложений хвалынского этапа позднего плейстоцена (табл. 1).

Таблица 1. Характеристика районов бассейна реки Сулак

Название (область, район)	Районы	Породы	Площадь, тыс. км ²
Равнинная область	1	Пески, глины	2268
Горная область	2–7		13 408
Чирюртовский	2	Песчаники, глины	384
Салатау-Хадумский	3	Известняк, мергель	583
Известняковый	4	Известняк, песчаник	3711
Кулинско-Датунский	5	Аргиллит	988
Снеговой — Дюльтыдаг	6	Песчаник, аргиллит	6737
Тебулосмта	7	Песчаник, аргиллит	1005
Бассейн реки Сулак			15 668

Представленные данные показывают значительные различия в природе районов бассейна реки Сулак. Некоторые характеристики выделенных районов влияют на их геоэкологические особенности.

Список использованных источников

- Идрисов И. А. О структуре рельефа юго-запада Прикаспийской низменности // Аридные экосистемы. 2013. № 1. С. 36–43. <https://elibrary.ru/pvvtut>
- Идрисов И. А., Борисов А. В. Геоморфологические районы юга Прикаспийской низменности // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2017. № 71. С. 52–59. <https://elibrary.ru/ymaohc>
- Тектоническая карта Дагестана. М. 1 : 500 000. Пояснительная записка. Махачкала, 2012. 130 с.
- Юрские отложения центральной части горного Дагестана. Путеводитель геологических экскурсий VI Всероссийского совещания «Юрская система России: проблемы стратиграфии и палеогеографии». Махачкала : Типография «Алеф», 2015. 132 с. <https://elibrary.ru/yktsie>

УДК 55(075.8)

Влияние климата на динамику NDVI в бассейнах рек ЮБК

Каширина Е. С., Вышкваркова Е. В., Линёва Н. П.

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

✉ eskashirina@ibss-ras.ru

Приведены результаты анализа влияния климата на динамику NDVI в бассейнах рек ЮБК на примере трёх ключевых участков — бассейна реки Шелен (восточная часть ЮБК), ландшафтно-экологического стационара Карадагского заповедника (юго-восточная часть ЮБК) и амфитеатра бухты Ласпи (западная часть ЮБК). За период 2000–2024 гг. на территории исследования наблюдается положительный и статистически значимый тренд среднегодовых температур воздуха (от +0,05 до +0,11 °C·год⁻¹). Тренды годовых сумм осадков разнонаправлены: отрицательный зарегистрирован в районе бухты Ласпи, положительные (статистически незначимые) — в районах реки Шелен и Карадага.

Ключевые слова: вегетационный индекс, космоснимок, Шелен, Ласпи, Карадаг

Исследование реакции экосистем на изменение климата является одним из приоритетных направлений современной науки. Наземная растительность характеризуется высокой динамичностью и чувствительностью к климатическим условиям и другим факторам глобальных изменений. Влияние климата на динамику NDVI в субсредиземноморских низкогорных лесных ландшафтах Крымского полуострова изучено на примере трёх ключевых участков, расположенных на Южном берегу Крыма (далее — ЮБК): бассейна реки Шелен (восточная часть ЮБК), ландшафтно-экологического стационара Карадагского заповедника (юго-восточная часть ЮБК) и амфитеатра бухты Ласпи (западная часть ЮБК) (рис. 1).

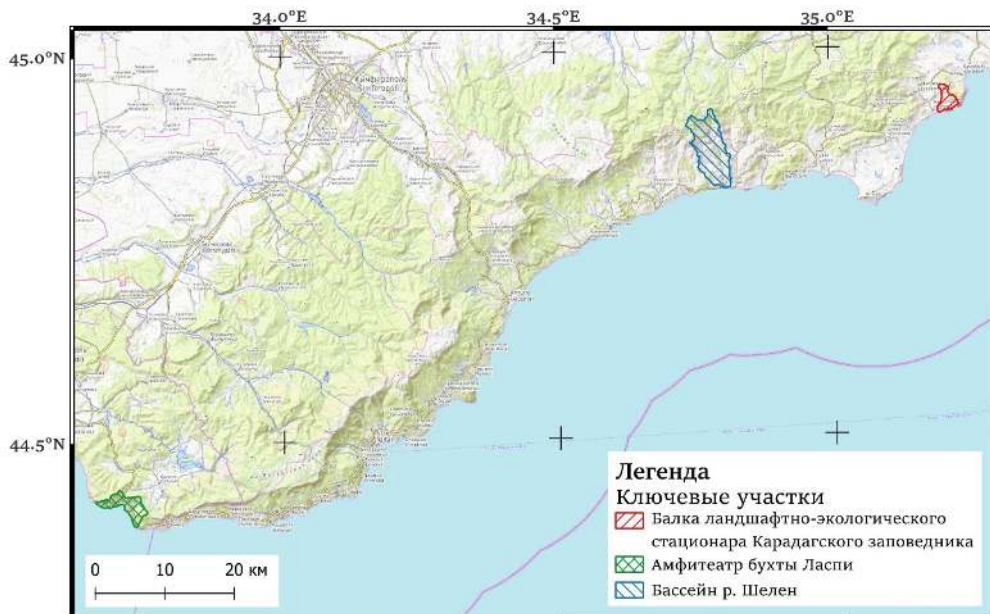


Рис. 1. Расположение ключевых участков

Ландшафтно-экологический стационар Карадагского заповедника расположен в западной части особо охраняемой природной территории. Он представляет собой вулкан юрской эпохи. На исследуемой территории нет постоянных водотоков. Временные водотоки формируются во время дождей.

Растительный покров мозаичный, с чередованиями степных участков и редколесий кустарников. Почвы щебнистые, преимущественно коричневые.

Река Шелен относится району ЮБК, к его юго-восточной части. Это малый водоток (протяжённость — около 10 км) с площадью водосборного бассейна 42 км². Гидрологический режим реки — паводковый, с весенним половодьем и летней меженью. Русло летом часто пересыхает. В многоводный период формируются сели. Река Шелен берёт начало на юго-восточном склоне Главной гряды Крымских гор на высоте около 650 м. Направление течения — с севера на юг. Водосборный бассейн с севера замыкает гора Караул-Тепе (984 м). На востоке бассейн граничит с водосбором реки Ворон [1]. В верхнем течении это горная река, после села Громовка — равнинная. Уклон реки — 35 м·км⁻¹. Впадает в Капсихорскую бухту Чёрного моря в селе Морское, образуя песчано-гравийную дельту 25 × 50 м. Гидрографическая сеть бассейна представлена небольшими овражно-балочными формами рельефа.

Район отличается сложным геологическим строением. Он относится к Приветнинско-Веселовской подзоне Южно-Крымской структурно-формационной зоны. Верхняя часть бассейна находится в горно-лесной зоне: крутые склоны покрыты широколиственными лесами на бурых горно-лесных почвах. Средняя и нижняя части бассейна расположены у прибрежных хребтов, покрытых степной растительностью. Пойменная часть и выровненные участки долины засажены виноградниками.

Бухта Ласпи и прилегающий горный массив расположены в Западном Южнобережье. В центральной и восточной частях территории на поверхность выходит таврическая свита, сложенная флишоидным переслаиванием песчаников, алевролитов и аргиллитов с конкрециями сидеритов и отдельными пачками песчаникового и аргиллитового флиша. Возраст свиты — верхний триас — нижняя юра. На исследуемой территории нет постоянных водотоков. Водотоки формируются во время дождей.

Почвенный покров представлен маломощными сильнощебнистыми смытыми коричневыми и бурыми лесными почвами. Растительный покров представлен лесами и редколесьями по склонам низкогорий, а также степями и кустарниковыми сообществами на водоразделах и скальных выходах. Лес на исследуемой территории дубовый, дубово-грабовый, высокоможжевельниковый, сосновый. Последний представлен как лесокультурой, так и естественными лесами из сосны Палласа (крымской).

Данные и методы. Оценка температурных условий и осадков проведена с использованием сеточных данных E-OBS 31.0e с разрешением 0,1° × 0,1° [2]. NDVI рассчитан за период с 2000 по 2024 г. Данные представляют собой продукт уровня 3 — спектрорадиометр MODIS (умеренного разрешения), NDVI с 16-дневным интервалом (MOD13Q1, коллекция-6) с пространственным разрешением 250 м, полученный с платформы Google Earth Engine и загруженный с сайта MODIS (<https://modis.gsfc.nasa.gov>). В этом продукте были выполнены геометрические коррекции; пиксели, закрытые облаками, были удалены.

Результаты и обсуждение. Среднегодовая температура воздуха за период 1991–2024 гг. в границах субсредиземноморских низкогорных лесных ландшафтов изменяется от +8 до +13 °C (рис. 2). Наибольшие значения обнаружены ближе к Феодосии. Среднегодовые температуры воздуха демонстрируют положительный и статистически значимый тренд — от +0,05 °C·год⁻¹ в районе Севастополя до +0,11 °C·год⁻¹ в районе Крымских гор.

Сетка данных E-OBS не позволяет учесть сложную орографию ЮБК, однако даёт возможность отследить основные тенденции атмосферных осадков. Их годовые суммы изменяются от 350 до 750 мм. В районе ключевого участка Ласпи тренд осадков отрицательный, на двух других участках тенденции положительные, однако статистически незначимые.

Значения NDVI на рассматриваемых ключевых участках за 2000–2024 гг. изменяются от 0,48 до 0,61, что соответствует широколиственным разреженным лесам и редколесьям (рис. 3). Средние значения индекса являются близкими для всех ключевых участков и составляют 0,54–0,55.

Пространственное распределение значений NDVI указывает на его закономерное снижение от лесных районов к степным. Минимумы NDVI отмечены для выходов скал.

Проведён корреляционный анализ между основными метеорологическими параметрами и значениями индекса NDVI (табл. 1).

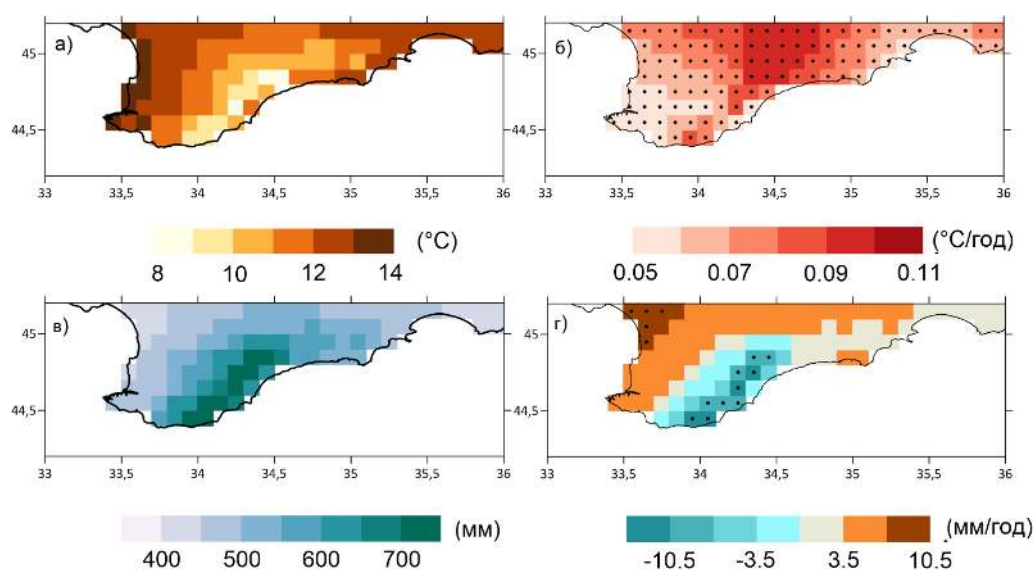


Рис. 2. Пространственное распределение средней температуры воздуха и осадков, а также их трендов за период 2000–2024 гг.

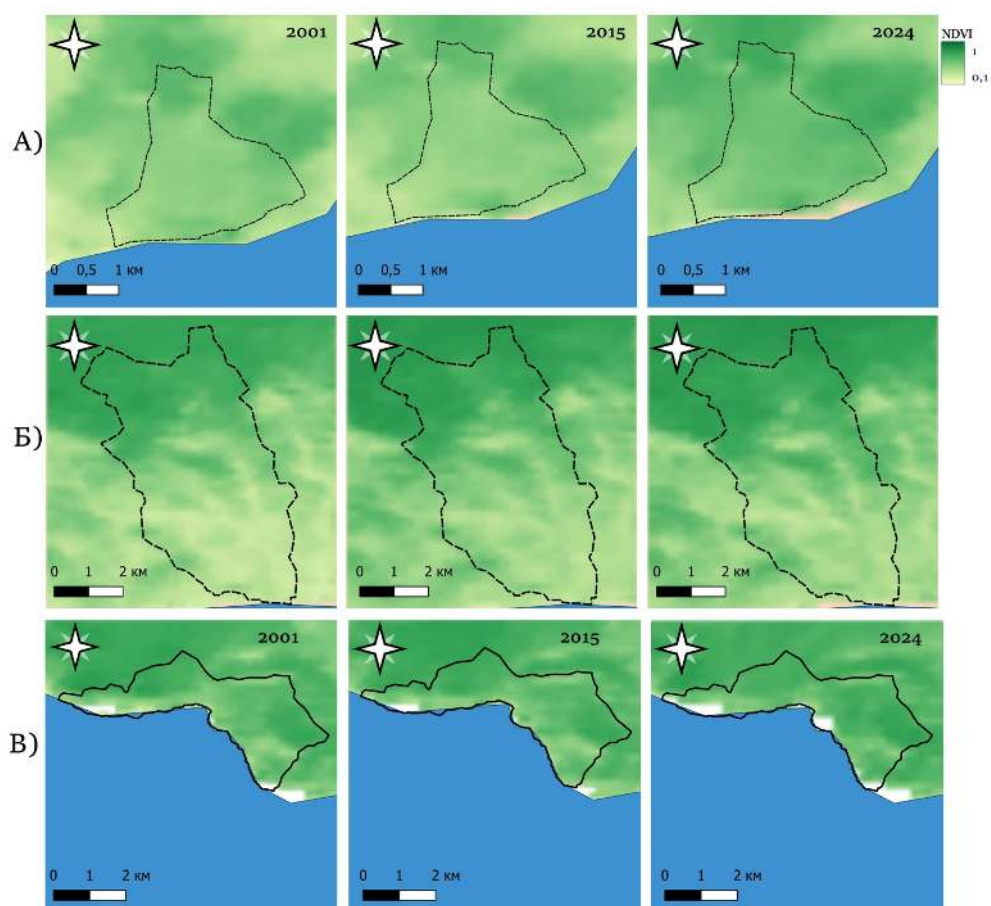


Рис. 3. Пространственное распределение NDVI за период 2000–2024 гг.

Корреляционный анализ выявил в основном слабые отрицательные связи между температурой воздуха, осадками и значениями NDVI на всех трёх ключевых участках (Ласпи, Шелен и Карадаг). Это свидетельствует о нелинейном характере взаимодействия метеорологических факторов

Таблица 1. Коэффициенты корреляции между основными метеорологическими параметрами и индексом NDVI за период 2000–2024 гг.

Коэффициент корреляции	Ключевой участок		
	Ласпи	Шелен	Карадаг
Температура воздуха и NDVI	–0,19	–0,12	–0,007
Осадки и NDVI (лаг +1 год)	–0,17 (+0,16)	–0,06 (+0,24)	–0,11 (–0,15)

и растительности в условиях сложного рельефа ЮБК. При сдвиге ряда осадков на один год вперёд характер связи с NDVI меняется. На участке Ласпи корреляция становится положительной (+0,16), на участке Шелен она также становится положительной и более заметной (+0,24). Для Карадага корреляция остаётся отрицательной (–0,15). Это может указывать на разную скорость реакции растительности на накопление влаги в разных частях ЮБК.

Закключение. За период 2000–2024 гг. на территории исследования наблюдается положительный и статистически значимый тренд среднегодовых температур воздуха (от +0,05 до +0,11 °С·год^{–1}). Тренды годовых сумм осадков разнонаправлены: отрицательный зарегистрирован в районе бухты Ласпи, положительные (статистически незначимые) — в районах реки Шелен и Карадага.

Обнаруженные слабые корреляции указывают на то, что динамика NDVI в субсредиземноморских низкогорных ландшафтах Крыма не определяется линейно только температурой и осадками. Требуется продолжение исследований с учётом более широкого набора факторов (например, антропогенной нагрузки, свойств почв и орографических особенностей), а также применение более сложных методов анализа (включая машинное обучение).

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).

Список использованных источников

1. Дрыгваль А. В. Морфометрический анализ бассейна реки Шелен (Южный берег Крыма) // Гео-логия и водные ресурсы Крыма. Полевые практики в системе высшего образования : материалы Шестой Всероссийской конференции, посвящённой 70-летию Крымской учебной практики по геологическому картированию Ленинградского – Санкт-Петербургского государственного университета, 90-летию профессора Владимира Анатольевича Прозоровского, Республика Крым, 29 августа – 08 сентября 2022 г. / Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, ООО «Водный центр СПбГУ», МОО «Крымская академия наук». Республика Крым : Изд-во «ЛЕМА», 2022. С. 43–45. <https://elibrary.ru/eiurzj>
2. Cornes R. C., van der Schrier G., van den Besselaar E. J. M., Jones P. D. An ensemble version of the E-OBS temperature and precipitation data sets. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, vol. 123, pp. 9391–9409. <https://doi.org/10.1029/2017jd028200>

УДК 551.583

Климатические изменения в бассейне реки Аргун и их влияние на сток

Керимов И. А., Братков В. В., Бекмурзаева Л. Р.

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

✉ kerimov@ifz.ru

Проведён анализ температурного режима и режима увлажнения за период с 1961 по 2025 г. в бассейне реки Аргун. Выявлено увеличение годовой температуры воздуха на 0,5 °C за это время преимущественно за счёт месяцев холодного периода. Количество осадков выросло за 1961–2025 гг. на 12 %. При этом годовые расходы реки Аргун, по данным гидрологического поста Дуба-Юрт, за 1924–2025 гг. существенно не увеличились. Несмотря на горный характер реки, выявлена зависимость между годовыми расходами воды в ней и количеством осадков, выпадающих на территории.

Ключевые слова: современные климатические изменения, температура, осадки, гидротермический коэффициент, речной сток

Климатические изменения Северного Кавказа и их влияние на устойчивость природных и природно-антропогенных систем отражены во многих научных трудах. Из недавних можно выделить [1–3, 5–7, 9]. Как отмечают О. В. Виноградова и Н. Н. Виноградова [4], многолетний сток горных рек Кавказа подвержен колебаниям, сменяющим многоводные и маловодные периоды, что обусловлено циклическими изменениями климата. Основными факторами формирования поверхностного стока для горных рек являются изменения режимов температуры воздуха и выпадения осадков. Температурный режим сказывается на таянии снега, который выпадает в зимний период. Кроме того, под влиянием температуры воздуха может начаться таяние ледников, расположенных в высокогорных частях водосборных бассейнов, которые являются одним из источников речного стока. Поверхностный сток напрямую зависит от режима выпадения осадков. Таким образом, динамика гидрологического режима горных рек Северного Кавказа является следствием современных изменений климатических условий этой территории [8].

Река Аргун образуется у селения Дочи-Борзой из слияния двух рек Чанты — Аргун и Шаро-Аргун. Ширина поймы колеблется в больших пределах — от 50 м у села Дуба-Юрт до 200 м у села Старые Атаги и до 1000 м у села Бердыкель. Русло реки Аргун на плоскости отличается неустойчивостью, разбиваясь на ряд рукавов, меняющих своё направление после каждого паводка. Площадь ледников в бассейне реки — 61,07 км², причём на притоки Шаро-Аргуна приходится 47,37 км², а на притоки Чанты-Аргуна — 13,70 км². Таким образом, площадь оледенения по отношению ко всей площади бассейна составляет 1,8 %. По своему режиму река Аргун имеет все черты горной реки со смешанным питанием, с низкими горизонтами и расходами зимой и летними паводками [10].

Оценка климатических изменений в бассейне реки Аргун проведена на основе данных метеостанции Шатой в период с 1961 по 2025 г. Для сравнения данных были использованы сведения из справочника по климату СССР [11]. Оценка изменений гидрологического режима для реки Аргун выполнена за 1924–2025 гг. по данным гидрологического поста Дуба-Юрт, в работе которого были перерывы. Расходы, используемые для анализа, прошли проверку на однородность. Значения расходов, значительно превосходящие критические, при установленном уровне 5 % были исключены из ряда.

В среднем за 1961–2025 гг. температура воздуха выросла на 0,5 °C (в сравнении с нормой). При этом максимальный прирост температуры приходится на месяцы холодного периода — с ноября по апрель. Значение для мая оказалось ниже среднееголетнего, а значения для июля и октября остались в пределах нормы. Годовые осадки увеличились на 84,3 мм, или на 12 % от нормы. Максимальный рост также пришёлся на месяцы холодного периода (октябрь — апрель).

В июле осадки оказались ниже нормы, а в августе и сентябре были близки к среднемугодовому значению (табл. 1).

Таблица 1. Изменение температурного режима и режима увлажнения в бассейне реки Аргун по данным метеостанции Шатой (1961–2025 гг.)

Температура, °С													
Параметр	Месяц года												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Min	–12,4	–8,5	–2,6	+6,4	+12,0	+15,6	+16,9	+17,2	+8,9	+4,9	–5,1	–7,2	+7,2
Max	+1,4	+2,6	+8,7	+14,3	+17,4	+21,2	+24,2	+24,7	+18,3	+17,7	+7,3	+10,1	+11,0
Среднее	–3,0	–1,7	+3,0	+9,8	+14,5	+18,2	+20,5	+20,2	+15,4	+9,4	+3,5	–0,9	+9,1
Разница	1,1	0,8	1,1	0,7	–0,2	0,3	0,0	0,2	0,5	0,0	0,7	1,0	0,5

Осадки													
Параметр	Месяц года												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Min	0,0	5,0	3,0	8,0	27,0	25,0	17,0	16,4	11,4	0,0	0,0	2,4	466
Max	136	54,1	114	136	211	200	198	183,5	186	140,5	140	129	955
Среднее	24,2	23,8	41,9	63,2	101,3	109,7	86,6	71,4	61,1	43,5	31,9	28,5	687,3
Разница	7,2	3,8	9,9	17,2	12,3	5,7	–1,4	1,4	0,1	8,5	6,9	12,5	84,3

Примечание: min — минимальное значение параметра за период с 1961 по 2025 г.; max — максимальное значение параметра за 1961–2025 гг.; среднее — среднее значение параметра за 1961–2025 гг.; разница — разница между средним значением параметра за период с 1961 по 2025 г. и нормой.

Для выявления периодов похолодания и потепления, а также изменения режима увлажнения были построены разностные интегральные кривые температуры и осадков за период с 1961 по 2025 г. Их анализ показал, что до 1993 г. отмечалось снижение температуры, а с 1993 г. она начала расти. В 1961–1973 гг., 1987–1992 гг. и 2002–2016 гг. выявлено увеличение количества осадков. В 1973–1987 гг., 1992–2002 гг. и 2016–2025 гг. зафиксировано снижение количества осадков (рис. 1).

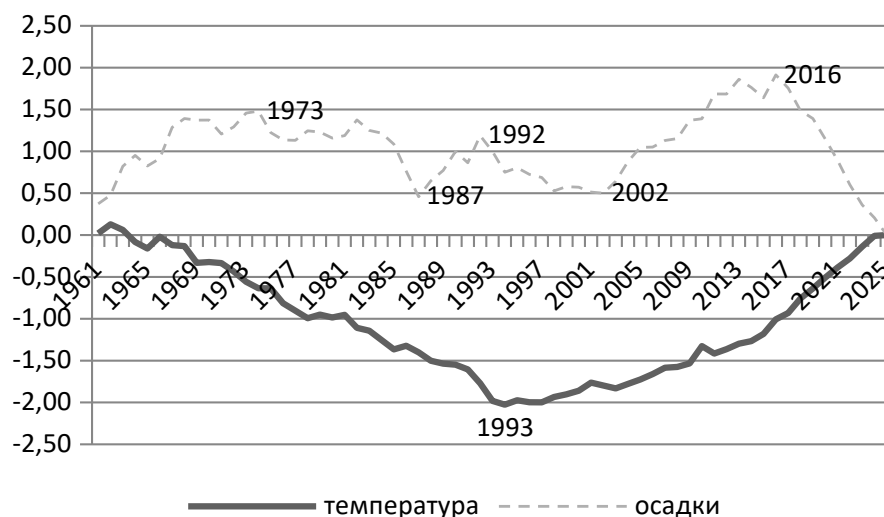


Рис. 1. Разностные интегральные кривые температуры и осадков по данным метеостанции Шатой

Анализ годовых расходов в реке Аргун (данные гидрологического поста Дуба-Юрт) показал, что в период с 1924 по 2025 г. они увеличились незначительно. Коэффициент уравнения линейного тренда составил 0,031 (рис. 2).

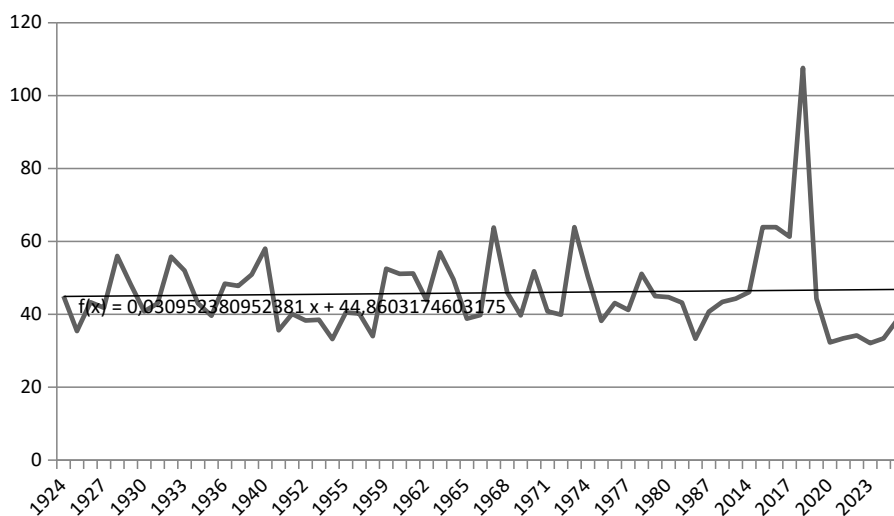


Рис. 2. Годовые расходы в реке Аргун по данным гидрологического поста Дуба-Юрт

Также была построена разностная интегральная кривая расходов воды в реке Аргун (по данным гидрологического поста Дуба-Юрт), совмещённая с разностно-интегральной кривой осадков за 1961–2025 гг. (рис. 3). Анализ кривой показывает, что в периоды с повышенным увлажнением территории отмечается увеличение расходов воды, и наоборот.

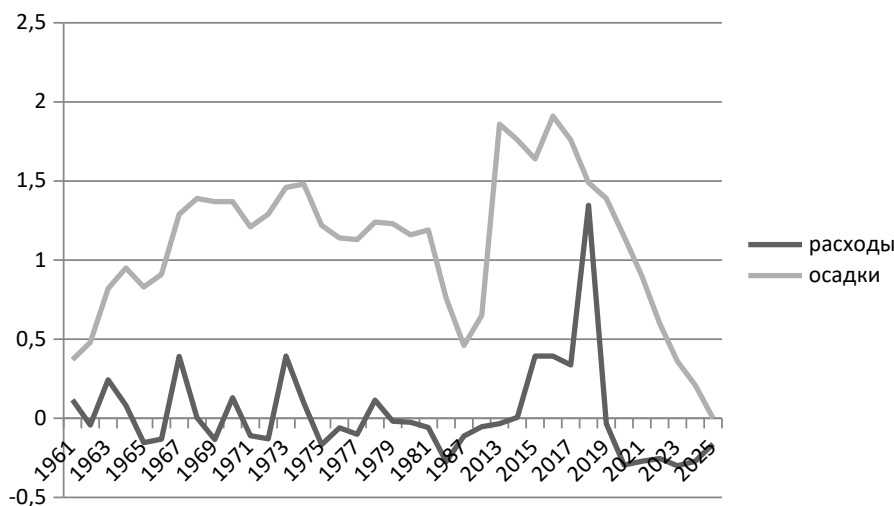


Рис. 3. Разностная интегральная кривая расходов реки Аргун (данные гидрологического поста Дуба-Юрт)

Таким образом, климатические изменения в бассейне реки Аргун в период с 1961 по 2025 г. протекают по сценарию увеличения температуры воздуха в целом на 0,5 °С. Потепление отмечено практически во все месяцы года, кроме мая и июля. Наибольшее отклонение в сторону потепления приходится на месяцы холодного периода. Количество осадков выросло на 12 %; их увеличение в основном тоже приходится на месяцы холодного периода. Расходы в реке Аргун (данные гидрологического поста Дуба-Юрт) в 1924–2025 гг. увеличились незначительно. Несмотря на горный характер реки, отмечена зависимость годовых расходов воды от количества выпадающих осадков.

Работа выполнена в рамках государственного задания ГГНТУ имени академика М. Д. Миллионщикова № FZNU-2024-0001 «Оценка влияния современных климатических изменений на природные и природно-антропогенные комплексы (на примере Чеченской Республики)».

Список использованных источников

1. Ашабоков Б. А., Федченко Л. М., Ташилова А. А., Кешева Л. А., Теунова Н. В. Пространственно-временное изменение климата юга европейской территории России, оценка его последствий, методы и модели адаптации АПК. Нальчик : Печатный двор, 2020. 476 с. <https://elibrary.ru/ycvuri>
2. Бекмурзаева Л. Р., Братков В. В., Керимов И. А. Оценка современных агроклиматических условий Северного Кавказа на основе наземных метеонаблюдений и данных низкого пространственного разрешения. Вестник СГУГИТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2025. Т. 30, № 6. С. 27–35. <https://elibrary.ru/yxyixi>
3. Бозиева Ж. Ч., Агоева Э. А., Иттиев А. Б. Исследование метеорологических и гидрологических параметров Кавказского региона // Геология, география и глобальная энергия. 2021. № 2 (81). С. 114–124. <https://doi.org/10.21672/2077-6322-2021-81-2-114-124>
4. Виноградова О. В., Виноградова Н. Н. Реакция горных рек Кавказа на изменения климата. Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2013. № 4. С. 44–48. <https://elibrary.ru/rdwyjy>
5. Волков С. Н., Савинова С. В., Черкашина Е. В., Шаповалов Д. А., Братков В. В., Ключин П. В. Оценка современных климатических изменений на территории Предкавказья для целей прогнозирования урожайности озимой пшеницы // Юг России: экология, развитие. 2021. Т. 16, № 1. С. 117–127. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2021-1-117-127>
6. Керимов И. А., Братков В. В., Бекмурзаева Л. Р. Динамика агроклиматических показателей степных ландшафтов Северного Кавказа по данным наземных наблюдений. Геология и геофизика Юга России. 2024. Т. 14, № 2. С. 219–230. <https://doi.org/10.46698/vnc.2024.92.31.017>
7. Корчагина Е. А. Долгопериодные изменения температуры воздуха в низкогорной зоне Восточного Кавказа в сезон формирования высоких паводков // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2021. № 2 (100). С. 139–147. <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2021-2-100-139-147>
8. Кучменова И. И. Многолетние изменения гидрологического режима рек Кабардино-Балкарского высокогорного заповедника // Международный научно-исследовательский журнал. 2025. № 12 (162). Ст. 102 (7 с.). <https://doi.org/10.60797/irj.2025.162.1>
9. Ташилова А. А. Уменьшение водных ресурсов региона как следствие деградации ледников Северного Кавказа под воздействием климатических изменений // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 1 (127). Ст. 93 (5 с.). <https://doi.org/10.23670/irj.2023.127.70>
10. Справочник по водным ресурсам СССР / под общ. ред. Л. К. Давыдова. Ленинград : Редакционно-издательский отдел ЦУЕГМС. Т. 10. 1936, 1095 с.
11. Справочник по климату СССР. Вып. 13. Ч. 2 / под ред. В. Ф. Проценко. Ленинград : Гидрометеоздат, 1966. 492 с.

УДК 551.464.34:550.424

Сезонная изменчивость концентраций и потоков метана в приустьевой части реки Мзымта

Кнейб Е. Н., Яцук А. В.

Научно-технологический университет «Сириус», Сириус, Россия

✉ kneibelena00@gmail.com

Представлен анализ данных годового мониторинга приустьевой части реки Мзымта за 2025 г. Для проведения исследования на побережье федеральной территории «Сириус» в марте — декабре 2025 г. проводился периодический пробоотбор в 3 точках и сезонный пробоотбор на 8 точках в районе устья Мзымты. В рамках пробоотбора выполнено 22 полевых выхода с отбором 137 проб воды и атмосферы. Результаты исследования показывают, что устьевые участки горных рек, принимающие дополнительный поверхностный сток с урбанизированных территорий, являются локальными «горячими точками» высоких концентраций и потоков метана, превышающих фоновые значения.

Ключевые слова: метан, горные реки, поток, концентрация, устье, река Мзымта, Большой Сочи

До недавнего времени (2006–2014 гг.) комплексные исследования состава и распространения речного стока в Чёрное море выполнялись ежегодно для всего сектора российского побережья [5, 6]. За последнее десятилетие активность подобных изысканий снизилась, хотя в ряде работ отмечается увеличение концентрации метана в приустьевых зонах рек Большого Сочи. Отметим, что детальный анализ интенсивности потоков этого парникового газа для речных систем Кавказского побережья не проводился [13]. В то же время устьевые участки горных рек являются ключевым местом для понимания интегрального уровня загрязнённости речного стока и расчёта объёмов выноса растворённых газовых компонентов в прибрежные морские акватории.

Стоит отметить, что метан является нормируемым компонентом природных газов (3-й класс опасности). Предельная допустимая концентрация метана для водных объектов рыбохозяйственного назначения — $0,01 \text{ мг} \cdot \text{дм}^{-3}$ (примерно $625 \text{ нмоль} \cdot \text{л}^{-1}$ при нормальных условиях) [1].

В горных реках Кавказа, Средней Азии, юга Сибири и Дальнего Востока диапазон изменения содержания метана обычно меньше, чем в равнинных. При этом увеличение концентрации метана в реке происходит при переходе от её горного отрезка к равнинному. Доминирующее ледниковое и снеговое питание, преобладание в русле горных рек грубообломочного материала, большая скорость течения, низкая температура воды и слабая заселённость людьми прилегающей местности предопределяют и относительно невысокое содержание метана здесь — не более $5,0\text{--}6,0 \text{ мкл} \cdot \text{л}^{-1}$ (около $223,2\text{--}267,8 \text{ нмоль} \cdot \text{л}^{-1}$) [8]. В то же время диапазоны средних значений концентраций метана в зоне смешения морских и речных вод реки Чёрная (Крым) составляют $411\text{--}1132 \text{ нмоль} \cdot \text{л}^{-1}$ [4].

Результаты двухлетнего мониторинга реки Дунай показывают, что медианная концентрация метана в воде составляла $330 \text{ нмоль} \cdot \text{л}^{-1}$, а медианные диффузные потоки CH_4 достигали $370 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2}$ в сутки. При этом максимальные значения потоков наблюдались в каналах (до $1100 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2}$ в сутки). Исследованием определено, что примерно 70 % от общего потока CH_4 приходилось на пузырьковую разгрузку в дельтовых озёрах и каналах [11].

Таким образом проанализировав региональные закономерности диапазонов концентрации и потоков метана в исследованных речных системах, можно отметить высокую степень вариабельности этих параметров и существенную недоизученность вопроса, особенно для горных рек российского сектора Черноморского региона.

Методы проведения исследований. В 2025 г. выполнены газогеохимические исследования в районе федеральной территории «Сириус». В ходе полевых изысканий получены концентрации CH_4 в воде и атмосфере, а также потоки на границе вода — атмосфера в реке Мзымта. Схема расположения точек пробоотбора приведена на рис. 1.



Рис. 1. Обзорная схема района исследований с расположением станций пробоотбора

Пробы приземной атмосферы отбирались в герметичные пенициллиновые флаконы объёмом 12 мл. Пробы воды отбирались в герметичные стеклянные ёмкости объёмом 68 мл.

Газовый анализ проб проведён в Международном научном центре в области экологии и вопросов изменения климата в Научно-технологическом университете «Сириус».

Анализ извлечённых проб газа осуществлялся методом газовой хроматографии на газовом хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000». Нижний предел детектирования по метану — 10^{-6} %. Относительная погрешность измерений не превышала 3 %.

Всего в рамках исследований отобрано и проанализировано 137 проб воды и атмосферы.

Определение концентраций метана ($\text{нмоль} \cdot \text{л}^{-1}$), растворённого в пробах воды, производилось с использованием расчётных констант растворимости метана [9, 10].

Поток метана ($\text{мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$) в системе вода — атмосфера был рассчитан для каждой точки отбора проб по данным концентраций растворённого метана, температуры и солёности (минерализации) в поверхностном слое воды, содержания метана в приводном слое атмосферы, а также скоростям ветра на момент отбора проб:

$$F = k\Delta C,$$

где k — коэффициент газообмена ($\text{см} \cdot \text{ч}^{-1}$);

$\Delta C = (C - C^*)$ — разность между концентрацией растворённого метана (C , $\text{нмоль} \cdot \text{л}^{-1}$) и равновесной с атмосферой концентрацией метана (C^* , $\text{нмоль} \cdot \text{л}^{-1}$).

Стоит отметить следующее: так как для водных объектов суши не имеется установленных градиентов интенсивности потока метана ($\text{мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$), рассчитанные данные анализировались согласно методической работе [12].

Результаты исследований. Результаты годичного мониторинга выявили пространственно-временную неоднородность концентраций и потоков метана:

- Наименьшие медианные значения концентраций и потоков метана обнаружены в точке отбора в морской прибрежной акватории, M1 (пирс), — $15,72 \text{ нмоль} \cdot \text{л}^{-1}$ и $2,1 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ соответственно (рис. 2, 3). Впоследствии эти значения были приняты в качестве фоновых концентраций для настоящего исследования.

- Наиболее высокие концентрации метана в воде ($526,12\text{--}1077,35\text{ нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$, $0,8\text{--}1,7\text{ ПДК}$) и ураганные потоки (медиана — $249,6\text{ мкмоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$) зафиксированы в водах обводного канала Имеретинской низменности (точка Мз_л), вбирающего в себя поверхностные стоки с федеральной территории «Сириус» и впадающего в устьевую левобережную часть реки Мзымта (точка МЗ, см. рис. 1).

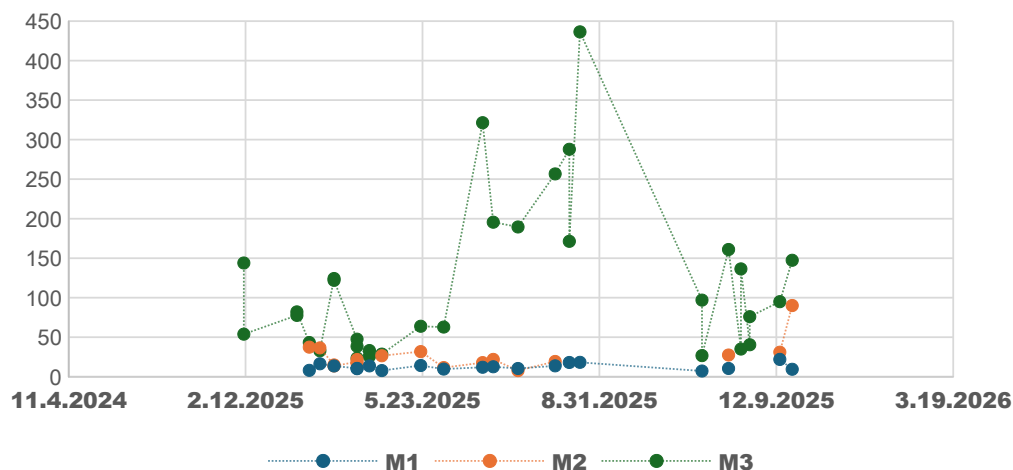


Рис. 2. Концентрации CH_4 в воде ($\text{нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$) по данным годового мониторинга федеральной территории «Сириус». М1 — первая точка пробоотбора (пирс); М2 — вторая точка (пляж «Сочифорния»); М3 — третья точка (устьевая часть реки Мзымта)

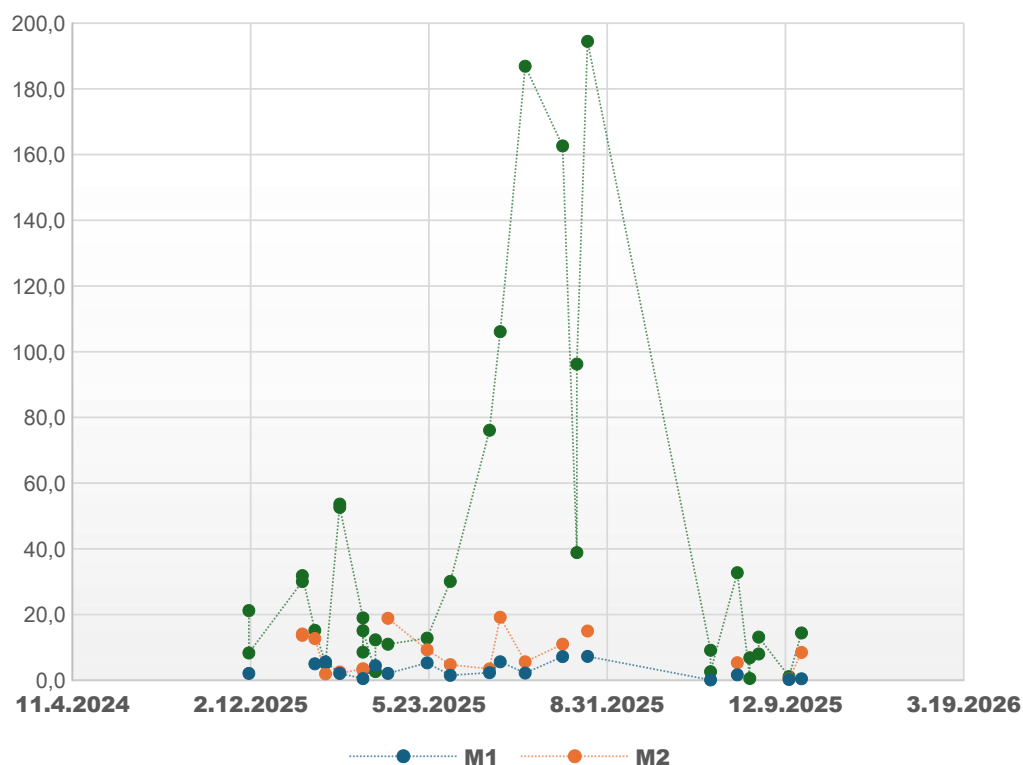


Рис. 3. Потоки CH_4 ($\text{мкмоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сутки}^{-1}$) в системе вода — атмосфера по данным годового мониторинга федеральной территории «Сириус». М1 — первая точка пробоотбора (пирс); М2 — вторая точка (пляж «Сочифорния»); М3 — третья точка (устьевая часть реки Мзымта)

Из трёх точек отбора точка М3 (устье реки Мзымта) имела наибольшие значения концентраций и потоков метана на протяжении всего года наблюдения. Медианные значения — $80 \text{ нмоль} \cdot \text{л}^{-1}$ и $15,2 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ соответственно.

В речных пробах, отобранных выше по течению реки, в точке Мз4, выявлены более высокие медианные концентрации ($81,9 \text{ нмоль} \cdot \text{л}^{-1}$) и высокоинтенсивные потоки метана ($17,1 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$), чем в пробах из точки Мз5 ($56,7 \text{ нмоль} \cdot \text{л}^{-1}$ и $8,9 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$). Это свидетельствует о влиянии локальных источников в левой части русла реки.

В морской приустьевой части реки Мзымта (в пределах 200 м от устья) медианные концентрации метана варьировали от $33,4$ до $40,9 \text{ нмоль} \cdot \text{л}^{-1}$, а умеренно-среднеинтенсивные потоки метана — от $2,6$ до $5,3 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$. При этом вариации максимальных значений концентраций и потоков метана зависели от гидрометеорологической обстановки в день отбора проб и от характера площадного распространения речного плюма, что подтверждалось существенным распреснением прибрежной акватории.

Концентрации метана в приземном слое атмосферы, измеренные на всех точках отбора, варьировали в узком диапазоне, $2,0$ – $2,1 \text{ ppm}$ (рис. 4). Эти значения превышают среднегодовые мировые значения для 2025 г., однако достаточно характерны для развитых урбанизированных территорий.

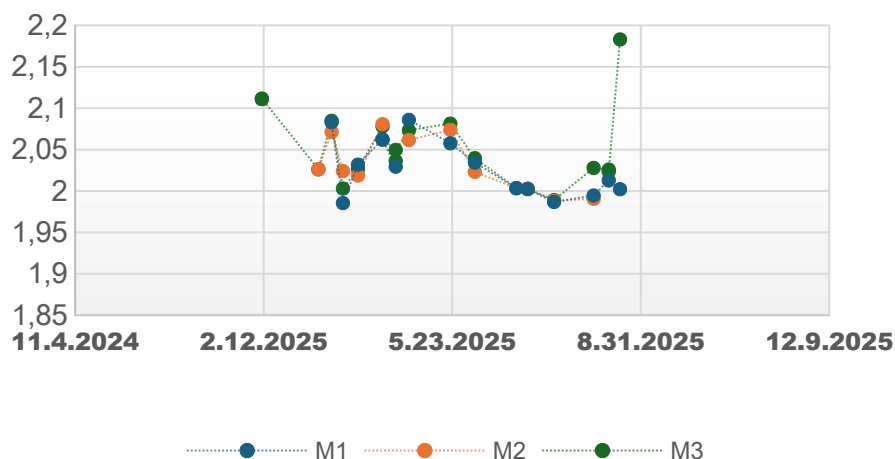


Рис. 4. Концентрации CH_4 (ppm) в приземной атмосфере по данным годового мониторинга федеральной территории «Сириус». M1 — первая точка пробоотбора (пирс); M2 — вторая точка (пляж «Сочифорния»); M3 — третья точка (устьевая часть реки Мзымта)

Закключение. По результатам настоящего исследования можно сделать следующие выводы:

1. Концентрация и эмиссия метана в реке Мзымта значительно варьируют по сезонам, с максимумом в летне-осенний период (август — октябрь 2025 г.), что связано, вероятно, с увеличением рекреационной нагрузки в районе Большого Сочи.
2. Содержание метана в реке характеризуется более высокими уровнями, чем содержание в морской акватории, особенно в летний сезон, что указывает на значительный вклад речного стока в поступление и последующую эмиссию метана в приустьевых участках реки Мзымта.
3. Наблюдается пространственная внутрирусловая неоднородность распределения метана: левая часть потока реки Мзымта имеет более высокие концентрации, чем правая. Это может быть связано как с особенностями гидродинамики, так и с влиянием локальных источников поступления метана в водный объект.
4. Речные воды нижнего течения и эстуарной части реки Мзымта являются «горячей точкой» с эмиссией метана в атмосферу в течение всего года, что характеризует современный уровень антропогенной нагрузки на этот водный объект. Особый интерес в последующих работах представляет изучение распределения метана в высокогорных участках верхнего течения реки (с минимальным уровнем антропогенной нагрузки). Это позволит уточнить современное природное фоновое содержание метана в горных реках Большого Сочи и кавказского побережья.

Работа выполнена на базе Международного научного центра в области экологии и вопросов изменения климата Университета «Сириус» в рамках проекта РНФ № 25-17-20030 «Газогеохимические исследования в системе река — море северо-восточной части Черноморского региона в контексте современных климатических изменений».

Список использованных источников

1. РД 52.24.512-2012. Объёмная концентрация метана в водах. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов-на-Дону, 2012. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293773/4293773631.htm> [дата обращения: 02.04.2026].
2. Обжиров А. И. Газогеохимические поля придонного слоя морей и океанов. Москва : Наука, 1993. 139 с. <https://elibrary.ru/uoclex>
3. Мишукова Г. И., Обжиров А. И., Мишуков В. Ф. Метан в пресных и морских водах и его потоки на границе вода – атмосфера в Дальневосточном регионе. Владивосток : Дальнаука, 2007. 159 с. <https://elibrary.ru/tsjecq>
4. Малахова Т. В., Будников А. А., Иванова И. Н., Мурашова А. И. Сезонные и суточные закономерности содержания и потоков метана в эстуарии реки Чёрной (Крым) // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2022. № 6. С. 27–39. <https://elibrary.ru/crmazn>
5. Маккавеев П. Н., Полухин А. А., Степанова С. В. Работы по изучению приустьевых областей малых и средних рек в прибрежной зоне российского сектора Чёрного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2013. № 27. С. 412–417. <https://elibrary.ru/vbfsjp>
6. Маккавеев П. Н., Завьялов П. О. Сток малых и средних рек российского побережья Чёрного моря и его влияние на характеристики вод // Система Чёрного моря. Москва : Научный мир, 2018. С. 287–321. <https://elibrary.ru/thxbyz>
7. ГОСТ 31371.3-2009. Газ природный. Определение состава методом газовой хроматографии с оценкой неопределённости. Часть 3. Определение водорода, гелия, кислорода, азота, диоксида углерода и углеводородов до C8 с использованием двух насадочных колонок. Москва : Стандартинформ, 2009. 16 с.
8. Гарькуша Д. Н., Фёдоров Ю. А. Роль минерализации (солёности) и ионного состава вод в формировании концентраций метана в водных экосистемах // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 1–2 (103). С. 6–16. <https://doi.org/10.23670/irj.2021.103.1.027>
9. Yamamoto S., Alcauskas J. B., Crozier T. E. Solubility of methane in distilled water and sea water. Journal of Chemical & Engineering Data, 1976, vol. 21, iss. 1, pp. 78–80. <https://doi.org/10.1021/je60068a029>
10. Wiesenburg D. A., Guinasso N. L., Jr. Equilibrium solubility of methane, carbon monoxide, and hydrogen in water and sea water. Journal of Chemical & Engineering Data, 1979, vol. 24, iss. 4, pp. 356–360. <https://doi.org/10.1021/je60083a006>
11. Teodoru C. Spatio-temporal variations of lateral and atmospheric carbon fluxes from the Danube Delta. 2020. <https://doi.org/10.5194/bg-2020-197>
12. Mishukova G. I., Yatsuk A. V., Shakirov R. B. Distribution of methane fluxes on the water–atmosphere interface in different regions of the World Ocean. Geosistemy perekhodnykh zon, 2021, vol. 5, no. 3, pp. 240–254. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.3.240-247.247-254>
13. Izhitskaya E. S., Egorov A. V., Izhitskiy A. S., Möller O. O., Jr., Zavialov P. O. Dissolved methane in coastal waters of the northeastern Black Sea. Water, 2022, vol. 14, iss. 5, art. 732 (16 p.). <https://doi.org/10.3390/w14050732>

УДК 550.4

Сравнительный анализ концентрации тяжёлых металлов в истоках рек Баксан и Черек

Курашева О. А.

Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия

✉ oks.anchik@mail.ru

Проведён анализ содержания тяжёлых металлов в пробах речных вод ледникового питания у истоков на примере рек Баксан и Черек. Определены концентрации тяжёлых металлов (Mn, Pb, Mo, Cr, Ni, Zn и Cu) за 2018–2021 гг.

Ключевые слова: река Черек Безенгийский, река Баксан, тяжёлые металлы

Определены концентрации тяжёлых металлов в речных водах ледникового питания Азау, Гарабаши и Терскол, формирующих исток реки Баксан (южный сектор оледенения Эльбрусского вулканического центра), а также в пробах речных вод у истоков реки Черек Безенгийский, формирующих исток реки Черек (ледник Безенги).

Сравнительный анализ полученных данных с материалом из литературных источников выявил, что за период с 1999 по 2021 г. наиболее высокие концентрации Mn (до $52,14 \text{ мкг} \cdot \text{дм}^{-3}$) зафиксированы в реке Азау в 2002 г. Вероятно, это связано с тем, что Mn относится к породообразующим минералам Эльбрусского вулканического центра [2]. В пробах речных вод Терскол и Азау встречаются пятикратные превышения ПДК за 2001 и 2002 гг. В остальные годы концентрации Mn находятся в пределах одного порядка.

Максимальные концентрации Pb выявлены в пробах речных вод Гарабаши за 2004 г. Содержание Mo в речных водах часто превышает ПДК. Максимальные концентрации Mo обнаружены в реке Терскол за 1999 г. (до 10 ПДК). Поступление Mo в реки, вероятно, связано с вымыванием морен, обогащённых вулканической деятельностью, талыми водами и осадками. Концентрации Cr в пробах речных вод оказались ниже ПДК. В серии проб 2018–2021 гг. значения для Cr не достигали ПДК, тогда как значения для Ni приближались к ПДК. Максимальное содержание Ni, до $2,74 \text{ мкг} \cdot \text{дм}^{-3}$, зарегистрировано для реки Азау в 2010 г. [1, 3].

Речные воды бассейна реки Черек Безенгийский характеризуются высоким содержанием Mn, Zn и Cu. Однако вниз по течению, на расстоянии 5–7 км от языков ледников Безенги и Мижирги, в реке Черек Безенгийский концентрации Mn и Zn существенно не превышают ПДК. Вероятно, взвеси, содержащие в талых водах эти тяжёлые металлы, выпадают в осадок; кроме того, их концентрации в водах ледникового стока несколько разбавляются родниковыми, подземными водами и атмосферными осадками. Содержание ряда тяжёлых металлов в реке Черек Безенгийский (Cr, Ni и Mo) не достигает ПДК.

Согласно полученным результатам, концентрации тяжёлых металлов в речных водах ледникового питания на один-два порядка ниже ПДК, и эти воды могут быть использованы для нужд рыбного хозяйства (в данном случае все рассуждения о ПДК касаются вод водоёмов рыбохозяйственного значения).

Список использованных источников

1. Керимов А. М., Курашева О. А. Сравнительный анализ концентраций тяжёлых металлов в истоках реки Баксан и леднике Гарабаши (южный склон Эльбруса) // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2018. Т. 12, № 1. С. 49–56. <https://elibrary.ru/urpbmy>

2. Новейший и современный вулканизм на территории России / Н. П. Лаверов, Н. Л. Добрецов, О. А. Богатиков [и др.]. Москва : Наука, 2005. 604 с. <https://elibrary.ru/uljdyr>
3. Kerimov A. M., Kurasheva O. A. Peculiarities of formation of the chemical composition of Caucasian glacier-fed rivers during intensive degradation of glaciers. Russian Meteorology and Hydrology, 2023, vol. 48, no. 2, pp. 147–154. <https://doi.org/10.3103/s1068373923020073>

УДК 911.2:528.8

Среднемасштабное ландшафтное картографирование бассейнов горных рек на основе полевых данных и спутниковых изображений: опыт исследования Северо-Восточного Кавказа, Азербайджана и Ирана

Кучинская И. Я.¹, Керимова Э. Д.¹, Атаев З. В.^{2,3,4}, Абдулаев К. А.⁵, Гюльмагомедов А. М.³

¹Институт географии Министерства науки и образования Республики Азербайджан, Баку, Азербайджан

²Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН, Махачкала, Россия

³Дагестанский государственный педагогический университет имени Р. Гамзатова, Махачкала, Россия

⁴Кабардино-Балкарский научный центр РАН, Нальчик, Россия

⁵Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

✉ irina.danula@gmail.com

Обобщены результаты среднемасштабного ландшафтного картографирования восьми ключевых бассейнов горных рек трансграничного региона Северо-Восточный Кавказ — Азербайджан — Северный Иран. На основе интеграции полевых исследований 2024–2025 гг., дешифрирования спутниковых изображений Landsat-8/9 и Sentinel-2, анализа ЦМР SRTM и ГИС-обработки построены сопоставимые карты масштаба 1 : 500 000 по единой легенде. Выделены 2 класса, 6 типов и 28 родов ландшафтов, отражающих высотную поясность, барьерный эффект орографии и степень антропогенной трансформации. Показано, что унифицированный картографический подход позволяет корректно сопоставлять бассейны, разделённые государственными границами и различающиеся по увлажнению, рельефу и структуре природопользования. Созданные карты рассматриваются как базовая основа для геоэкологического мониторинга, оценки экосистемных услуг и трансграничного управления водными и биологическими ресурсами.

Ключевые слова: ландшафтное картографирование, горная река, полевые исследования, дистанционное зондирование Земли, ГИС, Северо-Восточный Кавказ, Азербайджан, Иран

Горные речные бассейны Северо-Восточного Кавказа, Азербайджана и Северного Ирана относятся к числу наиболее контрастных природно-территориальных систем Западного и Южного Прикаспия. На сравнительно небольшом пространстве здесь сочетаются высокогорья, среднегорья, низкогорья, предгорные и приморские низменности, что определяет резкую смену тепловлагообеспеченности, высотной поясности и форм природопользования. Вместе с тем существующие национальные ландшафтные карты России, Азербайджана и Ирана разномасштабны, созданы по разным классификационным схемам и плохо сопоставимы на межгосударственных границах [1, 4, 7].

Это особенно затрудняет геоэкологический анализ трансграничных бассейнов, оценку реакции геосистем на современное изменение климата, а также разработку согласованных мер в сфере управления водными ресурсами и охраны природных комплексов. Поэтому одной из ключевых задач проекта стало создание серии сопоставимых среднемасштабных ландшафтных карт для всего региона исследования.

Цель работы — разработка и апробация унифицированного подхода к среднемасштабному ландшафтному картографированию бассейнов горных рек на основе полевых данных, дистанционного зондирования и ГИС-анализа, а также оценка его возможностей для межрегиональных и трансграничных сопоставлений.

Материал и методы. Исследование охватило восемь ключевых бассейнов: на Северо-Восточном Кавказе — Сулак, Шура-озень, Уллучай и Самур; в Азербайджане — Гарачай и Атачай; в Иране — Хераз и Горган. Полевой этап 2024–2025 гг. включал маршрутные исследования общей протяжённостью более 3000 км, описание 87 ключевых ландшафтных фаций, отбор проб почв, растительности, воды и донных отложений в русловых, предгорных и дельтовых сегментах бассейнов [5, 6].

Камеральная обработка базировалась на дешифрировании спутниковых изображений Landsat-8/9 и Sentinel-2 с пространственным разрешением 10–30 м; в отдельных случаях использовались материалы MODIS для оценки сезонной контрастности покрова. Морфометрическая основа формировалась по цифровой модели рельефа SRTM с разрешением 30 м. Основные операции выполнялись в среде ArcGIS Pro 3.1 — классификация снимков, визуальное дешифрирование, геоморфометрический анализ и построение ландшафтных карт масштаба 1 : 500 000.

Методологической основой работы послужила классификация ландшафтов Н. Л. Беручашвили, адаптированная для горных территорий и использованная в логике «класс — тип (подтип) — род» [3]. Для иранских бассейнов, где полевой этап был ограничен, ландшафтная интерпретация дополнительно опиралась на опубликованные гидроклиматические и картографические материалы [8–10]. Принципиально важным элементом методики стала унификация легенды: одни и те же типологические категории применялись ко всем бассейнам, что сделало возможным их прямое сравнение.

Результаты и обсуждение. В результате проведённой работы создана серия из восьми сопоставимых среднемасштабных ландшафтных карт. По единой легенде на исследованной территории выделены 2 класса, 6 типов и 28 родов ландшафтов. Наиболее общий уровень дифференциации представлен двумя классами — горными и равнинно-предгорно-холмистыми ландшафтами (рис. 1). В пределах этих классов прослеживается полный набор высотных и зональных переходов — от гляциально-нивальных и высокогорно-луговых комплексов до лесных, лесостепных, степных, полупустынных и гидроморфных дельтово-пойменных комплексов [5, 6].

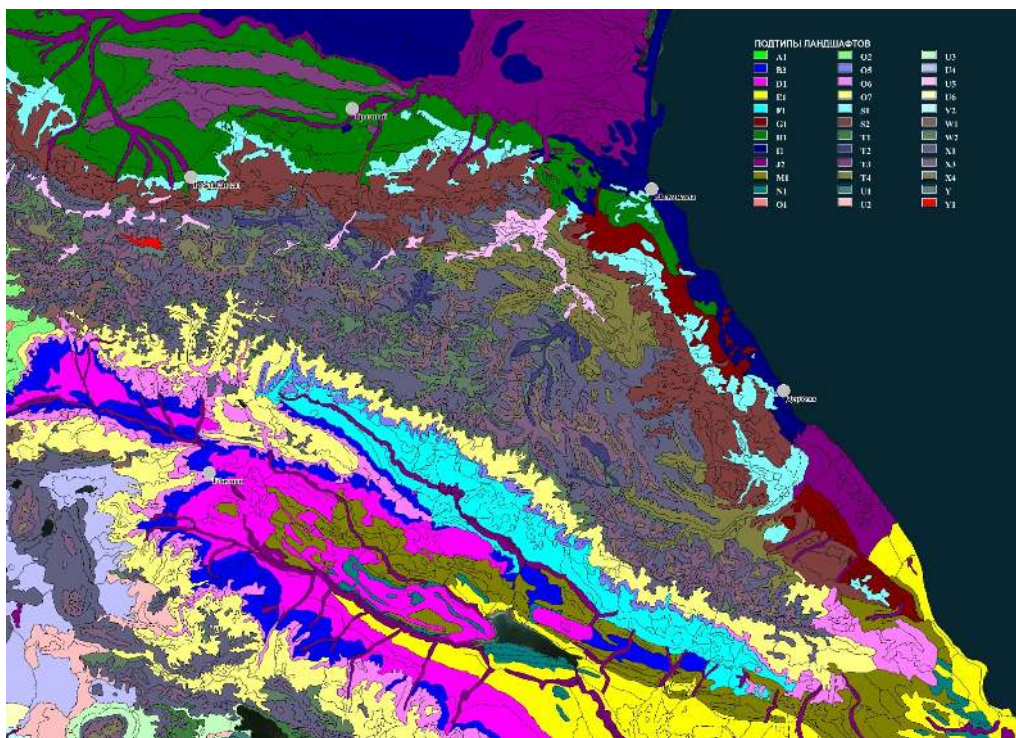


Рис. 1. Ландшафтная карта Северо-Восточного Кавказа и северного Азербайджана (подтипы ландшафтов)

Условные обозначения: Подтипы ландшафтов (A1–Y1):

I. РАВНИННЫЕ И ПРЕДГОРНО-ХОЛМИСТЫЕ ЛАНДШАФТЫ

A. Равнинные и предгорно-холмистые субтропические гумидные

A1. Колхидские лесные

B. Равнинные и холмистые субсредиземноморские семигумидные

B3. Переходные к теплоумеренным семигумидные лесные и шибляковые

C. Средиземноморские

C1. Предгорно-холмистые субтропические северные средиземноморские понтийские

C2. Междорно-равнинные субтропические средиземноморские южнотурецкие

D. Равнинные и холмистые субтропические семиаридные

D1. Степные, шибляковые и полупустынные восточно-грузинские

E. Равнинные и холмистые субтропические аридные

E1. Пустынные и полупустынные северные субтропические

F. Равнинные теплоумеренные семигумидные

F1. Переходные к субтропическим, лесные

G. Равнинные и холмистые теплоумеренные и умеренные семигумидные и семиаридные

G1. Лугостепные, луговые, кустарниковые и лесостепные северокавказские семигумидные

H. Равнинные и холмистые теплоумеренные и умеренные семиаридные

H1. Степные северокавказские семиаридные

I. Равнинные умеренные аридные

I1. Пустынные и полупустынные северокаспийские

J. Гидроморфные и субгидроморфные

J2. Дельтовые и пойменные

II. ГОРНЫЕ ЛАНДШАФТЫ

M. Горные субтропические семиаридные

M1. Низкогорные степные, шибляковые, аридно-редколесные

N. Горные субтропические аридные

N1. Низкогорные полупустынные и пустынные восточнокавказские

O. Горные теплоумеренные гумидные

O1. Нижнегорно-лесные колхидские

O2. Среднегорно-лесные колхидские

O5. Нижнегорно-лесные кахетинские

O6. Переходные к семигумидным, нижнегорно-лесные юго-восточно-кавказские

O7. Среднегорно-лесные юго-восточно-кавказские

S. Горные умеренные, гумидные

S1. Нижнегорно-лесные

S2. Среднегорно-лесные

T. Горные умеренные семигумидные

T1. Переходные к теплоумеренным среднегорные шибляковые, аридно-редколесные, фригановые, лугостепные южнокавказские

T2. Переходные к теплоумеренным горно-котловинные с дубовыми лесами, лугостепными, степными, шибляком и фригановые северокавказские

T3. Низкогорные лесные, лесокустарниковые, луговые и степные северокавказские

T4. Среднегорные луговые, степные, лугостепные, шибляковые и фригановые северокавказские

U. Горные умеренные семиаридные

U1. Переходные к теплоумеренным горно-котловинные степные, лугостепные, фригановые и шибляковые

U2. Переходные к теплоумеренным, среднегорные степные и шибляковые армянские

U3. Переходные к горно-луговым, высокогорные степные и луговые армянские

U4. Плато со степной и лугостепной растительностью джавахето-армянские

U5. Горно-котловинные степные и шибляковые северокавказские

U6. Нагорья, плато и среднегорья степные анатолийские

V. Горные умеренные, аридные

V2. Горно-котловинные, пустынные араратские

W. Горные холодноумеренные

W1. Среднегорные темнохвойные лесные кавказские

W2. Верхнегорные лесные сосновые и берёзовые кавказские

X. Высокогорные луговые

X1. Высокогорные субальпийские лесокустарниково-луговые

X3. Высокогорные альпийские кустарниково-луговые

X4. Высокогорные субнивальные

Y. Гляциально-нивальные

Y1. Ледники

Унификация легенды позволила преодолеть главное методическое ограничение прежних национальных схем — их несопоставимость по масштабам, таксономии и принципам выделения природно-территориальных комплексов. Вместо набора разрозненных картографических материалов получена единая пространственная модель региона, в которой различия между бассейнами объясняются уже не особенностями картографической традиции, а реальными природными контрастами (табл. 1).

Как видно из данных табл. 1, серия карт охватывает не только разные размеры и морфологические типы бассейнов, но и весь спектр ландшафтных градиентов исследуемого пространства. Сулак представляет собой крупнейший и наиболее полно выраженный вариант восточнокавказской высотной поясности. Шура-озень демонстрирует редкую для Кавказа концентрацию ландшафтных контрастов на коротком расстоянии — от лугово-лесных и лесостепных склонов Гимринского хребта до эолового массива Сарыкум. Уллучай фиксирует сочетание среднегорных и приморских сухих ландшафтов Южного Дагестана. Самур является наиболее ярким примером единства высокогорного и дельтового звеньев в одном трансграничном бассейне [2].

Азербайджанские бассейны Гарачай и Атачай важны как автономные прикаспийские системы северного макросклона Юго-Восточного Кавказа. Они показывают, что даже сравнительно небольшие водосборы обладают собственным набором предгорных и прибрежных ландшафтных сочетаний, которые не могут быть механически сведены к дагестанским аналогам. Иранские бассейны Хераз и Горган, напротив, задают наиболее контрастный межрегиональный фон: первый связан с влажным северным склоном Эльбурса и с гирканскими лесами, а второй — с бассейном «дождевой тени», где аридные и семиаридные комплексы формируются уже в средней и нижней частях водосбора [8–10].

Таблица 1. Сравнительная характеристика исследованных бассейнов и ключевых ландшафтных контрастов

Бассейн	Регион	Картографическая специфика	Ключевой ландшафтный контраст
Сулак	Россия, Дагестан	Крупнейший бассейн региона; наиболее полный спектр высотной поясности; 28 родов ландшафтов	Гляциально-нивальные и высокогорно-луговые комплексы верховий — межгорные ксерофитные котловины — аридные низовья и дельта
Шура-озень	Россия, Дагестан	Малый, но очень контрастный бассейн; выделено 9 родов ландшафтов	Горно-лесные и лесостепные комплексы верховий — полупустынные и эоловые ландшафты Сарыкума и Приморской низменности
Уллучай	Россия, Дагестан	Средний по площади бассейн Южного Дагестана; высокая доля горной части; выраженная связь ландшафтов с литологией и расчленением рельефа	Семигумидные лесо- и лугостепные комплексы верхних частей — сухие предгорные и приморские комплексы нижнего звена
Самур	Россия — Азербайджан	Трансграничный бассейн с пятью высотными типами ландшафтов и с уникальным дельтовым кластером	Высокогорные гляциальные и луговые комплексы — гумидные леса среднегорий — дельта с реликтовым лиановым лесом
Гарачай	Азербайджан	Автономный прикаспийский бассейн Юго-Восточного Кавказа; выраженная каньонно-предгорная расчленённость	Горные и предгорные семигумидные комплексы — аридные и полупустынные низовья прикаспийской полосы
Атачай	Азербайджан	Компактный бассейн с небольшими размерами и выраженным дождевым типом питания	Горные денудационные комплексы истоков — прибрежные аридные и агроиригационные ландшафты низовий
Хераз	Иран, Эльбурс	Бассейн северного склона Центрального Эльбурса; влияние вулканогенных форм Демавенда и гирканского лесного пояса	Нивально-вулканогенные высокогорья — гумидные субтропические леса — интенсивно освоенные предгорья и низменности
Горган	Иран, восточный Эльбурс	Переходный водосбор восточного сектора Прикаспия; высокая степень аграрной трансформации предгорий и низовий	Относительно влажные горные комплексы — сухие степные и полупустынные ландшафты бассейна «дождевой тени»

Сопоставление построенных карт позволило установить несколько устойчивых пространственных закономерностей. Во-первых, решающую роль в распределении ландшафтов играет орография. На наветренных склонах, обращённых к влагоносным потокам Каспия, гумидные и семигумидные ландшафты сохраняются до высот 2000–2500 м. На подветренных склонах и в межгорных котловинах Восточного Кавказа семиаридные и аридные комплексы начинают доминировать уже с высот 500–800 м. Наиболее наглядно этот эффект проявляется при сопоставлении Хераза и Горгана, а также горных и предгорных сегментов Сулака, Шура-озени и Самура.

Во-вторых, во всех бассейнах наиболее сильно трансформированы нижние и предгорные части, где сосредоточены земледелие, сады, селитебные зоны, транспортная и оросительная инфраструктура. Для дагестанских бассейнов это выражается в распашке и фрагментации предгорных степных и лесостепных комплексов, для иранских — в расширении пашни и в интенсивном хозяйственном освоении низовий. При этом наиболее чувствительными к нарушениям оказываются пойменно-дельтовые и лесные комплексы, зависящие от устойчивого гидрологического режима. Особенно показательна в этом отношении дельта Самура, где спутниковый анализ фиксирует сокращение площади реликтового лианового леса на фоне изменения водного режима и хозяйственного давления [2, 6].

В-третьих, построенные карты показали высокую продуктивность сочетания бассейнового подхода и ландшафтно-типологической легенды. Для трансграничного региона это означает возможность перехода от разрозненных национальных описаний к единой пространственной базе, пригодной для мониторинга деградации земель, оценки экосистемных услуг и разработки совместных природоохранных решений. Тем самым среднемасштабное ландшафтное картографирование выступает не только как инвентаризационный, но и как прикладной геоэкологический инструмент.

Заключение. Проведённое исследование продемонстрировало, что унифицированный подход к среднемасштабному ландшафтному картографированию бассейнов горных рек, основанный на интеграции полевых наблюдений, данных дистанционного зондирования и ГИС-анализа, обеспечивает сопоставимое отображение природной структуры трансграничного региона Северо-Восточный Кавказ — Азербайджан — Северный Иран. Для восьми ключевых бассейнов создана серия карт масштаба 1 : 500 000, выполненных по единой легенде, что позволяет перейти от разрозненных национальных схем к единой региональной картографической основе. Полученные материалы подтверждают, что ведущими факторами ландшафтной дифференциации выступают высотная поясность, барьерный эффект орографии и степень антропогенной трансформации предгорных и нижних звеньев бассейнов. Созданные карты могут использоваться как базовый информационный ресурс для геоэкологического мониторинга, оценки устойчивости ландшафтов, анализа экосистемных услуг и разработки согласованных решений в сфере трансграничного управления водными и биологическими ресурсами.

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. Атаев З. В. Ландшафты Предгорного Дагестана и вопросы их агрохозяйственной оптимизации : автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Ростов-на-Дону, 2002. 27 с.
2. Атаев З. В. Ландшафтное разнообразие и геоэкологическое состояние бассейна реки Самур на Восточном Кавказе // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2025. № 2 (101). С. 63–68. <https://elibrary.ru/eqzhhi>
3. Беручашвили Н. Л. Объяснительная записка к ландшафтной карте Кавказа. Тбилиси : Изд-во ТГУ, 1980. 54 с.
4. Будагов Б. А. Современные ландшафты Азербайджана. Баку : Элм, 1988. 234 с.
5. Итоговый отчёт по НИР «Проведение научно-исследовательских работ по ландшафтному картографированию бассейнов малых и средних горных рек водосбора Каспийского моря на территории России (Республики Дагестан) и Азербайджана». Махачкала, 2024. 227 с.
6. Итоговый отчёт по НИР «Динамика геоэкологического состояния бассейнов горных рек Северо-Восточного Кавказа, Азербайджана и Ирана в условиях изменения климата и растущей антропогенной нагрузки». Грозный, 2025. 345 с.

7. Кучинская И. Я. Ландшафтно-экологическая дифференциация горных геосистем (на примере северного склона Юго-Восточного Кавказа). Баку : Институт географии имени Г. А. Алиева НАН Азербайджана, 2011. 196 с.
8. Emlaei Z., Pourebrahim S., Heidari H., Lee K. E. The impact of climate change as well as land-use and land-cover changes on water yield services in Haraz basin. Sustainability, 2022, vol. 14, iss. 13, art. 7578 (17 p.). <https://doi.org/10.3390/su14137578>
9. Pirnia A., Darabi H., Choubin B., Omidvar E., Onyutha C., Haghighi A. T. Contribution of climatic variability and human activities to stream flow changes in the Haraz River basin, northern Iran. Journal of Hydro-environment Research, 2019, vol. 25, pp. 12–24. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2019.05.001>
10. Yaghoobi M., Fathi A., Fazli S., Li W., Haghshenas E., Kuchak V. S., El-Askary H. Impact of land use dynamics on the water yields in the Gorgan river basin. Heliyon, 2024, vol. 10, iss. 16, art. e35674 (20 p.). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35674>

УДК 504.064.36

Изучение экосистемных параметров потоков парниковых газов и их сезонной динамики в антропогенно изменённых и природных экосистемах Чеченской Республики

Мамадиев Н. А.

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

✉ justemail552@mail.ru

Представлены результаты исследований потоков парниковых газов в природных и нарушенных экосистемах Чеченской Республики в условиях изменения климата, вызванного повышением концентраций парниковых газов в атмосфере. Экспериментальный материал получен в результате наблюдений за потоками парниковых газов и тепла на основе методики турбулентных пульсаций (eddy covariance) и с использованием мобильного почвенного газоанализатора G4301. Цель исследования состояла в получении количественных оценок потоков углерода, тепла и влаги в травянистой и лесной экосистеме Равнинной Чечни, а также в выявлении факторов, влияющих на изменчивость потоков. Комплексные полевые работы выполнены на рекультивированном участке бывшей свалки твёрдых бытовых отходов «Карбоновая ферма» (травянистая экосистема с саженцами деревьев) и в смешанном лесу на участке «Черноречье» (дуб, клён и ясень), а также на территории Ханкальской геотермальной станции. В основу анализа положены результаты непрерывных измерений: на участке «Карбоновая ферма» — с 01.11.2022 по настоящее время; на участке «Черноречье» — с 16.06.2023 по н. в. Данные измерений почвенного дыхания на Ханкальской геотермальной станции получены в 2023 г.

Ключевые слова: парниковые газы, потоки, Карбоновая ферма, Черноречье, природные и нарушенные экосистемы

Проблема глобального климатического изменения занимает одну из ведущих позиций в современной научной дискуссии, что обусловлено её значительным воздействием на экологические системы и социально-экономические процессы. Согласно данным Межправительственной группы экспертов по изменению климата, средняя температура поверхности Земли за период с 1850 по 2020 г. увеличилась примерно на 1,1 °C, причём основной вклад в потепление внесла антропогенная деятельность, связанная преимущественно со сжиганием ископаемого топлива, изменением землепользования и промышленными процессами [10]. Одновременно наблюдается значительное повышение частоты и интенсивности экстремальных метеорологических явлений, что свидетельствует о существенных сдвигах в климатической системе планеты и об усугублении воздействия антропогенных факторов [8, 15]. Основной причиной изменения климата на современном этапе признаётся увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере, прежде всего диоксида углерода (CO₂), метана (CH₄) и закиси азота (N₂O). Концентрация CO₂ в атмосфере возросла примерно с 280 ppm на доиндустриальном уровне до более чем 415 ppm в 2021 г., и это беспрецедентное увеличение за последние 800 тысяч лет [7]. Метан обладает в 28–34 раза большим потенциалом глобального потепления, чем CO₂, в столетней перспективе; кроме того, он демонстрирует устойчивый рост концентраций: его уровень уже приблизился к 1900 ppb [14].

Наземные экосистемы играют ключевую роль в глобальном углеродном цикле, являясь значительными резервуарами углерода и активными участниками его обмена с атмосферой. Леса, занимающие около 30 % площади суши, содержат приблизительно 45 % всего наземного углерода и ежегодно поглощают около (2,6 ± 0,7) Гт С, что составляет примерно 30 % антропогенных выбросов CO₂ [7, 12]. При этом леса различных типов вносят неравномерный вклад в углеродный баланс: тропические леса содержат около 40–50 % лесного углерода, бореальные — примерно 30 %, а леса умеренной зоны — около 20 % [12]. Важно отметить, что леса накапливают углерод как в живой биомассе (стволы, ветви, листья и корни), так и в мёртвом органическом веществе и лесных почвах, причём на почвенный углерод может приходиться до 50–70 % общих лесных запасов [6].

Почвы наземных экосистем аккумулируют около 1500–2400 ГтС в верхнем метровом слое, что в 2–3 раза превышает его содержание в атмосфере (примерно 830 ГтС) и делает почвенный пул углерода чрезвычайно важным компонентом климатической системы [2, 11]. Органический углерод почв распределён неравномерно по глубине профиля: почти 50 % сосредоточено в верхних 20–30 см, однако значительные запасы находятся и в более глубоких горизонтах [11]. Скорость оборота почвенного углерода варьирует от нескольких лет для лабильных фракций до сотен и тысяч лет для стабилизированного органического вещества, что определяет различную уязвимость этих пулов к изменениям климата и землепользования [16].

Изменение климата оказывает многогранное воздействие на структуру и функционирование наземных экосистем, что, в свою очередь, влияет на баланс парниковых газов. Повышение температуры воздуха приводит к удлинению вегетационного периода в умеренных и бореальных широтах, а это может способствовать увеличению продуктивности экосистем и, следовательно, поглощению CO₂ в процессе фотосинтеза [13]. Однако одновременно возрастают темпы экосистемного дыхания и микробной деструкции органического вещества почвы, что может приводить к увеличению эмиссии CO₂ в атмосферу [3]. Соотношение между этими процессами определяет, будет ли экосистема функционировать как сток или как источник углерода в условиях меняющегося климата.

Изменение режимов увлажнения, вызванное климатическими сдвигами, также существенно влияет на потоки парниковых газов в наземных экосистемах. Засухи снижают продуктивность растительности и могут превращать экосистемы из стоков в источники углерода, как это наблюдалось во время европейской засухи 2003 г., когда экосистемы континента выделили в атмосферу около 0,5 ГтС [4]. С другой стороны, переувлажнение почв создаёт анаэробные условия, способствующие эмиссии CH₄ и N₂O [5].

Антропогенное воздействие на экосистемы существенно модифицирует их способность регулировать потоки парниковых газов. Обезлесение, деградация лесов, изменение землепользования и интенсификация сельского хозяйства приводят к значительной эмиссии CO₂ из наземных экосистем в атмосферу. По оценкам, изменение землепользования обуславливает около 10–15 % глобальных антропогенных выбросов CO₂ [9]. Нарушенные экосистемы характеризуются изменёнными биогеохимическими циклами, что может приводить к усилению эмиссии не только CO₂, но и других парниковых газов.

Таким образом, изучение потоков парниковых газов в лесных и антропогенно нарушенных экосистемах представляет собой актуальную научную задачу, имеющую ключевое значение для понимания роли наземных экосистем в глобальном углеродном цикле и в климатической системе. Комплексные исследования потоков на таких территориях необходимы для разработки научно обоснованных стратегий управления экосистемами, направленных на усиление их способности поглощать углерод и снижать эмиссию парниковых газов. Это критически важно для достижения климатических целей и для обеспечения устойчивого развития.

Объекты и методы. В качестве объекта исследования временной изменчивости потоков парниковых газов был выбран карбоновый полигон Чеченской Республики WayCarbon, одним из операторов которого является ГГНТУ. Изучение динамики потоков парниковых газов при лесовосстановлении на антропогенно нарушенных землях проводилось на участке «Карбоновая ферма» (43.35832977°N, 45.74149704°E, высота над уровнем моря 112,7 м) площадью 23 га. Это рекультивированный участок бывшей свалки твёрдых бытовых отходов (рис. 1а). В центре участка установлена эколого-климатическая станция Eddy Covariance для измерения потоков методом турбулентных пульсаций (рис. 1б). Измерения ведутся с мая 2022 г. [21]. В течение 2023–2025 гг. на участке «Карбоновая ферма» проводились посадки саженцев широколиственных деревьев и оценивалась поглощающая способность естественной травянистой растительности и саженцев.

В качестве второго объекта наблюдений для выявления механизмов устойчивости леса и для сравнения экосистемы карбоновой фермы с лесной экосистемой выбрана функционирующая с мая 2023 г. вторая измерительная станция Eddy Covariance — на участке «Черноречье» (43.24246979°N, 45.63633728°E, высота над уровнем моря 175,1 м) (рис. 2а). Он представляет собой смешанный лес с многолетними насаждениями из дуба черешчатого, ясеня обыкновенного, ольхи чёрной,



Рис. 1. Участок «Карбоновая ферма» (а); эколого-климатическая станция Eddy Covariance (б)

клёна (полевого, остролистного и татарского), ореха грецкого, граба и многих видов кустарников. Участок «Черноречье» располагается в Чернореченском лесу на охраняемой водозаборной территории. Средняя высота деревьев — 23 м. Измерительный комплекс пульсаций расположен в центре Чернореченского леса на высоте 30 м (рис. 2б).



Рис. 2. Участок «Черноречье» (а); эколого-климатическая станция Eddy Covariance (б)

Метод турбулентных пульсаций позволяет проводить прямые непрерывные измерения вертикальных потоков тепла, парниковых газов и аэрозолей над однородной земной (водной) поверхностью площадью от нескольких гектаров [1, 18]. Метод основан на высокочастотных (10–20 Гц) измерениях горизонтальных и вертикальных составляющих скорости ветра, характеристик температуры, влажности, концентрации атмосферных газов и аэрозолей. Используется специальное оборудование (газоанализаторы, 3D-анемометры, пиранометры и метеорологические датчики), позволяющее выполнять высокочастотные измерения атмосферных параметров. Метод турбулентных пульсаций даёт возможность после расчётов получать значения таких параметров, как потоки (эмиссия и поглощение) CO_2 , CH_4 и H_2O , потоки тепла, метеорологические показатели (температура воздуха и почвы, осадки, солнечная радиация, скорость и направление ветра, влажность воздуха и др.), а также оценивать баланс углерода в экосистеме и интегральные (по времени) значения потоков парниковых газов (день, месяц и год).

Измерение почвенного дыхания на Ханкальской геотермальной станции (рис. 3) проводили с использованием мобильного газоанализатора G4301 (рис. 4) — первого анализатора в новой линейке переносных CRDS-анализаторов Picarro с питанием от батареи. В его основе лежит новая CRDS-технология с измерением времени затухания: лазер, который работает в ближней ИК-области, используется для определения спектральных свойств молекул, находящихся в оптической кювете. Анализатор одновременно определяет концентрации CO_2 , CH_4 и H_2O в очень широком диапазоне,

обеспечивая измерения как фона, так и эмиссий. Его система ввода, включающая интегрированный насос, может использоваться как для непрерывного полевого картирования, так и в системах открытого и замкнутого цикла с почвенными камерами.



Рис. 3. Ханкальская геотермальная станция



Рис. 4. Внешний вид газоанализатора G4301

Результаты исследования. Проведение сравнительного анализа суточных сумм потока CO_2 на участках «Карбоновая ферма» и «Черноречье» показало следующее. В мае 2022 г. на карбоновой ферме нам удалось застать конец вегетационного сезона с присутствием небольшого поглощения CO_2 в начале месяца. Со второй половины мая по июнь зарегистрирован баланс CO_2 на уровне околонулевых значений, так как фотосинтез уравнивал экосистемное дыхание. В конце июня фотосинтез практически прекратился; вследствие дыхания почвы поверхность стала чистым источником CO_2 до следующего вегетационного сезона. Аналогичная картина наблюдалась в 2023 и 2024 гг. с завершением фотосинтеза уже в конце июля. Очевидно, что поглощение и фотосинтез продлились чуть дольше из-за появившихся вокруг станции саженцев лип, ив и разных фруктовых деревьев, а также из-за установленной системы капельного орошения. В 2025 г. поглощение CO_2 (рис. 5) в мае достигло максимума — значений до $-30 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. В октябре 2025 г. выпало 240 % месячной нормы осадков, что обусловило выраженный второй пик поглощения в октябре — ноябре. Похожий второй пик поглощения во второй половине осени наблюдался во влажном 2023 г. Суммарное выделение на карбоновой ферме за время измерений в 2022 г. составило $576 \text{ г} \cdot \text{С} \cdot \text{м}^{-2}$,

в 2023 г — $587 \text{ г С} \cdot \text{м}^{-2}$, в 2024 г — $788 \text{ г С} \cdot \text{м}^{-2}$, а за период с апреля по ноябрь 2025 г. было в 2,5–3 раза меньше, чем в предыдущие годы ($206 \text{ г С} \cdot \text{м}^{-2}$ vs. $499 \text{ г С} \cdot \text{м}^{-2}$ в 2023 г. и $592 \text{ г С} \cdot \text{м}^{-2}$ в 2024 г.) благодаря интенсивному поглощению в апреле и мае и нейтральному балансу в октябре и ноябре за счёт высадки в мае 2025 г. на участке фермы трав-сидератов и их роста осенью того же года. Таким образом, участок «Карбоновая ферма» является в большей степени источником CO_2 , причём основной вклад в его эмиссию вносит почвенное дыхание. На данном этапе с целью повышения приживаемости деревьев нами продолжаются работы по расширению системы капельного орошения, улучшению качества почвы путём посева зелёных удобрений (трав-сидератов) — овса, горчицы жёлтой, редьки масличной и т. д., а также по созданию водозадерживающего дернового слоя. Кроме того, начаты исследования возможностей обработки почвы специальными водозадерживающими полимерами.

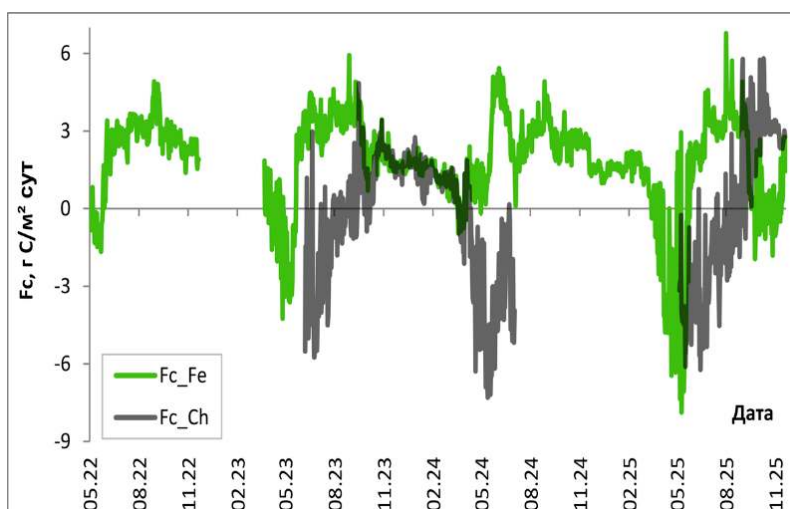


Рис. 5. Суточные суммы потока CO_2 на участках «Карбоновая ферма» (F_{c_Fe}) и «Черноречье» (F_{c_Ch}) в период измерений 2022–2025 гг.

Измерения суточных сумм потока CO_2 в Чернореченском лесу начаты в июне 2023 г. Сумма потока CO_2 над экосистемой за половину года (16.05.2025–30.11.2025) составила $-46 \text{ г С} \cdot \text{м}^{-2}$ (небольшое нетто-поглощение CO_2). Наибольшая сумма абсорбированного CO_2 зафиксирована в относительно прохладном мае 2024 г. — $137 \text{ г С} \cdot \text{м}^{-2}$ (температура на 2°C ниже нормы, 122 % осадков от нормы). Суточные суммы чистого экосистемного обмена (net ecosystem exchange, NEE) в летние месяцы 2023–2025 гг. составляли $-2,0 \dots -4,3 \text{ г С} \cdot \text{м}^{-2}$, а нетто-поглощение за период с мая по июль — $71 \dots 137 \text{ г С} \cdot \text{м}^{-2}$ за месяц. С сентября по март лес являлся нетто-источником CO_2 . Суточный ход NEE CO_2 в Чернореченском лесу в каждый из месяцев с мая по сентябрь, как показывают данные нескольких лет наблюдений, был практически одинаковым, хотя 2023 г. был влажным, а 2025 г. — очень засушливым. Такой результат подчёркивает стабильность режима функционирования лесной экосистемы в годы с разными условиями и независимость поглощения CO_2 лесом от количества атмосферных осадков. Травянистая экосистема значительно более зависима от условий внешней среды.

В отличие от потоков CO_2 , у потоков CH_4 на обоих участках не отмечено выраженного суточного хода. Средние суточные значения потока CH_4 менялись от -70 до $120 \text{ мг С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ (рис. 6). В сумме по годам измерений на карбоновой ферме наблюдалось небольшое выделение метана. С апреля по ноябрь влажного 2023 г. выделение метана на участке «Карбоновая ферма» составило $2418 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2}$, а в жарких и сухих условиях 2025 г. за этот же период баланс метана был близок к нулю. В Черноречье за период с 16.06.2025 по 30.11.2025 зафиксировано поглощение метана — $1818 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2}$, в то время как за 16.06.2023–30.11.2023 лес был слабым источником метана.

Также в работе была поставлена задача изучения почвенной эмиссии парниковых газов на территории уникальной геотермальной станции (рис. 7) отбора глубинного тепла Земли на Ханкальском геотермальном месторождении Чеченской Республики [17, 19, 20], введённой в строй в 2015 г.

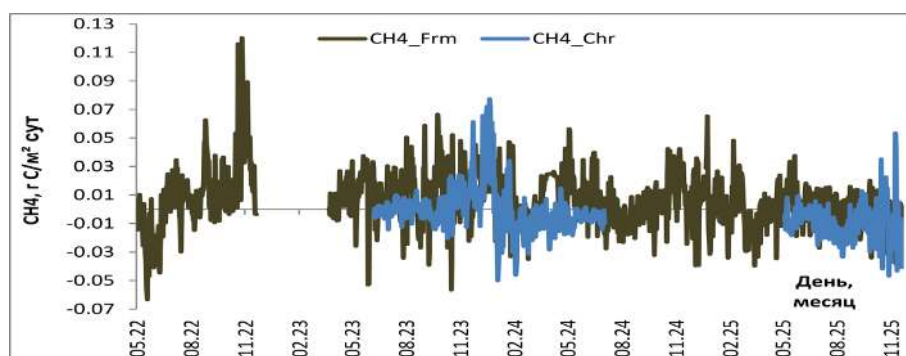


Рис. 6. Суточные суммы потока CH₄ на участках «Карбоновая ферма» (Fc_Fe) и «Черноречье» (Fc_Ch) в период измерений 2022–2025 гг.

Это первый в России опыт создания геотермальной станции с циркуляционной системой теплоотбора. Проектная мощность составляет 8,7 МВт. Тепловая схема использовалась с независимым разделением теплового и потребительского контуров через теплообменники, что является оптимальным решением для повышения срока эксплуатации труб теплосети. В циркуляционной схеме, состоящей из дублета скважин (добывающей и нагнетательной), предусмотрена циркуляция термальной воды в объеме до 5000 м³ в сутки, обеспечиваемая при помощи группы насосов — скважинного погружного, сетевых и нагнетательных. Обратная закачка охлажденной с +95 до +50 °С термальной воды в продуктивный пласт реализована в полном объеме, что позволяет исключить снижение пластового давления и влияние негативных факторов, связанных с выбросом отработанной жидкости на поверхность.



Рис. 7. Проведение измерений почвенного дыхания на территории Ханкальской геотермальной станции с использованием газоанализатора Picarro G4301

Нами проведены измерения на 66 точках по периметру и в границах территории Ханкальской геотермальной станции.

На основании полученных данных построены карты точек фактических значений измерения CH₄ и CO₂ и карты изолиний потоков этих газов. Для этого применён алгоритм тонкостенного сплайна и интерполяция данных за границы исследованной территории (рис. 8, 9).

Проведённые исследования измерений показали практически полное отсутствие выбросов CH₄ и CO₂. На рис. 9 виден локальный выброс потоков CO₂ (около 3 моль·м⁻²·с⁻¹), связанный с наличием в этой локации технических коммуникаций для обслуживания действующих скважин и аварийного сброса термальной воды при ремонте скважины (например, при замене погружного насоса). При штатном режиме работы коммуникация используется для сброса конденсированных паров воды.

Заключение. Как показывают данные нескольких лет наблюдений и регистрации потоков парниковых газов, оба участка — и «Карбоновая ферма», и «Черноречье» — в целом за каждый год измерений являются источниками CO₂. Фотосинтетическая активность лесной экосистемы сохранялась с апреля по октябрь, а нетто-поглощение наблюдалось с конца апреля по конец августа.

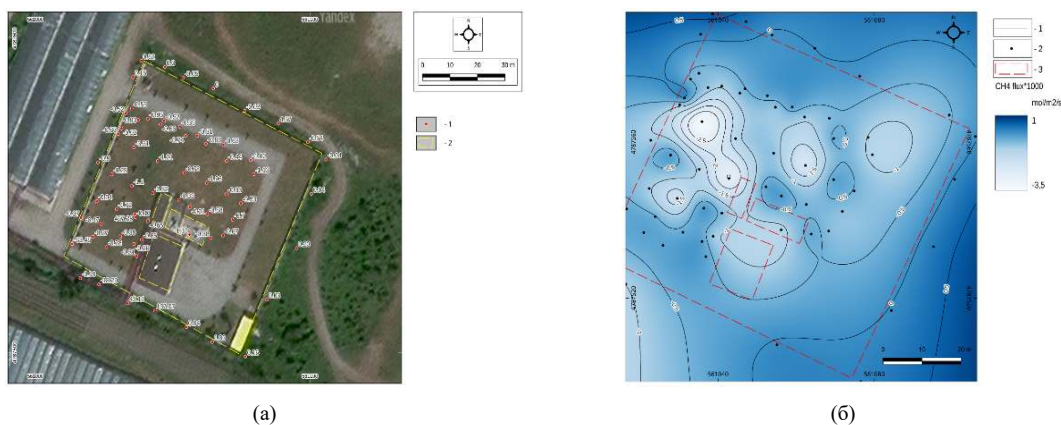


Рис. 8. Карта точек фактических значений измерения CH_4 (а); карта изолиний потоков CH_4 (б).
1 — маркировка изолинии значений потоков; 2 — точки измерения; 3 — объекты на станции

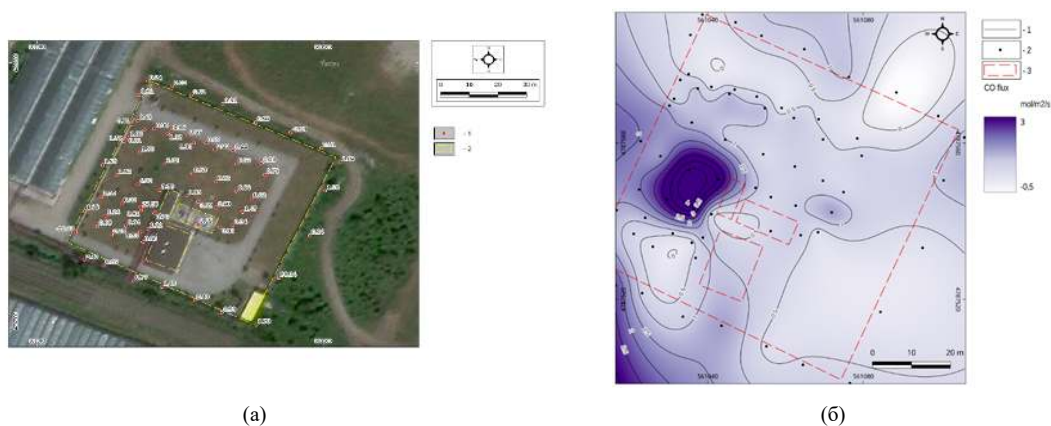


Рис. 9. Карта точек фактических значений измерения CO_2 (а); карта изолиний потоков CO_2 (б).
1 — маркировка изолинии значений потоков; 2 — точки измерения; 3 — объекты на станции

Суточные суммы чистого экосистемного обмена CO_2 на карбоновой ферме, как правило, были отрицательными в мае, но каждый год в конце мая — начале июня они становились положительными (эмиссия CO_2). Это происходило в результате возрастания экосистемного дыхания и ослабления фотосинтеза при увядании и засыхании растительности из-за высокой температуры воздуха и нестабильного полива. В отличие от потоков CO_2 , у потоков CH_4 на обоих участках не отмечено выраженного суточного хода.

На основании проведённых исследований на Ханкальской геотермальной станции можно сделать вывод об отсутствии эмиссии парниковых газов и об экологической безопасности её эксплуатации, что обеспечивается герметичностью наземного оборудования.

Список использованных источников

1. Eddy Covariance. A Practical Guide to Measurement and Data Analysis / M. Aubinet, T. Vesala, D. Papale (Eds). Dordrecht : Springer Science & Business Media, 2012, 438 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2351-1>
2. Batjes N. H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. European Journal of Soil Science, 1996, vol. 47, iss. 2, pp. 151–163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x>
3. Bond-Lamberty B., Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record. Nature, 2010, vol. 464, pp. 579–582. <https://doi.org/10.1038/nature08930>

4. Ciais P., Reichstein M., Viovy N., et al. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 2005, vol. 437, pp. 529–533. <https://doi.org/10.1038/nature03972>
5. Davidson E. A., Keller M., Erickson H. E., Verchot L. V., Veldkamp E. *BioScience*, 2000, vol. 50, iss. 8, pp. 667–680. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2000\)050\[0667:tacmos\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2000)050[0667:tacmos]2.0.co;2)
6. Dixon R. K., Solomon A. M., Brown S., Houghton R. A., Trexler M. C., Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, vol. 263, iss. 5144, pp. 185–190. <https://doi.org/10.1126/science.263.5144.185>
7. Friedlingstein P., O’Sullivan M., Jones M. W., et al. Global carbon budget 2020. *Earth System Science Data*, 2020, vol. 12, iss. 4, pp. 3269–3340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
8. Gulev S. K., Thorne P. W., Ahn J., et al. The changing state of the climate. In: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge : Cambridge University Press, 2023, pp. 287–422. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
9. Houghton R. A., Nassikas A. A. Global and regional fluxes of carbon from land use and land-cover change 1850–2015: Carbon emissions from land use. *Global Biogeochemical Cycles*, 2017, vol. 31, no. 3, pp. 456–472. <https://doi.org/10.1002/2016gb005546>
10. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge : Cambridge University Press, 2023, 2391 p. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
11. Jobbágy E. G., Jackson R. B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 2000, vol. 10, iss. 2, pp. 423–436. <https://doi.org/10.2307/2641104>
12. Pan Y., Birdsey R. A., Fang J., et al. A large and persistent carbon sink in the world’s forests. *Science*, 2011, vol. 333, no. 6045, pp. 988–993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
13. Piao S., Ciais P., Friedlingstein P., et al. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. *Nature*, 2008, vol. 451, no. 7174, pp. 49–52. <https://doi.org/10.1038/nature06444>
14. Saunois M., Stavert A. R., Poulter B., et al. The global methane budget 2000–2017. *Earth System Science Data Discussions*, 2019, vol. 11, iss. 4, pp. 1783–1838. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>
15. Seneviratne S. I., Zhang X., Adnan M., et al. Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge : Cambridge University Press, 2023, pp. 1513–1766. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
16. Trumbore S. Age of soil organic matter and soil respiration: Radiocarbon constraints on belowground C dynamics. *Ecological Applications*, 2000, vol. 10, iss. 2, pp. 399–411. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0399:aosoma\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0399:aosoma]2.0.co;2)
17. Zaurbekov S. S., Mintshev M. S., Shaipov A. A., Labazanov M. M., Cherkasov S. V. The results of the construction project design of a pilot geothermal station with a circulation loop of heat extraction at the Khankala deposit of the Chechen Republic. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 2015, vol. 6, no. 3, pp. 1941–1949. <https://elibrary.ru/wpmhrv>

18. Бурба Г. Г., Курбатова Ю. А., Куричева О. А., Авилов В. К., Мамкин В. В. Метод турбулентных пульсаций : краткое практическое руководство. Москва : ИПЭЭ имени А. Н. Северцова РАН. 2016. С. 11–27. <https://doi.org/10.13140/rg.2.1.5109.5449>
19. Заурбеков Ш. Ш., Минцаев М. Ш., Лабазанов М. М., Черкасов С. В., Бутузов В. В. Результаты разработки технического проекта для пилотной геотермальной станции на Ханкальском месторождении Чеченской Республики // GEOENERGY : материалы международной научно-практической конференции, Грозный, 19–21 июня 2015 г. Махачкала : Типография «Алеф», 2015. С. 68–77. <https://elibrary.ru/txfbyr>
20. Заурбеков Ш. Ш., Минцаев М. Ш., Шаипов А. А., Лабазанов М. М., Черкасов С. В. Пилотная геотермальная станция: возможности получения экологически чистой энергии // Экология производства. 2016. № 2. С. 63–67. <https://elibrary.ru/wcxphp>
21. Керимов И. А., Махмудова Л. Ш., Мячина К. В., Придача В. Б., Эльжаев А. С., Бадаев С. В., Батукаев А. А., Додуев А. А., Дускаев М. З., Мамадиев Н. А. Карбоновый полигон Чеченской Республики: II. Методы исследования и первые результаты // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2022. Т. 7, № 4 (30). С. 62–78. <https://doi.org/10.25744/genb.2022.70.69.008>

УДК 551.2

Геолого-тектоническая характеристика и пространственная типизация геосистем в геоисторическом аспекте

Мамаев С. А., Ибаев Ж. Г., Сулейманов В. К., Мамаев А. С., Ахмедов С. А.

Институт геологии ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия

✉ dangeogis@mail.ru

Бассейновая концепция природопользования применяется в различных исследованиях по экологическому мониторингу наземных экосистем. Природные закономерности бассейнов рек как геосистем, в частности свойства целостности и уникальности, а также особенности конкретных бассейнов, нельзя определять без учёта геолого-тектонических характеристик и пространственной типизации речных бассейнов. Цель настоящей работы — геолого-тектоническая характеристика и пространственная типизация геосистем речных бассейнов, учитывающие геохронологические аспекты. Принадлежность геосистем речных бассейнов к различным древнейшим тектоническим структурам свидетельствует в пользу генетической взаимосвязи эндогенных и экзогенных процессов руслового трещинообразования и разнообразия геометрических параметров.

Ключевые слова: бассейн реки, геосистема, геотектоника, водосборный бассейн, пространственная типизация

Геолого-тектоническая характеристика Большого Кавказа. Большой Кавказ (или Кавказ в целом) — это показательный объект для изучения альпийских складчатых сооружений, который много значит не только для науки России, но и для науки целого ряда соседних стран. Особенную актуальность изучение Кавказа приобретает в настоящее время, когда уровень Каспийского моря падает, вероятной причиной чего выступают климатические изменения на планете. При всём этом геолого-тектоническая составляющая проанализирована ещё не до конца. Типизация геосистем речных бассейнов, проведённая с учётом рельефа и геолого-тектонической характеристики региона, может служить целям не только геоэкологического и гидрологического районирования, но и оценки экзогенных процессов в бассейнах горных рек в контексте меняющихся климатических условий. Важно помнить, что горные ландшафты формируют поверхностный сток речных бассейнов. Тяготение речных русел к тектоническим разломам не вызывает особых сомнений. При комплексном анализе также необходимо учитывать механизмы руслообразования и силу Кориолиса: это позволит дать качественную геолого-тектоническую характеристику региона и провести грамотную пространственную типизацию геосистем.

Рассмотрим особенности региональной геотектоники и геодинамической позиции Кавказа в Альпийско-Гималайском коллизионном поясе. Произошедшее после окончательного закрытия загросского реликта Неотетиса северо-восточное (с вращением против часовой стрелки) перемещение спаянных воедино Аравии и Ирана вызвало коробление Туранской плиты в раннем-среднем миоцене, затронувшее также Скифскую плиту, Донбасс и Воронежский массив. Однако главный этап формирования новейшей структуры Скифской платформы и юга Русской плиты начался позже, на рубеже миоцена и плиоцена, после окончательного закрытия Большекавказского флишевого бассейна — последнего препятствия, до тех пор разделявшего столкнувшиеся блоки Закавказского массива и Скифской платформы в их неотектоническом выражении. С того времени уже вся находившаяся к северу от Кавказа и Копетдага платформенная область (по меньшей мере её южная часть) испытывает на себе давление Аравийской плиты, передающееся через соответствующий сегмент Альпийско-Гималайского коллизионного пояса. О том, что формирование новейшей структуры находящейся к северу от Кавказа платформенной области Юго-Восточной Европы (Скифская плита и юго-восток Русской плиты) происходило именно в связи с этим давлением, свидетельствуют факты [1, 2].

Детальное изучение новейшей внутриплитной структуры показало, что она формировалась при существенном участии горизонтальных напряжений. Большинство крупных внутриплитных разрывов и флексур имеют ту или иную горизонтальную (взбросовую, сдвиговую или наклонно-сбросовую) компоненту смещения (рис. 1), устанавливаемую независимыми способами: бурением, сейсморазведкой, данными геологической съёмки и анализа регионального структурного рисунка и, наконец, результатами полевых неотектонических наблюдений [1–4].

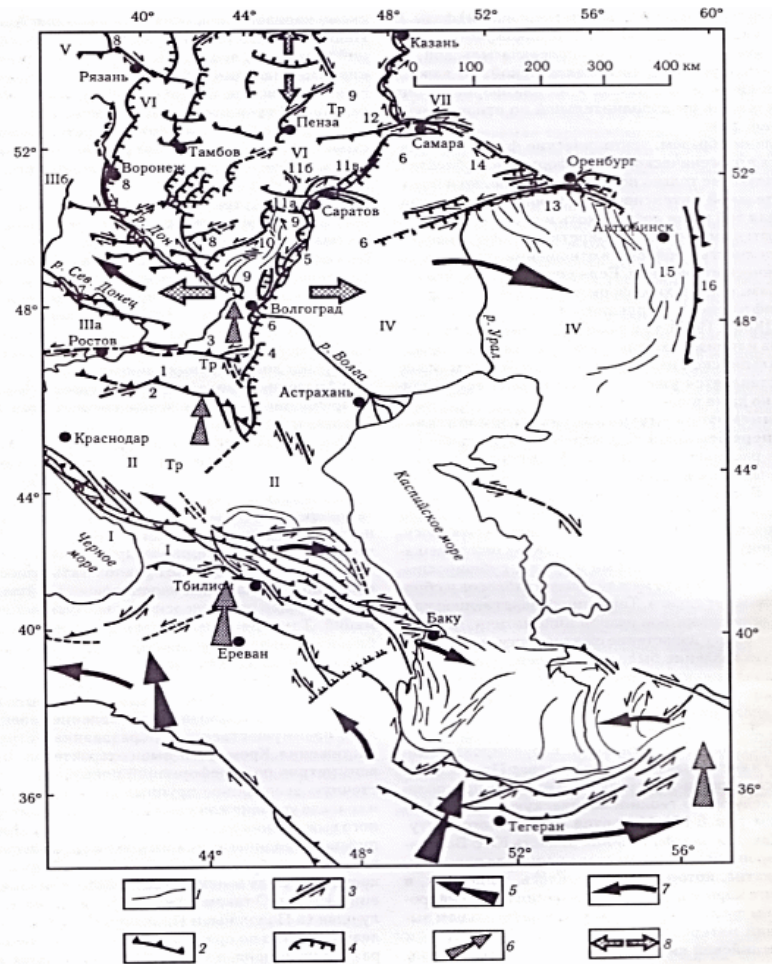


Рис. 1. Геокинематическая карта севера Периаравийской коллизийной области для новейшего этапа развития (неоген — квартер)

Условные обозначения

Элементы тектонического районирования (I–VII): I — вал Шатского; II — Скифская плита; III–VII — Восточно-Европейская платформа; III — Сарматский раннепалеозойский щит (IIIa — Украинский щит [Ростовский выступ]; IIIб — Воронежская антеклиз); IV — Прикаспийская синеклиза; V — Московская синеклиза; VI — Пачелмский авлакоген; VII — Серноводско-Абдулинский авлакоген.

Внутриплитные новейшие структуры (1–16): 1 — край Карпинского (Сальско-Маньчский свод); 2 — Маньчская надвзбросовая флексура; 3 — Котельниковская гряда; 4 — Ергенинский уступ; 5 — Приволжский уступ; 6 — Западно-Прикаспийский прогиб; 7 — Северо-Донецкий надвиг; 8 — Окско-Донской прогиб; 9 — Приволжское поднятие; 10 — Доно-Медведицкие дислокации; 11 — Саратовские дислокации [11a — Елшанско-Сергиевская надвзбросовая флексура; 11б — Слепцовская флексура; 11в — Хлебновская флексура]; 12 — Жигулёвские дислокации и одноимённый надвиг; 13 — Оренбургский погребённый новейший надвиг; 14 — свод Общего Сырта; 15 — складчатая зона Актюбинского Приуралья; 16 — Мугоджарский взброс; Тр — Транскавказское поперечное поднятие.

Легенда (1–8): 1 — метаскладки и валы; 2 — надвиги и взбросы (вершины зубцов — по падению сместителя); 3 — сдвиги; 4 — сбросы; 5 — главное направление давления Аравийской плиты; 6 — локальные участки концентрации давления; 7 — направления латерального выжимания блоков; 8 — направления горизонтального растяжения.

Разрывы разной кинематики ориентированы закономерно: взбросы имеют преимущественно субширотное простирание, сбросы — субмеридиональное, а сдвиги — диагональное [северо-восточное (левые) и северо-западное (правые)]. При этом определённые по ориентировке крупных разрывов направления главных осей деформации увязываются с представлением об идущем с юга давлении: ось главного укорочения простирается субмеридионально, а главного удлинения — субширотно.

Суммарный структурный рисунок рассматриваемой платформенной территории складывается из следующих элементов (см. рис. 1). В центре и на западе, напротив Кавказа, присутствует домен субширотных взбросов и надвигов. Их количество увеличивается к югу, в сторону Кавказа, тогда как к северу они замещаются субмеридиональными и субширотными (реже) сбросами. Место между зонами взбросов и сбросов занимают сдвиги. Такое пространственное распределение разрывов разной кинематики, показывающее общее нарастание сжатия к югу, — признак того, что давление было направлено с юга, со стороны коллизионного пояса. Правые сдвиги, северо-западного простирания, находятся на юге и на самом западе района (кряж Карпинского, Донбасс и Окско-Донской прогиб). Левые сдвиги, в целом северо-восточного простирания, сгруппированы севернее и восточнее (Поволжье и север Прикаспия).

Рассмотренный структурный рисунок предполагает следующую геокинематическую интерпретацию (рис. 1). Напротив Аравийского выступа и Кавказа платформенная область Юго-Восточной Европы на новейшем этапе испытала повышенное сжатие, которое реализовалось, во-первых, в поддвиге коры и надвигообразовании прямо напротив зоны давления и, во-вторых, в латеральном выжимании материала из этой зоны к востоку — к Прикаспийской синеклизе и, может быть, к Туранскому коридору между зонами давления Аравии и Индии. Прикаспийский блок в этом поле деформаций выжался к востоку; область его отрыва маркируется Западно-Прикаспийским и Окско-Донским новейшими прогибами, образовавшимися в результате субширотного растяжения.

Бросается в глаза сходство новейшего структурного рисунка платформенной области со структурным рисунком Кавказа и Периаравийской коллизионной области в целом.

Поперечное сжатие Большого Кавказа было обусловлено давлением Закавказской плиты, которая была вовлечена в общее движение блоков, подталкиваемых Аравийской литосферной плитой к северу, с поддвигом в том же направлении. При этом Закавказская плита пододвигалась под Скифскую платформу — часть Евразийской литосферной плиты. Многие черты позднеколлизионного развития Большого Кавказа определялись особенностями его позиции внутри Периаравийской коллизионной области. Так, удалённое от Аравийской плиты — индентора положение обусловило относительно молодой (конец раннего миоцена — квартал) возраст его позднеколлизионной деформации: должно было пройти время, чтобы дрейфующая к северу Аравия успела закрыть все находящиеся к северу от неё остаточные бассейны с океанической или субокеанической корой. Той же причиной объясняется и возрастание роли деформации сдвига в структуре всего Большого Кавказа (а на его севере — и растяжения). Кроме того, тяготение к западному краю области динамического влияния Аравии обусловило некоторый приоритет (и бóльшую древность?) правых сдвигов Кавказа по сравнению с левыми. Вместе с тем постоянное нахождение напротив выступающей к северу вершины Аравийской плиты (так называемый Аравийский выступ) объясняет большее проявление складчато-надвиговых деформаций на Кавказе, чем на Копетдаге, находившимся на восточном, более удалённом краю области влияния плиты-индентора.

Исследуемый регион представляет собой, конечно, горно-складчатое сооружение, которое не претерпело полной инверсии, как это имело место на Западном Кавказе. На рубеже догерца и мальма (Адыгейская фаза складчатости) произошла инверсия геотектонического режима в пределах геосинклинальных зон Большого Кавказа, в том числе Восточного Кавказа. Нами проведён анализ исследований по истории геологического развития Восточного Кавказа [5–11], и по результатам составлена схема его развития в альпийском цикле тектогенеза [12, 13], где представлена почти вся история геотектонического развития региона (рис. 2).

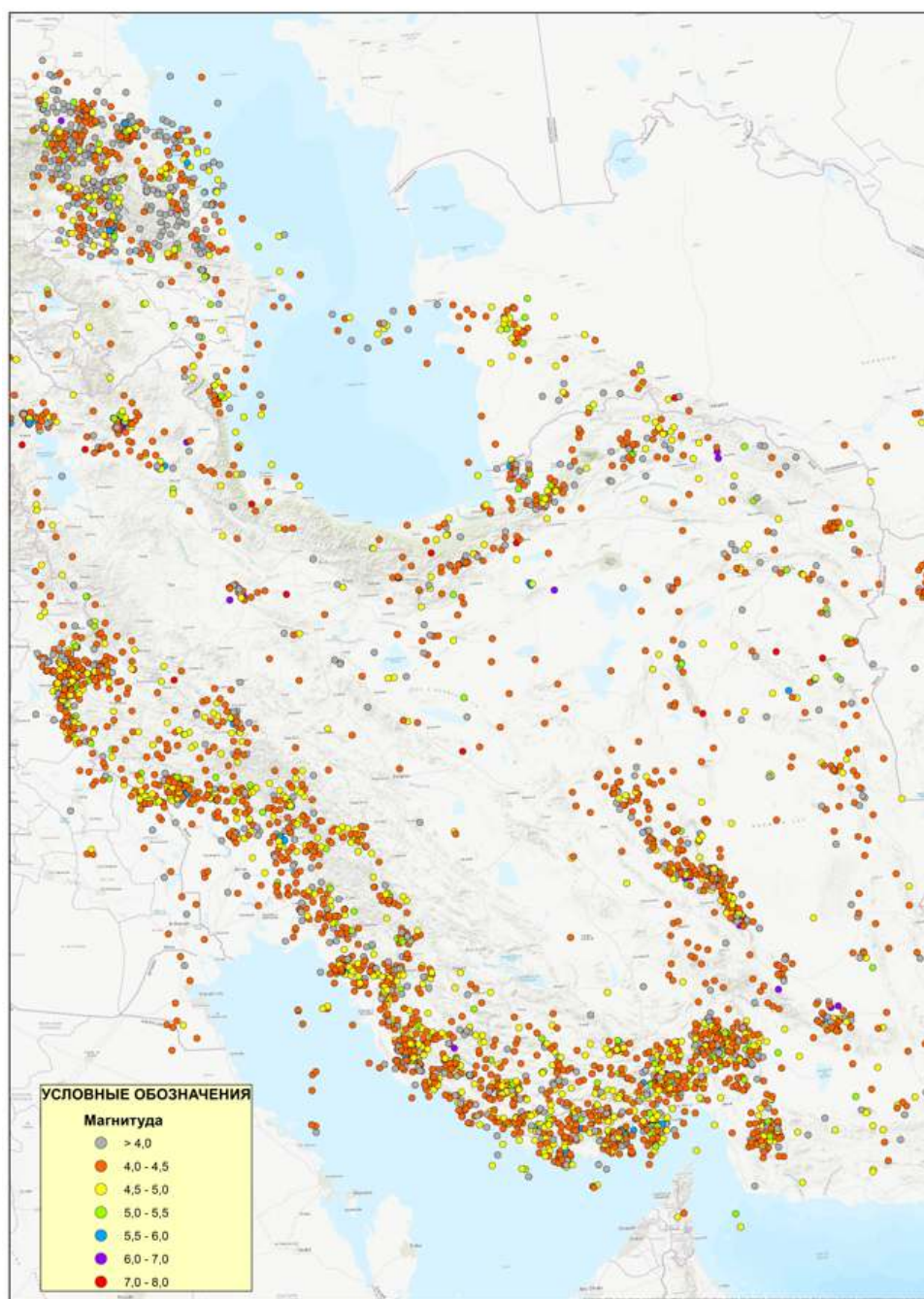


Рис. 3. Карта эпицентров землетрясений (с магнитудой более 4) Восточного Кавказа, Азербайджана, Ирана и сопредельных государств из геоинформационной базы данных «Землетрясения» ИГ ДФИЦ РАН

Иран, например, подвержен различным природным катаклизмам, включая землетрясения и оползни. Объясняется это его географическим расположением: территория находится на стыке крупных тектонических плит, что увеличивает вероятность подземных толчков и следующих за ними природных явлений, таких как оползни.

Показанная на рис. 4 горная система Эльбурс (Альборз) образует центральную часть северной горной дуги в Иране, которая простирается между горами Армении на западе и Гиндукушем на востоке и отделяют Арало-Каспийскую низменность на севере от центрального Иранского нагорья на юге. Она образует почти непрерывную стену, которую прорывают лишь узкие ущелья. Эта система — важнейший климатический и экологический барьер в географии Ирана.



Рис. 4. Фрагмент геоморфологической карты северо-востока Ирана

Северные склоны, начинающиеся от равнин Гилян и Мазендеран, резко отличаются своими природными и антропогенными ландшафтами от южных склонов, которые относятся к засушливой зоне Ирана.

Описываемые геолого-тектонические характеристики Северо-Восточного Кавказа и севера Ирана необходимо учитывать при последующих исследованиях природных закономерностей бассейнов рек как геосистем, при их геологической хронологии и типизации.

Список использованных источников

1. Копп М. Л. Мобилистическая неотектоника платформ Юго-Восточной Европы / отв. ред. Ю. Г. Леонов. Москва : Наука, 2004. 340 с. (Труды ГИН РАН ; вып. 552). <https://elibrary.ru/qkdtstd>
2. Леонов М. Г. Тектоника консолидированной коры / М. Г. Леонов ; [отв. ред. Ю. О. Гаврилов]. Москва : Наука, 2008. 457 с. (Труды ГИН РАН ; вып. 575). <https://elibrary.ru/qkdtmj>
3. Копп М. Л. Новейшая структура платформ Юго-Восточной Европы как результат коллизии в Периаравийском сегменте Альпийского пояса // Проблемы геодинамики литосферы. Москва : Наука, 1999а. С. 181–218.
4. Копп М. Л., Тверитинова Т. Ю. Кинематика Жигулёвского новейшего разлома // Геотектоника. 1999b. Т. 74, вып. 5. С. 18–29.
5. Хаин В. Е. Общая геотектоника. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Недра, 1973. 512 с.
6. Хаин В. Е. [Материал на с. 270–271; название не установлено] // Тектоника и геодинамика континентальной литосферы. Москва : Геос, 2003. Т. 2. С. 270–271.
7. Хаин В. Е. Мезозойско-кайнозойские аккреционные комплексы Большого Кавказа // Доклады Академии наук. 2007. Т. 413, № 5. С. 661–665. <https://elibrary.ru/iaansz>
8. Хаин В. Е., Ломизе М. Г. Геотектоника с основами геодинамики. Москва : Книжный дом «Университет», 2010. 559 с. <https://elibrary.ru/qkjkhk>
9. Хаин В. Е., Халилов Э. Н. Пространственно-временные закономерности сейсмической и вулканической активности. Бургас : SWB, 2008. 304 с. <https://doi.org/10.25996/1369.2024.10.59.001>
10. Милановский Е. Е., Хаин В. Е. Очерки региональной геологии СССР. Геологическое строение Кавказа. Москва : Изд-во Московского государственного университета, 1963. 378 с.

11. Короновский Н. В. Аграхан-Тбилиско-Левантийская левосдвиговая зона – важнейшая структура Кавказского региона // Доклады Академии наук. 1994. Т. 337, № 1. С. 83–89.
12. Магомедов Р. А. Геодинамический режим области Дагестанского клина в альпийском цикле развития Восточного Кавказа // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2010. № 56. С. 66–80. <https://elibrary.ru/pxncfv>
13. Магомедов Р. А., Маммаев О. А. Палеосейсмодислокации в альпийском цикле развития Восточного Кавказа // Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии : материалы международной научной конференции, Владикавказ, 30 сентября – 02 октября 2019 г. Владикавказ : Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, 2019. С. 283–291. <https://elibrary.ru/oltzvw>
14. Маркус М. А. Долгоживущие структуры Восточного Кавказа // Советская геология. 1986. № 10. С. 63–69.
15. Иванова Т. П., Трифонов В. Г. Новые аспекты соотношений тектоники и сейсмичности // Доклады Академии наук. 1993. Т. 331, № 5. С. 587–589.
16. Tibaldi A., Tsereteli N., Varazanashvili O., Babayev G., Barth A., Mumladze T., Bonali F. L., Russo E., Kadirov F., Yetirmishli G., Kazimova S. Active stress field and fault kinematics of the Greater Caucasus. Journal of Asian Earth Sciences, 2020, vol. 188, art. 104108 (18 p.). <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.104108>
17. Trifonov V. G., Karakhanian A. S., Kozhurin A. T. Major active faults of the collision area between the Arabian and the Eurasian plates. In: Proceedings of the International Conference on Continental Collision Zone Earthquakes and Seismic Hazard Reduction held at Yerevan–Sevan, Armenia, 01–06 October, 1993 / B. A. Bolt, R. Amirbekian (Eds). Yerevan : IASPEI / IDNDR Publ., 1994, pp. 56–78.

УДК 910.3

Геолого-геоморфологические условия и особенности бассейна реки Гумс

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

¹ Академия наук Чеченской Республики, Грозный, Россия

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

✉ gairabekov_u@mail.ru

Проведён комплексный анализ геолого-геоморфологических условий бассейна реки Гумс, протекающей в восточной части Чеченской Республики. Особое внимание уделено влиянию литологии и неотектоники на формирование речной долины и на оползневые и селевые процессы в районе исследования, а также гидрогеологическим и геоэкологическим рискам.

Ключевые слова: бассейн реки Гумс, геоморфология, геологическое строение, гидрографическая сеть, стратиграфия, тектоническая структура, морфоструктура

Географическое положение, орография и гидрографическая сеть бассейна. Бассейн реки Гумс занимает юго-восток горной части Чеченской Республики (Веденский, Курчалоевский, Гудермесский, Ножай-Юртовский и Шалинские районы [1, 2], также небольшую часть Дагестана в юго-восточной части бассейна реки) и прилегает к отрогам Чёрных гор, к Бенойской складке и Лесистому хребту. С юга и юго-востока он ограничен водоразделами Бокового хребта и административной границей с Дагестаном, с севера — переходом в наклонную Чеченскую равнину. Абсолютные высоты варьируют от 52–150 м в устьевой части до 1276–2500 м в верховьях (максимум — 1800,9 м на вершине Тюрье-Лам) [2].

Рельеф сильно расчленён. В верховьях река протекает по узким ущельям, здесь встречаются каньоны с водопадами и порогами. Для среднего течения характерны разработанные рекой долины с террасами, а для нижнего — широкие аккумулятивные поймы и конусы выноса.

Гидрографическая сеть включает почти два десятка основных притоков общей длиной 346,7 км: Хулхулау (49,5 км, левый), Гумс (64 км), Гансол (20 км), Исперк (12 км), Хумык (21,3 км), Хумыс (12,7 км), Ахко (15,3 км), Типиш-Джага (8,5 км), Бах-Джага (13,6 км), Булк (4,5 км), Ахкинчу (13,5 км), Харачой (15,1 км), Охолитлау (15,2 км), Элистанжи (15,2 км), Аржа-Ахка (9,8 км) и Дзауах (11,1 км). Густота речной сети — 0,28 км·км⁻². Питание смешанное (грунтовое, дождевое и снеговое). Для бассейна характерна высокая мутность воды и частые селевые паводки [1, 5, 6].

Тектоническое строение. Бассейн реки Гумс расположен в северном крыле мегантиклинория Большого Кавказа в пределах Крымско-Кавказской складчатой системы. Тектоническая структура характеризуется зональным высотнo-ступенчатым размещением морфоструктур с преобладающим юго-восточным простираием. Главная структура — Бенойская асимметричная антиклиналь (междуречье Хулхулау-Акса́й-Ярыксу), в сводовой части которой обнажаются чокракские породы среднего миоцена. Севернее проходит Черногорская моноклиналь, южнее — Северо-Юрская депрессия и горст-антиклинорий Бокового хребта [3].

Разделение на блоки происходит по субширотным и диагональным разломам позднегерцинского и раннеальпийского возраста, активизированным в неотектонический этап (поздний плиоцен). Неотектонические движения носят преимущественно восходящий характер (амплитуды до нескольких километров с конца миоцена), что уже привело к интенсивной эрозионной расчленённости. Дигармония складок в разных структурных этажах типична: верхние терригенно-карбонатные толщи дислоцированы сильнее нижележащих.

Стратиграфия. Разрез бассейна представлен осадочными комплексами мезозоя — кайнозоя, перекрывающимися палеозойский фундамент, который не обнажается.

Нижняя и средняя юра представлена мощными (более 4000 м) метаморфизованными сланцами, песчаниками, алевролитами, кварцитами, филлитами с магматическими включениями (диабазы). Они слагают ядра антиклиналей, характеризуются высокой прочностью. По составу они близки к базальту и устойчивы к эрозии.

Верхняя юра состоит из плотных известняков, доломитов, гипс-ангидритовых и соленосных толщ, мергеля, глины и песчаников (до 1200 м). Они образуют куэстовые формы и Скалистый хребет.

Меловая система. Нижний мел представлен доломитизированными известняками и карбонатными алевролитами (валанжин), верхний мел — известняками, доломитами, брекчиями, мергелями, гипсами, глинами и песчаниками (900–1400 м). Они слагают Пастбищный (Меловой) хребет.

Палеоген. Нижний миоцен образует бурые и тёмно-серые глины майкопской свиты; средний и верхний миоцен — чокракский горизонт (тёмно-серые глины и песчаники), караганский (глины, песчаники и мергели) и сарматский ярус (серые глины с прослоями мергелей, песчаников и известняков); плиоцен — акчагыльские и апшеронские слои (глины, пески, песчаники, известняки и конгломераты).

Четвертичные отложения образуют аллювиальные валунно-галечниковые толщи, делювиально-пролювиальные конусы выноса, лёссовидные суглинки и супеси (мощность 20 м и более в долинах рек). Нижнее течение сложено легкоразмываемыми неоген-четвертичными породами [3, 7].

Геоморфологические особенности и рельеф. Рельеф сформирован в конце миоцена — плиоцене альпийским орогенезом и продолжающимися неотектоническими поднятиями. Выделяются три зоны:

1. Горная зона (юг, верхнее течение, 800–2500 м) — северные макросклоны Чёрных гор и Бокового хребта. Глубина расчленения — 300–500 м, крутизна склонов — 30–70°. Для этой зоны характерны узкие каньоны, водопады и пороги.
2. Предгорная зона (среднее течение, 200–800 м). Для неё характерны террасированные долины, конусы выноса и гравитационные процессы.
3. Равнинная зона (север, нижнее течение, < 200 м). Это наклонная Чеченская равнина с широкими аккумулятивными поймами и надпойменными террасами [3, 4].

Регистрируются следующие экзогенные процессы: интенсивная линейная и боковая эрозия (особенно в глинисто-песчаных толщах), селевые и оползневые явления (в Бенойском районе — оползні-потоки в рыхлых четвертичных отложениях, глубина 5–10 м, объём до 1–5 млн м³), гравитационные осыпи и обвалы, локальный карст в карбонатных породах. Современный рельеф активно развивается.

Ландшафтная структура, гидрогеология и современные геологические процессы. Ландшафтная структура отражает высотную поясность:

- низкогорные степные, лесостепные и лесные ландшафты Гудермесского хребта (100–428 м);
- предгорно-равнинные степные, лугостепные и лесостепные ландшафты Чеченской равнины (150–500 м);
- низкогорно-среднегорные горно-лесные и горно-луговые ландшафты Чёрных гор (450–1600 м) [3].

Почвы бурые горно-лесные (в горах), лугово-чернозёмные и карбонатные (на равнине), горно-луговые кислые (выше 1300 м). Растительность — широколиственные леса (граб, дуб и бук), степные ценозы, байрачные леса, горно-луговое разнотравье [7].

Что касается гидрогеологии, то подземные воды локализованы в трещиноватых карбонатных и терригенных породах. Основные горизонты — юрско-меловые трещинно-карстовые и неогеновые поровые. Высокая обводнённость зон разломов обеспечивает значительное грунтовое питание реки.

Современные процессы включают эрозию берегов, аккумуляцию наносов, селевые паводки и оползни. Мутность воды высока из-за размыва рыхлых отложений. Климатические изменения и антропогенная нагрузка (вырубка лесов и строительство) усиливают экологические риски.

Заключение. Геолого-геоморфологические условия бассейна реки Гумс определяются интенсивной альпийской складчатостью, преобладанием терригенно-карбонатных комплексов мезозоя — кайнозоя и активными неотектоническими поднятиями. Морфометрическая асимметрия, высокая лесистость и умеренная густота речной сети обеспечивают относительную стабильность гидрологического режима, однако оползни, сели и эрозия в Бенойском районе остаются основными геоэкологическими рисками.

Полученные данные могут служить основой для геоэкологического мониторинга, планирования гидротехнических мероприятий, инженерной геологии и охраны природных комплексов горной части Чеченской Республики. Дальнейшие исследования должны включать детальное ГИС-картирование экзогенных процессов, геодинамический мониторинг и оценку рисков с использованием дистанционного зондирования.

Исследования проведены в рамках поддержанного Минобрнауки РФ научного проекта «Динамика геоэкологического состояния бассейнов горных рек Северо-Восточного Кавказа, Азербайджана и Ирана в условиях изменения климата и растущей антропогенной нагрузки» (соглашение № 075-15-2023-592).

Список использованных источников

1. Гайрабеков У. Т. Проблемы рационального использования и охраны водных ресурсов бассейна р. Гумс // Толстовские чтения : тезисы докладов региональной научной конференции, Грозный, 01 марта 1991 г. Грозный : Чечено-Ингушский государственный университет имени Л. Н. Толстого, 1991. С. 192–193. <https://elibrary.ru/zkcjhg>
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. <https://elibrary.ru/tiwwcl>
3. Гайрабеков У. Т., Музаев И. Х. Структура и особенности ландшафтов бассейна реки Гумс // Геоэкологическая оценка бассейнов горных рек: теоретико-методологические и методические аспекты, региональные исследования : материалы II Международной научной конференции, Грозный, 25 декабря 2025 г. Грозный : ГГНТУ имени М. Д. Миллионщикова, 2025. С. 45–49. <https://elibrary.ru/fufqlz>
4. Головлёв А. А. Геолого-геоморфологические особенности территории Горной Чечни // Бюллетень Самарская Лука. 2007. Т. 16. № 4 (22). С. 689–707. <https://elibrary.ru/waokbr>
5. Даукаев А. А., Абумуслимов А. А., Даукаев А. А., Абумуслимова И. А. Малые реки в юго-восточной части Чеченской Республики // Вестник Академии наук Чеченской Республики. 2014. № 3 (24). С. 74–78. <https://elibrary.ru/szbvbd>
6. Даукаев А. А., Абубакарова Э. А., Абалханов Х. Х. Географо-экологическая оценка речной сети Чеченской Республики // Метеорология и гидрология. 2025. № 11. С. 115–123. <https://elibrary.ru/zgmxic>
7. Музаев И. Х., Гайрабеков У. Т. Особенности формирования почвенного покрова бассейна реки Гумс // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа : материалы XV Международной научной конференции, Владикавказ, 06–08 октября 2025 г. Москва : ИИЕТ РАН, 2025. С. 595–598. <https://elibrary.ru/kogdpx>

УДК 910.3

Природные условия и факторы формирования геоэкологического состояния бассейна реки Гумс

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

¹ Академия наук Чеченской Республики, Грозный, Россия

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

✉ gairabekov_u@mail.ru

Работа посвящена изучению природных условий бассейна реки Гумс (восточная часть Чеченской Республики) и факторов, определяющих его геоэкологическое состояние. Охарактеризована динамика ландшафтов в различных высотных поясах — от предгорно-степных и лесостепных до горно-лесных и луговых. Отмечено, что современные климатические тренды выражаются в сокращении площади снежников и в смещении пика водности реки на первую половину лета. Также зафиксированы изменения в структуре растительности — продвижение горных лугов и верхней границы леса выше по склонам.

Ключевые слова: малые реки, водные ресурсы, негативное влияние, эрозия почв, антропогенное воздействие, охрана окружающей среды

Природные условия. Бассейн реки Гумс расположен в юго-восточной части Чеченской Республики, в пределах Северо-Кавказской провинции, горной области Большого Кавказа Крымско-Кавказской горной страны. Река протекает с юго-востока на северо-запад [4], пересекая с юга на север Пастбищный хребет, Лесистый хребет и наклонную Чеченскую равнину. Бассейн реки Гумс характеризуется чередованием среднегорных, низкогорных и аккумулятивно-равнинных форм рельефа, а также постепенным снижением абсолютных высот с юга на север.

Поверхность территории бассейна реки Гумс в основном сложена молодыми породами кайнозойского возраста, включая все отделы неогеновой системы и нерасчленённые отложения антропогенной системы. Терский и Сунженский хребты состоят преимущественно из сланцеватых глин и песчаников неогеновой системы. Для равнинной части бассейна характерны молодые нерасчленённые отложения антропогенной системы, состоящие из глин, песков, галечников, гравия, и лёссовидных суглинков. В верховьях реки — в южной части территории бассейна — проходит полоса пород верхнемеловых отложений, представленных разноцветными мергелями и известняками [2, 3]. В геологическом отношении моложе северная часть бассейна.

Климат бассейна реки Гумс умеренный, мягкий, с коэффициентом увлажнения от 0,91 до 1,5. Годовое количество осадков изменяется от 500–600 мм на севере до 700–800 мм на юге, местами достигая 1000 мм и более. Значение коэффициента увлажнения здесь также увеличивается с севера на юг. Континентальность и сухость климата уменьшаются к югу [1, 3].

На севере — в равнинной части бассейна — преобладают луговые и лугово-чернозёмные почвы. Повышенные участки равнины заняты выщелоченными чернозёмами. Терско-Сунженская возвышенность покрыта чернозёмными почвами с отдельными включениями тёмно-каштановых почв. По речным долинам распространены лугово-болотные и аллювиальные почвы. Чёрные горы и нижние склоны пастбищного хребта заняты горнолесными почвами. Наиболее широкое распространение в горной части бассейна реки Гумс получили бурые лесные и бурые лесные остаточного-карбонатные почвы, бурые лесные вторично одернованные, бурые лесные оподзоленные и бурые лесные глеевые почвы. В бурых лесных почвах часто встречаются пятна болотных почв.

На северных влажных склонах почвы богаче перегноем, чем на южных сухих. На залесённых склонах широко распространены бурые горнолесные почвы. В речных долинах бассейна распространены луговые и лугово-болотные почвы [5].

Растительный покров бассейна реки Гумс весьма разнообразен, что обусловлено особенностями рельефа, климата и почв, характерных для разных частей его территории. Амплитуда гидротермических условий позволила сформироваться в пределах бассейна различным типам растительных сообществ.

Главный лесной фонд составляют буковые и буково-грабовые леса. Из хвойного леса в бассейне реки Гумс встречаются отдельные деревья тиса ягодного — самого долгоживущего растения Кавказа.

Дубовые леса не формируют единого пояса. На северном макросклоне Чёрных гор дубовые леса поднимаются до 500 м над уровнем моря и выше сменяются буковыми лесами. На склонах южной экспозиции дубовые леса могут подняться до 1500 м.

Промежуточное положение между дубовыми и буковыми лесами занимают грабовые леса. По требовательности к увлажнению граб находится в промежуточном положении между дубом и буком, но больше тяготеет к дубу, занимая при этом в основном склоны южной экспозиции.

Большую часть площади лесов в бассейне реки Гумс занимают буковые леса. Высотные пределы их распространения зависят главным образом от степени увлажнения местности.

Из плодовых деревьев и кустарников распространены груша кавказская, яблоня лесная, мушмула германская, свидина, алыча, шиповник и боярышник.

Особенности природно-климатических и почвенно-геоботанических условий способствовали образованию на территории бассейна реки Гумс азональных — горных и предгорных — ландшафтов. Они тяготеют к таким крупным орографическим единицам, как:

- Терско-Сунженская возвышенность (Гудермесский хребет) с прилегающими долинами и наклонная Чеченская равнина (в предгорной части);
- северный склон Большого Кавказа, представленный на территории республики Черногорской моноклиной, а также Пастбищным, Скалистым и Боковым хребтами.

В переходной зоне от равнин к горам, как и в горах, действует закон азональности и проявляется высотная геоботаническая поясность. Поэтому ландшафты предгорной зоны в условиях республики целесообразно рассматривать отдельно, как предгорные ландшафты. Ландшафты северного склона Большого Кавказа изначально сформировались как горные.

В предгорных ландшафтах республики, как и в горных, изменение климата и почвенно-геоботанических показателей связано с высотной поясностью, поэтому с ландшафтно-геоботанической точки зрения эти ландшафты больше тяготеют к горным, чем к равнинным. С другой стороны, здесь есть чёткое разделение территории на две части — равнинную, в целом возвышающуюся к югу, и холмисто-возвышенную. Они отличаются друг от друга устройством поверхности, климатом и почвенно-растительным покровом [4].

Геоэкологическое состояние. Год за годом всё острее становится проблема охраны и рационального использования водных ресурсов малых рек. Её актуальность определяется серьёзным нарушением стабильности развития природных экосистем. Происходит формирование новой природно-технической системы, и в период её становления сводится на нет эффективность затрат средств на охрану окружающей среды.

В настоящее время в недостаточной мере изучается негативное влияние на водные ресурсы бассейна реки Гумс. Антропогенное воздействие на его природные экосистемы усиливается из-за необоснованных вырубок лесов, прогрессирующей эрозии почв, связанной с неправильной распашкой, нарушениями видового состава фауны и флоры, игнорирования нормативов и нарушения границ водоохраной зоны и прибрежной полосы.

Водные ресурсы бассейна реки Гумс играют важную роль в жизни населения нескольких административных районов (Веденский, Курчалоевский, Гудермесский, Ножай-Юртовский и Шалинский) [4, 5], будучи используемыми для многочисленных хозяйственно-бытовых потребностей (как источник питьевой воды, а также для обводнения припойменных лугов и пастбищ, орошения садов, устройства водяных мельниц и т. д.).

Наблюдаемое в настоящее время истощение водных ресурсов в бассейне реки Гумс связано как с изменением климата, так и с хозяйственной деятельностью. Способствует ему и увеличение водопотребления на нужды населения. Истощение водных ресурсов реки вызывает нарушение

установившегося соотношения между площадями, занятыми лесами, древесно-кустарниковой и многолетней травянистой растительностью, с одной стороны и посевами однолетних сельскохозяйственных культур с другой. Распашка пойменных земель, а также вырубка древесно-кустарниковой растительности в бассейне реки и в прибрежной водоохранной зоне привели к резкому уменьшению меженного стока и к обмелению. В силу названных причин и вследствие всё более интенсивного отбора воды на хозяйственные нужды уменьшение меженного стока приводит к тому, что мезоформы рельефа русла, сформированные в период прохождения паводка, не могут быть реконструированы меженными потоками. Именно поэтому практически любой весенний, осенний или дождевой паводок вызывает затопление пойменных земель.

Из-за сокращения водности реки одновременно уменьшается уровень грунтовых вод, гидрологический связанных с рекой, поэтому возникает необходимость в орошении припойменных земель. Уменьшение водности ухудшает санитарное состояние реки по причине пониженной разбавляющей способности вод даже при неизменной концентрации вредных веществ в сбрасываемых водах.

Другой пласт геоэкологических проблем бассейна реки Гумс — загрязнение и засорение вод в результате хозяйственной деятельности. Для улучшения сложившейся ситуации необходимо провести комплексную геоэкологическую оценку состояния природных экосистем с отбором проб почв, растительности, воды и донных отложений.

Заключение. Геоэкологическое состояние бассейна реки Гумс формируется под воздействием сложного комплекса природных и антропогенных факторов. Ключевые выводы исследования:

- Бассейн реки характеризуется пересечённым рельефом и наличием пород со слабой сопротивляемостью размыву. Это предопределяет высокую интенсивность экзогенных процессов, включая оползневые явления и эрозию берегов.
- Река имеет паводковый характер, при котором максимальный вынос загрязняющих веществ в русло происходит в периоды половодья и ливневых паводков.
- Разнообразие почвенно-растительных поясов (от лесных до предгорно-луговых и лугово-степных) обеспечивает естественный потенциал самоочищения, который, однако, снижается при деградации почвенного покрова.
- Одной из главных экологических проблем является сброс недостаточно очищенных хозяйственно-бытовых вод в населённых пунктах вдоль течения реки. Близость животноводческих хозяйств и частных подворий в водоохраных зонах обуславливает поступление органических и биогенных загрязнителей (нитратов и фосфатов).
- Наличие стихийных свалок на берегах и в поймах приводит к вторичному загрязнению воды продуктами разложения мусора.

Современное геоэкологическое состояние бассейна реки Гумс можно охарактеризовать как умеренно напряжённое. Хотя природный каркас сохраняется, наблюдается тенденция ухудшения качества поверхностных вод и деградации малых притоков. Для оптимизации ситуации необходимо модернизировать коммунальную инфраструктуру и строго соблюдать режим водоохраных зон.

Работа выполнена в рамках поддержанного Минобрнауки РФ научного проекта «Динамика геоэкологического состояния бассейнов горных рек Северо-Восточного Кавказа, Азербайджана и Ирана в условиях изменения климата и растущей антропогенной нагрузки» (соглашение № 075-15-2023-592).

Список использованных источников

1. Агроклиматический справочник по Чечено-Ингушской АССР. Грозный : Чечено-Ингушское книжное изд-во, 1960. 128 с.
2. Атлас Чечено-Ингушской АССР. Москва : Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1978. 28 с.
3. 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. <https://elibrary.ru/tiwwcl>

4. Гайрабеков У. Т., Музаев И. Х. Структура и особенности ландшафтов бассейна реки Гумс // Геоэкологическая оценка бассейнов горных рек: теоретико-методологические и методические аспекты, региональные исследования : материалы II Международной научной конференции, Грозный, 25 декабря 2025 г. Грозный : ГГНТУ имени М. Д. Миллионщикова, 2025. С. 45–49. <https://elibrary.ru/fufqlz>
5. Музаев И. Х., Гайрабеков У. Т. Особенности формирования почвенного покрова бассейна реки Гумс // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа : материалы XV Международной научной конференции, Владикавказ, 06–08 октября 2025 г. Москва : ИИЕТ РАН, 2025. С. 595–598. <https://elibrary.ru/kogdpx>

УДК 502.3:504.054

Анализ загрязнения воздуха диоксидом серы (SO₂) в бассейне реки Эль-Аси (Оронт) в контексте вооружённого конфликта в Сирии (2019–2024 гг.)

Никифорова А. А.¹, Табунщик В. А.¹, Вышкваркова Е. В.¹, Горбунов Р. В.², Горбунова Т. Ю.¹,
Дрыгваль А. В.¹, Фам К. Н.¹, Келип А. А.¹

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

²Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

✉ nikiforova_a@ibss-ras.ru

Представлены результаты анализа пространственно-временного распределения диоксида серы (SO₂) в атмосферном воздухе в пределах трансграничного бассейна реки Эль-Аси (Оронт) на территории Ливана, Сирии и Турции за период с 2019 по 2024 г. на основе спутниковых данных Sentinel-5P (Copernicus) и ГИС-технологий. Установлено: максимальные концентрации SO₂ фиксируются в сирийской части бассейна (до 442 мкмоль·м⁻²), что связано с разрушением промышленной инфраструктуры, применением взрывчатых веществ и неконтролируемым сжиганием топлива в ходе вооружённого конфликта. Показано, что преобладающий западный перенос воздушных масс ограничивает трансграничное распространение SO₂ на территорию Ливана, но способствует выносу загрязнителей в восточном направлении. Значения комплексного индекса загрязнения атмосферы (КИЗА) для бассейна снизились за 2019–2024 гг. на 6–15 %, однако локальные очаги с высокими концентрациями SO₂ сохраняются. Результаты подчёркивают необходимость международного мониторинга качества воздуха в зонах военных конфликтов.

Ключевые слова: диоксид серы, SO₂, загрязнение воздуха, река Эль-Аси, река Оронт, военный конфликт в Сирии, Sentinel-5P, трансграничный бассейн, ГИС-анализ

Диоксид серы (SO₂), образующийся при сжигании серосодержащего ископаемого топлива, является одним из наиболее опасных загрязнителей атмосферы [8, 9, 11]. При наличии водяных паров SO₂ трансформируется в серную кислоту, вызывая кислотные дожди и нанося ущерб экосистемам и здоровью человека [10]. Бассейн реки Эль-Аси (Оронт) — единственный постоянный водоток Западной Азии, протекающий по территории Ливана, Сирии и Турции [5, 6]. Вооружённый конфликт в Сирии (с 2011 г.) привёл к масштабным разрушениям нефтеперерабатывающих заводов, электростанций и химических производств, что создало дополнительные эмиссии SO₂ [2]. Ранее анализ загрязнения воздуха в этом бассейне не проводился [5], что определяет актуальность настоящего исследования.

Исходным материалом послужили наборы данных Европейского космического агентства с миссии Copernicus Sentinel-5 Precursor, доступные через коллекции Google Earth Engine (GEE). Для SO₂ использована коллекция COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_SO2 [14]. Обработка включала фильтрацию по качеству, осреднение (месячные и годовые значения) и обрезку по границам бассейна реки Эль-Аси, полученным из цифровой модели рельефа NASADEM [12]. Проанализирован период с 2019 по 2024 г. Визуализация выполнена в ArcGIS 10.8. Дополнительно проведён контент-анализ СМИ для идентификации военных событий, влияющих на эмиссию SO₂ [3]. Также использованы данные о плотности населения LandScan [7] для оценки связи с антропогенной нагрузкой [9].

Пространственно-временной анализ показал существенные колебания концентраций SO₂ в пределах бассейна. В сирийской его части зафиксированы максимальные значения, до 442 мкмоль·м⁻², в турецкой — от 25 до 433 мкмоль·м⁻², в ливанской — от 0 до 322 мкмоль·м⁻² (табл. 1). Пиковые концентрации отмечены в 2021 г. для всех трёх стран, что связано с эскалацией боевых действий — с авиаударами по военным объектам в провинциях Хама и Идлиб и с обстрелами населённых пунктов Телль-эль-Мактал и Хамдания [2]. В 2024 г. также зафиксирован рост SO₂ — до 0,0005 мкмоль·м⁻² в Южном Ливане и прилегающих районах Сирии, что коррелирует с возобновлением интенсивных обстрелов и с использованием некачественного дизельного топлива в генераторах (по данным информгентств ANNA-news и «РИА Новости»).

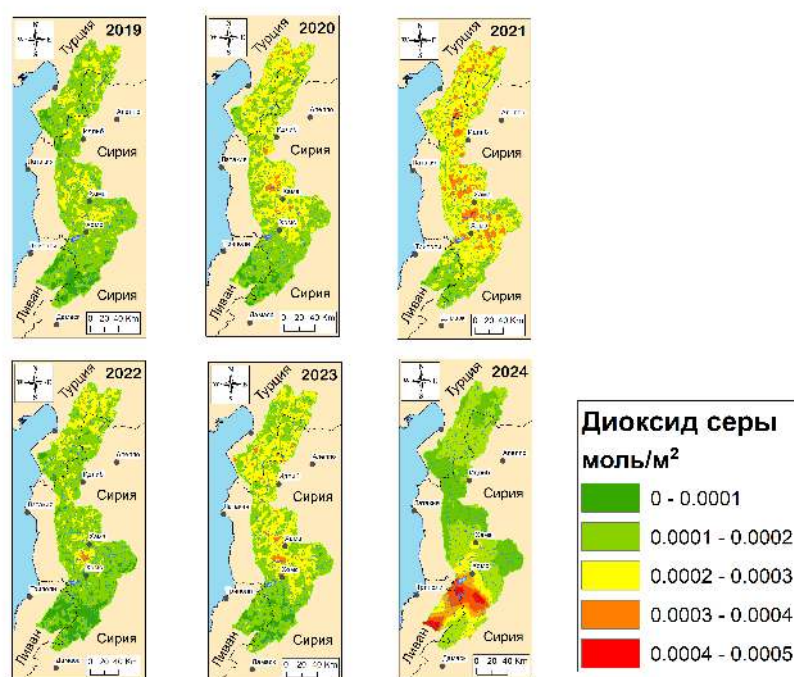


Рис. 1. Диапазоны концентраций SO_2 ($\text{мкмоль} \cdot \text{м}^{-2}$) в бассейне реки Эль-Аси (Оронт) за 2019–2024 гг.

Анализ циркуляции атмосферы показал преобладание западных и северо-западных ветров на большей части бассейна. Это препятствует переносу SO_2 из Сирии в Ливан, так как воздушные массы на юге встречают хребет Ливан и горную цепь Антиливан, отклоняясь на северо-восток и юго-восток. Соответственно, ливанская часть бассейна получает относительно чистый воздух со Средиземного моря, что объясняет наименьшие концентрации SO_2 . Напротив, в Турции, на Антиохийской равнине Амур, западные ветры приносят загрязнённые массы из внутренних районов Сирии, что приводит к высоким значениям SO_2 в отдельные годы.

Динамика комплексного индекса загрязнения атмосферы (КИЗА), рассчитанного по пяти веществам (включая SO_2) [13], демонстрирует общее снижение уровня загрязнения за период с 2019 по 2024 гг.: для всего бассейна зарегистрировано сокращение на 6 %, для Сирии — на 7 %, для Ливана — на 15 % (см. рис. 9 оригинальной статьи). Однако в Турции КИЗА остаётся стабильно повышенным (среднее значение составляет 5,16), что связано с высоким промышленным фоном и с отсутствием снижения выбросов SO_2 . Связь между плотностью населения и концентрацией SO_2 не прослеживается: в Сирии плотность населения выросла за 2019–2023 гг. с 160,1 до 190,1 тыс. чел. $\cdot \text{км}^{-2}$, а максимальные выбросы SO_2 пришлись на 2021 г., что указывает на доминирующую роль военных, а не демографических факторов (табл. 1).

Таблица 1. Диапазоны концентраций SO_2 ($\text{мкмоль} \cdot \text{м}^{-2}$) в бассейне реки Эль-Аси (Оронт) за 2019–2024 гг.

Страна	Год минимума	Минимум	Год максимума	Максимум	Среднее за период
Ливан	2022	–21	2021	322	127,3
Сирия	2019	0	2021	442	188,7
Турция	2024	29	2021	433	206,0

Примечание: отрицательное значение — артефакт спутниковых данных в условиях низких концентраций [14].

Полученные результаты согласуются с данными исследований влияния вооружённых конфликтов на качество воздуха: разрушение промышленной инфраструктуры и неконтролируемое сжигание топлива приводят к многократному росту выбросов SO_2 , NO_2 и твёрдых частиц [9, 13]. В отличие от бассейнов рек Крыма [12] или Западной Африки [4], где основным фактором выступает урбанизация, в бассейне Эль-Аси доминирует военный фактор. Отсутствие прямой корреляции с плотностью населения (см. табл. 1) подтверждает этот вывод. Циркуляционный механизм, ограничивающий трансграничный перенос SO_2 в Ливан, также важен для понимания региональной ответственности за загрязнение [5]. Снижение КИЗА в Сирии на 7 % при продолжающихся боевых действиях может объясняться сокращением промышленного производства из-за разрушений, а не реальным улучшением экологической ситуации.

Выводы. Военные действия в Сирии (2019–2024 гг.) привели к значительному увеличению выбросов диоксида серы в атмосферу бассейна реки Эль-Аси (Оронт). Максимальная зафиксированная концентрация SO_2 в сирийской части бассейна составила $442 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2}$ (2021 г.), что в 1,4–1,8 раза выше, чем в Ливане и Турции в то же время. Основными источниками являются разрушение нефтегазовых объектов (утечки и пожары), сжигание некачественного топлива в дизель-генераторах, применение взрывчатых веществ, а также лесные пожары, спровоцированные обстрелами. Преобладающий западный перенос воздушных масс ограничивает распространение SO_2 из Сирии в Ливан, что не снижает, однако, трансграничное загрязнение Турции. Значение комплексного индекса загрязнения атмосферы (КИЗА) в бассейне снизилось на 6–15 % за 2019–2024 гг., но локальные очаги с высокими концентрациями SO_2 сохранились, что обуславливает необходимость продолжения мониторинга. Результаты исследования могут быть использованы при разработке международных мер по снижению загрязнения воздуха в трансграничных регионах, затронутых военными конфликтами.

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).

Список использованных источников

1. Вольхин Д. А. Крым в фокусе информационного взаимодействия государств Причерноморского региона // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2018. Т. 4 (14), № 2. С. 40–46. <https://elibrary.ru/ykvotz>
2. Матвеев И. А. Сирия в конфликте / отв. ред. В. А. Кузнецов ; Ин-т востоковедения РАН. Москва : Институт востоковедения РАН, 2020. 496 с. <https://elibrary.ru/chgrmu>
3. Почепцов Г. Г. Имиджелогия. Москва : Рефл-бук ; Киев : Ваклер, 2006. 704 с. <https://elibrary.ru/qofsvz>
4. Табунщик В. А., Никифорова А. А., Линёва Н. П., Мирзоева Н. Ю., Чёрный Г. С., Керимов И. А., Махмудова Л. Ш., Гагаева З. Ш., Андрончик Я. О. Динамика типов наземного покрова в бассейне реки Эль-Аси (Оронт) в 2017–2022 гг. // Биоразнообразие и устойчивое развитие. 2023. Т. 8, № 3 (27). С. 40–55. <https://elibrary.ru/wgtrtj>
5. Conker A., Hussein H. Hydropolitics and issue-linkage along the Orontes River basin: An analysis of the Lebanon–Syria and Syria–Turkey hydropolitical relations. International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics, 2020, vol. 20, pp. 103–121. <https://doi.org/10.1007/s10784-019-09462-7>
6. Khouri L., Al-Mufti M. Assessment of surface water quality using statistical analysis methods: Orontes River (case study). Baghdad Science Journal, 2022, vol. 19, iss. 5, pp. 981–989. <https://doi.org/10.21123/bsj.2022.6262>

7. Lebakula V., Sims K., Reith A., Rose A., McKee J., Coleman P., Kaufman J., Urban M., Jochem C., Whitlock C., Ogden M., Pyle J., Roddy D., Epting J., Bright E. LandScan Global 30 arcsecond annual global gridded population datasets from 2000 to 2022. *Scientific Data*, 2025, vol. 12, art. 495 (16 p.). <https://doi.org/10.1038/s41597-025-04817-z>
8. Mirza A. I., Kazmi J. H., Shirazi S. A. Spatio-periodic monitoring and analysis of atmospheric sulphur dioxide (SO₂) in the metropolitan areas of Lahore – Pakistan. *Pakistan Journal of Science*, 2013, vol. 65, no. 1, pp. 83–89.
9. Nikiforova A., Tabunshchik V., Vyshkvarkova E., Gorbunov R., Gorbunova T., Drygval A., Pham C. N., Kelip A. Analysis of air pollution in the Orontes River basin in the context of the armed conflict in Syria (2019–2024) using remote sensing data and geoinformation technologies. *Atmosphere*, 2026, vol. 17, iss. 1, art. 115 (32 p.). <https://doi.org/10.3390/atmos17010115>
10. Popescu M., Popescu M. *Ecologie aplicată*. Editura Matrix Rom, București. 2000.
11. Rădulescu C. *Emisii poluante. Metode pentru reducerea acestora*. Editura Bibliotheca, Târgoviște. 2008.
12. 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. 3364 (25 p.). <https://doi.org/10.3390/rs15133364>
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. 1371 (34 p.). <https://doi.org/10.3390/atmos15111371>
14. Theys N., Hedelt P., De Smedt I., Lerot C., Yu H., Vlietinck J., Pedergrana M., Arellano S., Galle B., Fernandez D., Carlito C. J. M., Barrington C., Taisne B., Delgado-Granados H., Loyola D., Van Roozendaal M. Global monitoring of volcanic SO₂ degassing with unprecedented resolution from TROPOMI onboard Sentinel-5 Precursor. *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, art. 2643 (9 p.). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39279-y>
15. Youvan D. The Fragmentation of Syria: Geopolitical Implications and the Resurgence of Extremism. 2024. <https://doi.org/10.13140/rg.2.2.34897.24162>

УДК [582.28:57.017.044](470.21-751)

Минеральный состав и антиоксидантный статус высших грибов заповедника «Пасвик» и прилегающей территории

Плотникова У. Д.¹, Голубкина Н. А.², Хлебосолова О. А.¹, Кошеваров А. А.²

¹Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Россия

²Федеральный научный центр овощеводства, Одинцово, Россия

✉ plotnikova.u.d@yandex.ru

Представлены результаты исследования содержания тяжёлых металлов (Ni, Cu, Fe и Zn) и селена, а также антиоксидантного статуса семи видов высших грибов, собранных на территории заповедника «Пасвик» и в зоне влияния комбината «Печенганикель». Установлены высокие концентрации Ni и Cu в плодовых телах, видоспецифичность накопления элементов и корреляции между содержанием Se и полифенолов и антиоксидантной активностью. Выявлена защитная роль Se в условиях Cu-токсичности у видов рода *Leccinum*. Обоснована возможность использования грибов в качестве биоиндикаторов при мониторинге состояния особо охраняемых природных территорий.

Ключевые слова: заповедник «Пасвик», тяжёлые металлы, грибы, антиоксидантная активность, экологический мониторинг

Высшие грибы играют важную роль в поддержании устойчивости экосистем и обладают способностью к гипераккумуляции тяжёлых металлов [5]. В условиях антропогенного загрязнения это может создавать экологические риски для потребителей, несмотря на известные полезные свойства большинства съедобных грибов [5, 9]. Государственный природный заповедник «Пасвик» расположен вблизи зоны многолетнего воздействия выбросов диоксида серы и медно-никелевого загрязнения от комбината «Печенганикель», который функционировал до 2020 г. [4, 6]. Деятельность комбината негативно отразилась на прилегающих территориях — привела к деградации земель и обусловила крайне низкое содержание микроорганизмов в почвах.

Антиоксидантная система грибов, включающая полифенолы, полисахариды и селен, играет ключевую роль в их защите от окислительного стресса, вызванного загрязнением среды [3, 5]. Цель настоящего исследования — оценить особенности накопления Ni, Cu, Fe, Zn и Se, а также антиоксидантный статус грибов на территории заповедника «Пасвик» и прилегающих участков для обоснования их использования в программах экологического мониторинга особо охраняемых природных территорий.

Материал и методы. Исследования проведены в 2023–2024 гг. на территории Мурманской области вблизи границ Норвегии и Финляндии. Работа У. Д. Плотниковой выполнена в рамках ректорской программы поддержки молодёжной науки «Научный старт». Отбор проб семи видов грибов (*Armillaria mellea*, *Xerocomus illudens*, *Leccinum aurantiacum*, *Leccinum scabrum*, *Lactarius pubescens*, *Russula vesca* и *Lycoperdon molle*) проведён на семи участках, включая территорию заповедника «Пасвик» (точки 5 и 6), импактную зону вблизи комбината (точки 3 и 4) и фоновые территории (точка 7 — посёлок Раякоски, точка 1 — водопад Шуонийоки). Для каждого плодового тела отобраны образцы почвы из верхнего горизонта (3–20 см).

Содержание Ni, Cu, Fe и Zn определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии на спектрофотометре Shimadzu GFA-7000 в 3%-ных экстрактах HNO₃ из золы и почвы [5]. Концентрацию Se измеряли микрофлуориметрическим методом с 2,3-диаминонафталином на флуориметре «Флюорат-4М». Антиоксидантную активность (далее — АОА) оценивали методом редокс-титрования в этанольных экстрактах, содержание полифенолов устанавливали с использованием реактива Фолина — Чокалтеу колориметрическим методом [1]. Результаты выражали в мг эквивалента галловой кислоты на 1 г сухого веса (мг ГК·г⁻¹). Коэффициенты биологического накопления (далее — КБН) рассчитывали как отношение содержания элемента в грибе к его содержанию в почве [2].

Содержание органического вещества в почве определяли методом Тюрина (процедура Walkley–Black) [7]. Статистическую обработку данных проводили с применением дисперсионного анализа и теста множественных сравнений Дункана ($p < 0,05$) в программе SPSS v. 29.

Результаты и обсуждение. Анализ почвенных образцов выявил неравномерное распределение Ni и Cu в почвах на участках, прилегающих к медеплавильному комбинату. Наиболее высокие уровни зафиксированы как вблизи комбината, так и на территории заповедника «Пасвик», в посёлке Раякоски и у водопада Шуонийоки, расположенных далеко от источника эмиссии [5]. Содержание Fe и Se в почвах находилось в узких диапазонах — 166–233 и 0,170–0,259 мг·кг⁻¹ соответственно. Наименьшее содержание органического вещества (1,6 %) отмечено в точке 4 (6 км от комбината), характеризовавшейся низкими уровнями Zn, Ni и Cu и минимальным значением pH.

Содержание Ni в плодовых телах грибов варьировало от 0,43 до 39,7 мг·кг⁻¹ сухого веса, Cu — от 7,9 до 45,9 мг·кг⁻¹ сухого веса (табл. 1). Максимальные концентрации Ni (39,7 мг·кг⁻¹) и Cu (44,9 мг·кг⁻¹) зафиксированы у *R. vesca* в импактной зоне (точка 4, 6 км от комбината). Высокое содержание Cu (45,9 мг·кг⁻¹) и Se (0,91 мг·кг⁻¹) отмечено у *L. molle* на территории заповедника (точка 6).

Таблица 1. Содержание металлов и селена в грибах заповедника «Пасвик», мг·кг⁻¹ сухого веса

Вид	№ участка	Ni	Cu	Se
<i>Lactarius pubescens</i>	6	0,43	13,6	0,540
<i>Armillaria mellea</i>	6	1,60	16,3	0,240
<i>Leccinum aurantiacum</i>	4	47,60	31,8	0,642
<i>Russula vesca</i>	4	39,70	44,9	0,655
<i>Lycoperdon molle</i>	6	0,75	45,9	0,910

Сравнение содержания Ni, Fe, Cu и Zn в грибах и растениях, собранных в одной точке (точка 7, 65,7 км от комбината), подтверждает исключительно высокую аккумуляционную способность грибов, превышающую таковую у растений примерно в 10,5, 15,4, 91,9 и 29,6 раза соответственно [5]. Среди растений наиболее активными аккумуляторами Ni, Fe и Cu показали себя *Salix caprea* и *Calluna vulgaris*.

Расчёт КБН выявил аномально высокие значения для Cu (от 106 до 150) у *L. aurantiacum* и *R. vesca* в 6 км от комбината при низком содержании этого элемента в почве. Во всех исследованных грибах обнаружены повышенные уровни КБН для Zn (от 1,92 до 184) и Se (от 1,36 до 5,17). Наиболее высокие значения КБН для селена отмечены у *L. saccatum* (5,17), а самые низкие — у *A. mellea* (1,36) [5].

Что касается антиоксидантного статуса исследованных видов грибов, то в них выявлены широкие вариации АОА и содержания полифенолов. Наиболее высокие значения зафиксированы у *L. molle* — 92,0 и 29,2 мгГК·г⁻¹ соответственно. Доля полифенолов в общей АОА составляла от 31,7 % (у *Lycoperdon*) до 57,8 % (у *Leccinum aurantiacum*). Установлена тесная положительная корреляция между содержанием полифенолов и АОА ($r = 0,950$; $p < 0,001$), что подтверждает универсальный характер этого явления для наземных растений.

Выявлены положительные корреляции между содержанием Se и полифенолов и АОА ($r = 0,915 \dots 0,926$; $p < 0,001$), а также между АОА и КБН селена ($r = 0,916$; $p < 0,001$), что свидетельствует о существовании единой системы антиоксидантной защиты, включающей полифенолы, Se и, возможно, полисахариды [5, 11].

Для видов рода *Leccinum* — *L. aurantiacum* и *L. scabrum* — обнаружена отрицательная корреляция между содержанием Cu и Se ($r = -0,922$; $p < 0,002$) и между содержанием Cu и АОА ($r = -0,946$; $p < 0,001$), что указывает на существование защитного эффекта Se и антиоксидантов против токсичности меди [5, 8].

Оценка рисков употребления грибов показала, что употребление 30 г сухих грибов *R. vesca*, собранных вблизи комбината, может превышать рекомендуемую суточную дозу по Ni в 3,4 раза, а *L. scabrum* из района водопада Шуонийоки — в 1,3 раза. Превышений по Cu не зафиксировано.

Относительно высокие концентрации Se (10–40,3% от рекомендуемой суточной нормы потребления) могут рассматриваться как благоприятные для здоровья благодаря антагонистическим отношениям между Se и тяжёлыми металлами [10].

Закключение. Полученные данные подтверждают активное участие Se в антиоксидантной защите арктических грибов, что выражается в положительных корреляциях между антиоксидантным статусом, содержанием полифенолов и Se, а также в отрицательных корреляциях между Se и Cu и антиоксидантной активностью и Cu у видов рода *Leccinum*. Выявленная низкая пригодность использования коэффициентов биологического накопления для оценки аккумуляционной способности грибов в отношении Cu, Ni и Zn на территориях с неравномерным распределением элементов в почве требует осторожности при интерпретации этих показателей. Риски для здоровья, связанные с потреблением дикорастущих грибов, могут быть ассоциированы как с зоной влияния комбината, так и с удалёнными территориями с естественно высоким содержанием тяжёлых металлов в южной части заповедника «Пасвик», в посёлке Раякоски и районе водопада Шуонийоки. Виды *Russula vesca* и *Lycoperdon molle* могут быть рекомендованы в качестве приоритетных биоиндикаторов для включения в программы ежегодного мониторинга состояния заповедника «Пасвик».

Список использованных источников

1. Голубкина Н. А., Кекина Х. Г., Молчанова А. В., Антошкина М. С., Надежкин С. М., Солдатенко А. В. Антиоксиданты растений и методы их определения. Москва : Инфра-М, 2020. 181 с. <https://doi.org/10.12737/1045420>
2. Alonso J., García M. A., Pérez-López M., Melgar M. J. The concentrations and bioconcentration factors of copper and zinc in edible mushrooms. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2003, vol. 44, iss. 2, pp. 0180–0188. <https://doi.org/10.1007/s00244-002-2051-0>
3. Asgher M., Rehaman A., Nazar ul Islam S., Arshad M., Khan N. A. Appraisal of functions and role of selenium in heavy metal stress adaptation in plants. Agriculture, 2023, vol. 13, iss. 5, art. 1083 (21 p.). <https://doi.org/10.3390/agriculture13051083>
4. Evdokimova G. A., Mozgova N. P., Korneikova M. V. The content and toxicity of heavy metals in soils affected by aerial emissions from the Pechenganikel plant. Eurasian Soil Science, 2014, vol. 47, iss. 5, pp. 504–510. <https://doi.org/10.1134/s1064229314050044>
5. Golubkina N., Plotnikova U., Koshevarov A., Sosna E., Hlebosolova O., Polikarpova N., Murariu O. C., Tallarita A. V., Caruso G. Nickel, Cu, Fe, Zn, and Se accumulation, and the antioxidant status of mushrooms grown in the Arctic under Ni/Cu pollution and in unpolluted areas. Stresses, 2025, vol. 5, iss. 2, art. 25 (14 p.). <https://doi.org/10.3390/stresses5020025>
6. Hansen M. D., Nøst T. H., Heimstad E. S., Evenset A., Dudarev A. A., Rautio A., Myllynen P., Dushkina E. V., Jagodic M., Christensen G. N., Anda E. E., Brustad M., Sandanger T. M. The impact of a nickel-copper smelter on concentrations of toxic elements in local wild food from the Norwegian, Finnish, and Russian border regions. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, vol. 14, iss. 7, art. 694 (16 p.). <https://doi.org/10.3390/ijerph14070694>
7. Nelson D. W., Sommers L. E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: Methods of Soil Analysis / A. L. Page, R. H. Miller, D. R. Keeney (Eds). Madison : Soil Science Society of America, 1982, ch. 2, pp. 539–579. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed>
8. Park K.-H., Park Y.-D., Lee J.-R., Hahn H.-S., Lee S.-J., Bae C.-D., Yang J.-M., Kim D.-E., Hahn M.-J. Inhibition kinetics of mushroom tyrosinase by copper-chelating ammonium tetrathiomolybdate. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – General Subjects, 2005, vol. 1726, iss. 1, pp. 115–120. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2005.06.010>

9. Phillips J. M., Ooi S. L., Pak S. C. Health-promoting properties of medicinal mushrooms and their bioactive compounds for the COVID-19 era – an appraisal: Do the pro-health claims measure up? *Molecules*, 2022, vol. 27, iss. 7, art. 2302 (19 p.). <https://doi.org/10.3390/molecules27072302>
10. Schrauzer G. N. Selenium and selenium-antagonistic elements in nutritional cancer prevention. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2009, vol. 29, iss. 1, pp. 10–17. <https://doi.org/10.1080/07388550802658048>
11. Singh P., Singh A., D'Souza L. M., Roy U., Singh S. M. Chemical constituents and antioxidant activity of the Arctic mushroom *Lycoperdon molle* Pers. *Polar Research*, 2012, vol. 31, art. 17329 (10 p.). <https://doi.org/10.3402/polar.v31i0.17329>

УДК 504.454+504.4.054

Оценка стока соединений минерального фосфора и трофности воды в нижнем течении реки Кубань

Решетняк О. С.

Институт наук о Земле Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, Россия

✉ osreshetnyak@sfedu.ru

Проанализирована изменчивость содержания в речных водах минерального фосфора в нижнем течении реки Кубань и дана оценка уровня трофности речных экосистем. Установлено, что большинство участков в нижнем течении характеризуются мезотрофным состоянием. Приведены данные о химическом стоке минерального фосфора и показано, что с 2012 г. происходит увеличение значений. Среднегодовое значение стока минеральных форм фосфора в дельте Кубани составило 0,131 тыс. т·год⁻¹, что ниже значений выноса фосфора основными дельтовыми рукавами в Азовское море в более ранние периоды.

Ключевые слова: река Кубань, химический сток, минеральный фосфор, трофность воды

Поступление растворённых химических веществ с речным стоком в устьевые области рек и в прибрежные морские акватории России является одним из основных факторов формирования их гидрохимического режима [3, 7] и возможной трансформации экологического состояния устьевой экосистемы Кубани в условиях высокой антропогенной нагрузки [5, 8].

Река Кубань имеет важное народно-хозяйственное значение для юга европейской части России: в бассейне сосредоточены естественные нерестилища ценных промысловых рыб и крупнейший в стране рисовый массив [5]. При этом объём безвозвратного водопотребления остаётся высоким, в некоторые годы достигая 60 % годового стока [6], что негативно сказывается на состоянии речной экосистемы в целом.

Поступление биогенных веществ с водосборной территории в речные воды Кубани является одной из причин их загрязнения и обуславливает усиление процесса эвтрофирования. Особенно высока вероятность этого в равнинной части бассейна реки, где более развита сельскохозяйственная деятельность. При распашке земель увеличивается вынос со склоновым стоком соединений азота и фосфора, что усиливает общую биогенную нагрузку, связанную с влиянием точечных и диффузных источников загрязнения в пределах городских территорий.

Максимальная нагрузка приходится на устьевую область реки, принимающую воды с огромной водосборной территории. Как было показано ранее [8], в наибольших количествах с речным стоком в устьевую область реки Кубань поступают соединения азота нитратного, азота аммонийного, легкоокисляемых органических веществ (по БПК₅), нефтепродуктов и соединений железа, среднегодовые значения стока которых значительно превышают ПДК. Это может приводить к нарушению естественного равновесия между абиотической и биотической составляющими, менять трофность и снижать устойчивости устьевой экосистемы.

Все эти аспекты обуславливают актуальность настоящего исследования, цель которого — анализ динамики стока соединений минерального фосфора и оценка трофности воды в нижнем течении реки Кубань.

Источником информации послужили данные государственной наблюдательной сети Росгидромета за период с 2008 по 2020 г. Расчёт водного и химического стока выполнен на основе многолетних данных из Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов и базы данных «Химический сток реки Кубань (многолетние данные)» [1, 2]. В настоящей работе использованы сведения о содержании в воде неорганических соединений фосфора (фосфатов и полифосфатов в сумме — фосфор минеральный), определяемых фотометрическим методом на сети Росгидромета согласно РД 52.24.382-2006.

Расчёт химического стока неорганических соединений фосфора проводился для следующих участков нижнего течения:

- 1) река Кубань — город Краснодар (выше города и ниже города);
- 2) река Кубань — хутор Тиховский (в черте хутора);
- 3) рукав Кубань — город Темрюк (выше города и ниже города);
- 4) рукав Протока — город Славянск-на-Кубани (выше города и ниже города);
- 5) рукав Протока — станица Гривенская (в черте станицы);
- 6) рукав Протока — хутор Слободка (в черте хутора);
- 7) рукав Казачий Ерик — хутор Дубовый Рынок.

Характерной особенностью реки Кубань является её расположение в различных природно-климатических условиях, что формирует специфические гидролого-морфологические и гидрохимические различия отдельных её частей. В связи с особенностями режима питания реки на разных участках ионный состав и минерализация воды Кубани претерпевают ряд изменений [5]. Так, в период с 2000 по 2010 г. существенно варьируют значения ионов и минерализация воды в целом, наблюдается тенденция к снижению их содержания в равнинной части реки (в нижнем течении Кубани). Было показано, что по содержанию органических и фосфорсодержащих веществ отдельные участки реки находятся в переходном состоянии от олиготрофного к мезотрофному и даже к эвтрофному. Наиболее высокий уровень трофности был характерен в этот период для участка ниже города Краснодар (мезотрофный — по содержанию в речных водах минерального фосфора, эвтрофный — по содержанию общего фосфора) [5].

Результаты исследования. В продолжение этих изысканий нами были обобщены многолетние данные (за 2008–2020 гг.) о содержании неорганических форм соединений фосфора в воде и проведена оценка трофности на отдельных участках нижнего течения реки Кубань (табл. 1). Трофность речных экосистем в нижнем течении стабилизировалась на уровне «мезотрофный», за исключением участка выше и ниже города Краснодара. Примечательно, что на участке выше города уровень трофности соответствует олиготрофному водоёму по среднеемноголетнему содержанию минерального фосфора в воде, а ниже города — эвтрофному, что указывает на влияние зарегулированности речного стока Краснодарским водохранилищем.

Общие диапазоны и среднеемноголетние значения содержания минерального фосфора в воде на участке хутора Тиховского и ниже в дельте изменяются в узких пределах и в общем составляют $0,002\text{--}0,043\text{ мг}\cdot\text{дм}^{-3}$ и $0,012\text{ мг}\cdot\text{дм}^{-3}$ соответственно. Такое постоянство значений может указывать на сформировавшийся региональный уровень содержания в речных водах неорганических форм фосфора (ориентировочный региональный фон — $0,012\text{ мг}\cdot\text{дм}^{-3}$) после снижения в 1990-х гг. и роста в последние десятилетия объёмов вносимых на сельскохозяйственные поля минеральных удобрений [10].

Для оценки годового химического стока соединений неорганического фосфора (минерального фосфора) проведены расчёты среднегодовых концентраций и определён годовой водный сток по данным о суточных расходах [1] для каждого исследуемого участка нижнего течения реки Кубань. Расчёт химического стока минерального фосфора выполнен прямым методом на основе данных о концентрациях компонента в речной воде и водном стоке за определённый период согласно формуле:

$$G = \sum_{i=1}^m W_i \bar{C}_i \quad (1)$$

где G — количество перенесённого вещества за расчётный период, тыс. т;

m — число интервалов расчётного периода;

W_i — объём стока воды за i -й интервал расчётного периода, км³;

$\bar{C}_i$ — средняя концентрация вещества за i -й интервал расчётного периода, мг·дм⁻³.

Таблица 1. Многолетние данные о содержании неорганических соединений фосфора в воде на отдельных участках нижнего течения реки Кубань (2008–2020 гг.)

Участок нижнего течения	Количество измерений	Концентрация, мг Р·дм ⁻³	Уровень трофности (Thomas, 1959 по [4])
Река Кубань — выше города Краснодара	156	от н. о. до 0,152 0,007	олиготрофный
Река Кубань — ниже города Краснодара	156	от н. о. до 0,190 0,025	эвтрофный
Река Кубань — хутор Тиховский	156	0,003–0,032 0,012	мезотрофный
Рукав Кубань — выше города Темрюка	156	0,003–0,041 0,012	мезотрофный
Рукав Кубань — ниже города Темрюка	156	0,003–0,043 0,012	мезотрофный
Рукав Протока — выше города Славянска-на-Кубани	78	0,002–0,031 0,011	мезотрофный
Рукав Протока — ниже города Славянска-на-Кубани	78	0,002–0,033 0,012	мезотрофный
Рукав Протока — станица Гривенская	78	0,004–0,037 0,012	мезотрофный
Рукав Протока — хутор Слободка	78	0,005–0,040 0,013	мезотрофный
Рукав Казачий Ерик — хутор Дубовый Рынок	78	0,005–0,038 0,016	мезотрофный

Примечание: в числителе — диапазон значений концентраций за 2008–2020 гг.; в знаменателе — среднемноголетнее значение содержания в воде минерального фосфора.

Результаты расчёта представлены в табл. 2. Анализируя временную динамику стока минерального фосфора, можно отметить, что на всех участках происходил рост значений до 2010 г., за ним следовал резкий спад в 2012 г., а после формировался возрастающий тренд или происходила стабилизация значений.

Анализ динамики стока соединений неорганического фосфора (тыс. т) на отдельных участках нижнего течения реки Кубань за период с 2008 по 2020 г. позволил выделить следующие особенности:

- в межгодовой изменчивости стока соединений минерального фосфора для исследуемых участков отмечается их высокая зависимость от водного стока;
- формируется чёткая тенденция к увеличению стока минерального фосфора после 2012 г. в основных дельтовых рукавах (на участках рукав Кубань — город Темрюк и рукав Протока — хутор Слободка);
- на участок рукав Протока — хутор Слободка соединения минерального фосфора поступают в больших объёмах (52 %), чем в рукав Кубань в районе города Темрюка (48 %), а значит, большее их количество будет вынесено в прибрежные акватории Азовского моря.

За 2008–2020 гг. среднемноголетнее значение стока минеральных форм фосфора на исследуемых участках дельты Кубани (то, что выносится основными дельтовыми рукавами в Азовское море) составило примерно 0,131 тыс. т·год⁻¹, что значительно ниже значений, приведённых за более ранний период в работах [8, 9]. Можно сделать предположение о снижении биогенной нагрузки фосфором на прибрежные акватории Азовского моря со стороны речного стока Кубани в начале XXI в.

Таблица 2. Динамика стока соединений неорганического фосфора (тыс. т)
на отдельных участках нижнего течения реки Кубань (2008–2020 гг.)

Год	Река Кубань — город Краснодар	Рукав Кубань — город Темрюк	Рукав Протока — город Славянск- на-Кубани	Рукав Протока — хутор Слободка	Рукав Казачий Ерик — хутор Дубовый Рынок
2008	0,319	0,033	0,050	0,047	0,003
2009	0,140	0,075	0,064	0,070	0,005
2010	0,042	0,097	0,095	0,098	0,006
2011	0,039	0,070	0,102	0,107	0,005
2012	0,020	0,037	0,033	0,039	0,002
2013	0,020	0,045	0,034	0,048	0,003
2014	0,053	0,065	0,068	0,064	0,004
2015	—	0,046	—	0,046	—
2016	—	0,060	0,060	0,068	0,003
2017	—	0,058	0,062	0,069	0,003
2018	—	0,081	0,070	0,068	0,004
2019	—	0,058	0,065	0,068	0,003
2020	—	0,066	—	0,071	—
Среднее значение	0,090	0,061	0,064	0,066	0,004

Заключение. По результатам проведённого исследования можно сделать следующие выводы:

1. По содержанию в речных водах минерального фосфора в нижнем течении реки Кубань уровень трофности речных экосистем соответствует категории мезотрофного водного объекта. Отмечено постоянство значений среднесезонных концентраций неорганических соединений фосфора (минерального фосфора) в воде на участке хутора Тиховского и ниже в дельте на уровне $0,012 \text{ мг} \cdot \text{дм}^{-3}$, что ориентировочно можно использовать в качестве регионального фона для геохимических исследований.
2. В межгодовой изменчивости стока соединений минерального фосфора отмечается их высокая зависимость от водного стока и формирование тенденции к увеличению после 2012 г. в основных дельтовых рукавах Кубани. При этом среднесезонное значение стока минеральных форм фосфора в дельте Кубани составило $0,131 \text{ тыс. т} \cdot \text{год}^{-1}$, что значительно ниже значений выноса фосфора основными дельтовыми рукавами в Азовское море в более ранние периоды.

Полученные результаты имеют важное прикладное значение и могут быть использованы при оценке биогенной нагрузки и влияния речных кубанских вод на состояние прибрежных акваторий Азовского моря, а также при разработке экологически обоснованных рекомендаций по улучшению состояния реки Кубань.

Список использованных источников

1. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> [дата обращения 20.11.2024].
2. Химический сток реки Кубань (многолетние данные) : база данных. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022621180 от 24.05.2022. Авт.: О. С. Решетняк, Р. С. Комаров. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрохимический институт». <https://elibrary.ru/ouyxuw>
3. Брызгало В. А., Никаноров А. М., Решетняк О. С. Изменчивость экологического состояния речных зон устьевых экосистем крупных рек России // Вода: химия и экология. 2013. № 12 (65). С. 15–21. <https://elibrary.ru/rpyduf>
4. Дмитриев В. В., Фрумин Г. Т. Экологическое нормирование и устойчивость природных систем : учебное пособие. Санкт-Петербург : Наука, 2004. 294 с. <https://elibrary.ru/qkndrp>

5. Кондакова М. Ю., Решетняк О. С., Лебедева И. В. Экологическое состояние р. Кубань в новом тысячелетии // Техносферная безопасность, надёжность, качество, энерго- и ресурсосбережение : материалы международной научно-практической конференции. Вып. XIV: в 3 т. Т. 2. Ростов-на-Дону : РГСУ, 2012. С. 165–174.
6. Лурье П. М., Панов В. Д., Ткаченко Ю. Ю. Река Кубань: гидрография и режим стока. Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 2005. 498 с. <https://elibrary.ru/qkfysv>
7. Никаноров А. М., Брызгало В. А., Косменко Л. С., Кондакова М. Ю., Решетняк О. С. Роль речного притока растворённых химических веществ в антропогенной трансформации состояния водной среды устьевой области р. Волга // Вода: химия и экология. 2010. № 7 (25). С. 6–12. <https://elibrary.ru/muqhqd>
8. Никаноров А. М., Брызгало В. А., Косменко Л. С., Кондакова М. Ю. Динамика притока растворённых химических веществ и антропогенная нагрузка на устьевую область р. Кубань // Вода: химия и экология. 2011. № 9 (39). С. 9–16. <https://elibrary.ru/oamdzf>
9. Сорокина В. В., Бердников С. В. Биогенная нагрузка Дона и Кубани на экосистему Азовского моря // Водные ресурсы. 2018. Т. 45, № 6. С. 670–684. <https://doi.org/10.1134/s0321059618060147>
10. Шафран С. А. Динамика применения удобрений и плодородие почв // Агрохимия. 2004. № 1. С. 9–17. <https://elibrary.ru/omhekr>

УДК 556.535(282.247.415.38)

Динамика уровня воды в реке Чусовая в Свердловской области

Скок Н. В., Юровских А. М.

Уральский государственный педагогический университет, Екатеринбург, Россия

✉ skok-nv-gbf@mail.ru

Рассмотрена динамика уровня воды в реке Чусовая на территории Свердловской области, выделены и описаны основные этапы трансформации водного режима под влиянием природных и антропогенных факторов. Представлены характеристики гидрологического режима реки, включая сезонные колебания и влияние рельефа. Особое внимание уделено последствиям строительства водохранилищ и межбассейновой переброски стока для водоснабжения Екатеринбурга и промышленных территорий. Отмечена актуальность дальнейшего изучения долгосрочных тенденций изменения водности в контексте климатических изменений и управления водными ресурсами.

Ключевые слова: Чусовая, Свердловская область, водоснабжение, уровень воды, водохранилище

Река Чусовая занимает особое место в природе и экономике Среднего Урала. На пределы Свердловской области приходится значительная часть течения, 427 км, при общей длине 592 км; река пересекает водораздельный хребет Уральских гор [11]. На протяжении нескольких столетий Чусовая играла ключевую роль в хозяйственном освоении Урала, выступая главной транспортной артерией горнозаводской промышленности. В XX в. были построены крупные водохранилища, обеспечившие питьевое водоснабжение Екатеринбурга и ближайших промышленных территорий. К настоящему времени гидрологический режим реки претерпел значительные изменения, обусловленные как естественными факторами, так и антропогенным воздействием. Целью настоящей работы является реконструкция исторической динамики водности реки Чусовой и выявление основных факторов, определяющих её современное состояние.

Гидрологические характеристики реки Чусовая в разных частях течения несколько отличаются: скорость течения, например, варьирует от $0,9 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ в верховьях до $0,3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ в устье. Средний расход воды при входе в залив Камского водохранилища составляет $226 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ [11]. Динамика потока демонстрирует зависимость течения от рельефа с ускорением на порожистых участках. Ледостав приходится на ноябрь, ледяной покров сохраняется до апреля, отмечаются весеннее половодье и высокие дождевые паводки в тёплый период года. Режим реки Чусовая в границах Свердловской области существенно трансформирован гидротехническими сооружениями, включая Верхнемакаровское и Волчихинское водохранилища. Морфологический облик долины претерпевает закономерные изменения, спектр которых — от залесённых и заболоченных ландшафтов в верховьях до появления многочисленных скальных обнажений в среднем течении. При этом питание реки осуществляется за счёт развитой сети притоков, наиболее крупные из которых — Ревда, Шишим, Серебрянка и Межевая Утка [11].

Эти характеристики сделали Чусовую одновременно и удобной, и опасной транспортной артерией: глубокая вода появлялась в короткий интервал половодья, после чего судоходные условия быстро ухудшались. Нами выделены этапы трансформации водного режима реки Чусовая (табл. 1).

Условно-естественное состояние реки Чусовой до интенсивного горнозаводского освоения можно охарактеризовать как режим, в котором уровень воды определялся главным образом снегозапасами, сроками вскрытия реки и количеством летних осадков. Уже этот этап создавал предпосылки для антропогенной трансформации: река обладала высоким потенциалом весной, но не имела устойчивого круглогодичного уровня воды для судоходности. Именно поэтому хозяйственное освоение бассейна в XVIII в. пошло не по пути непрерывного судоходства, а по пути кратковременного использования половодья и искусственных выпусков воды из заводских прудов.

Таблица 1. Этапы изменения водного режима р. Чусовая в Свердловской области

№	Этап	Временные рамки	Характеристика этапа	Режим реки
1	Естественный	до XVIII в.	Сохранность естественной структуры стока; снеговое питание; весеннее половодье; летние дождевые паводки; отсутствие крупных гидро-сооружений	Высокое весеннее половодье; летняя и зимняя межени; зависимость уровня от снего-запасов и осадков
2	Горнозаводской	1703–1878 гг.	Строительство небольших заводских прудов на притоках реки; отправка «железных караванов»; расчистка фарватера; зависимость судоходства от половодья. Общее количество барок в рекордные годы доходило до 90	Искусственное кратковременное повышение уровня за счёт спуска воды из заводских прудов для проводки барок. Водный вал достигал высоты 2–2,5 м
3	Постсудоходный	С 1878 г. по 1940-е гг.	Снижение роли речного транспорта после открытия в 1878 г. Уральской горнозаводской железной дороги; прекращение движения караванов; отказ от постоянной поддержки судоходного уровня воды	Снижение значения сезонных пропусков воды; переход к проектам межбассейнового перераспределения стока
4	Гидротехнический	С 1940-х гг. по 1970-е гг.	Строительство Волчихинского и Верхнемакаровского водохранилищ, канала река Чусовая — река Решётка — река Исеть — Верх-Исетское водохранилище	Локальный рост уровней воды в зонах подпора и перевод части стока в режим регулируемого водоснабжения. Затопление части поймы; уменьшение естественной водности русловых участков ниже узла регулирования
5	Современный, регулируемый	С 1970-х гг.	Межбассейновая переброска из Нязепетровского водохранилища; питьевой водозабор; маловодные годы; загрязнение и рекреационная нагрузка на русло и водохранилища	Периодические эксплуатационные колебания уровня; обсыхание мелководий; зависимость уровня воды от маловодных лет и от работы системы водоснабжения

Первые упоминания о реке Чусовой в русских летописях относятся к 1396 г. [1], но решающее воздействие на водность в пределах нынешней Свердловской области началось в эпоху горнозаводского освоения. С 1703 г. река Чусовая почти на два века стала главным транспортным путём вывоза уральского металла в европейскую часть страны. По данным открытых исторических обзоров, около половины уральских заводов отправляли свою продукцию по реке Чусовой, а длина маршрута сплава от Ревдинской пристани до Камы достигала 420 км [2]. Весеннее половодье поднимало воду на 2–4 м и сохранялось 2–3 недели, что создавало очень узкий временной коридор для массового движения барок [8].

Принцип регулирования уровня воды в реке Чусовой тогда был не таким, как в эпоху крупных водохранилищ. Для проводки тяжело гружённых барок в период весеннего сплава открывали плотины заводских прудов, искусственно увеличивая уровень воды на нужный срок [2]. Такая практика долгое время усиливала судоходные возможности реки, но не меняла её природную сезонность: сплав барок всё равно оставался привязанным к половодью, а межень продолжала ограничивать навигацию.

Одновременно транспортный этап выявил обратную сторону «высокой воды». На узких и скалистых участках в горной полосе быстрое половодье делало проводку караванов опасной: суда разбивались о камни-бойцы и садились на мели; более того, в годы неудачного сочетания

снеготаяния и дождей уровень мог подняться настолько резко, что движение становилось практически невозможным [2].

Переломным моментом стал 1878 г.: была введена в эксплуатацию Уральская горнозаводская железная дорога Пермь — Кушва — Нижний Тагил — Екатеринбург. После этого транспортное значение реки Чусовой стало снижаться. В начале XX в. заводские караваны уже не проводились; по реке проходили лишь отдельные барки с хлебом и продовольствием. Последние заводские барки, согласно краеведческим сводкам, прошли в 1920-е гг. [3].

Однако интерес к Чусовой не исчез. Напротив, в начале XIX в. предпринимались попытки соединить бассейны Чусовой и Исети, но строительство первого канала было остановлено из опасения, что Чусовая может обмелеть и стать непригодной для сплава [7]. Ключевым фактором оказалось то, что бассейн реки Чусовой расположен гипсометрически выше бассейна реки Исеть.

Новый этап начался в 1940-х гг. со строительством Волчихинского водохранилища. Если в заводскую эпоху вода выпускалась ради короткого транспортного окна, то теперь её стали аккумулировать для хозяйственно-питьевого и промышленного водоснабжения Екатеринбургского промузла. В те же 1940-е гг. был создан канал Чусоводстрой, река Чусовая — река Исеть, по которому воду начали перебрасывать в эту систему [4, 9]. В зоне подпора уровень воды вырос, образовалась большая акватория, были затоплены части поймы и болотных участков. Однако ниже узла регулирования естественная динамика водного потока ослабла: часть стока стала сезонно перераспределяться, а характер паводковых колебаний начал сглаживаться.

Следующим шагом стало создание Верхнемакаровского водохранилища в 1964–1965 гг. Оно заполнилось через 10 лет, было включено в общий каскад с Волчихинским и стало резервным водоёмом для водоснабжения Екатеринбурга [5]. Важнейшей особенностью нового этапа было то, что уровень воды стал определяться не только естественным стоком, но и межбассейновой переброской воды. Верхнемакаровское водохранилище накапливает также воду, подаваемую по системе Уфа — Чусовая из Нязепетровского водохранилища через насосные станции [5]. Идея переброски воды по системе каналов с использованием насосных станций возникла в череду засушливых годов, с 1973 по 1976 г. Этот шаг стал ответом на дефицит водных ресурсов и был обусловлен необходимостью обеспечения устойчивого водоснабжения Екатеринбурга и прилегающих территорий.

С введением каскада возник режим эксплуатационных колебаний, ранее нехарактерный для реки, — периодическое понижение уровня летом, обсыхание мелководных участков и берегов, появление островов, а также образование обширных наледей зимой вследствие интенсивной сработки воды. Регулируемый режим повышает надёжность водоснабжения, но высокая уязвимость этой системы особенно отчётливо проявляется в маловодные годы. Так, в 2010 г. минимум осадков вызвал дефицит воды, и Верхнемакаровское водохранилище значительно уменьшило свою площадь, а его дно местами обнажилось и заросло растительностью [6]. В 2017 г. из-за скудного весеннего половодья и снижения естественной приточности в Верхнемакаровское водохранилище вместо расчётных 4 млн м³ воды в месяц поступало не более 1 млн м³, что потребовало продолжения перекачки воды из Челябинской области [10]. Таким образом, на современном этапе в зоне водохранилищ уровень поддерживается или, напротив, резко понижается в зависимости от задач водоснабжения. На отдельных русловых участках ниже узлов регулирования проявляется относительное уменьшение естественной водности.

Экологическое состояние реки в пределах Свердловской области оценивается как напряжённое вследствие интенсивного техногенного воздействия Первоуральско-Ревдинского промышленного узла, где в реку Чусовую и её притоки сбрасывают стоки более чем 20 крупных промышленных предприятий. Гидрохимические показатели фиксируют стабильное превышение гигиенических нормативов по марганцу и меди, а также критические концентрации специфического загрязнителя — шестивалентного хрома (до 34 ПДК), что определяет специфику миграции тяжёлых металлов в речной системе [3, 11].

Проведённый анализ динамики уровня воды в реке Чусовая на территории Свердловской области выявил сложный характер изменений, определяемый как природными факторами, так и выраженным антропогенным воздействием в разные исторические периоды. Для речного бассейна это означает

переход от естественного режима к техногенно-управляемому водному комплексу, устойчивость которого определяется уже не только гидрологией, но и качеством природоохранного менеджмента. Представляется актуальным изучение долгосрочных тенденций в контексте региональных климатических изменений и моделирование сценариев развития гидрологической ситуации с учётом перспективного антропогенного воздействия, что позволит лучше понять процессы формирования уровня воды.

Список использованных источников

1. Архипова Н. П. Река Чусовая // Заповедные места Свердловской области. Свердловск, 1984. С. 56–61.
2. Акифьева Н. В. Железные караваны на Чусовой. Екатеринбург : Банк культурной информации, 2013. 187 с.
3. Попов А. Н., Павлюк Т. Е., Мухутдинов Б. Ф., Загайнова Е. В., Пылыгалов А. С., Сандалова В. В., Бутакова Е. А., Ушакова О. С. Исследование состояния водоёма для выбора приоритетных действий по экологической реабилитации (на примере Волчихинского водохранилища) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2019. № 4. С. 170–195. <https://elibrary.ru/idmrzj>
4. Клименко Д. Е. Проблемы, возникающие при бассейновой переброске стока из Нязепетровского водохранилища на р. Уфе в Волчихинское водохранилище на р. Чусовой // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов : труды международной научно-практической конференции, Пермь, 26–28 мая 2009 г. В 2 т. Т. 2. Пермь : Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2009. С. 85–91. <https://elibrary.ru/thancu>
5. Литовский В. В. Гравиогеография водохранилищ Свердловской области // Географический вестник. 2020. № 4 (55). С. 17–29. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2020-4-17-29>
6. Носаль А. П., Шубарина А. С., Сокольников И. И. Повышение безопасности водоснабжения крупных населённых пунктов в период маловодья (на примере города Екатеринбурга) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2011. № 6. С. 33. <https://elibrary.ru/onrvtz>
7. Рукоусев Е. Ю. Проекты развития водного транспорта на Урале в конце XIX – начале XX века // Вопросы истории естествознания и техники. 2015. Т. 36, № 4. С. 717–731. <https://elibrary.ru/vobshx>
8. Словцова И. В., Словцов С. В. Крестник солнца : документальная биография Фотия Ильича Швецова (1805–1855). Санкт-Петербург : Лема, 2018. 189 с.
9. Харитонов К. А., Вяткина Г. В. Волчихинское водохранилище // Вклад молодых учёных в развитие АПК : сборник тезисов, подготовленный в рамках всероссийской научно-практической конференции «Молодёжь и наука – 2022», Екатеринбург, 15 марта 2022 г. Т. 5. Екатеринбург : Уральский государственный аграрный университет, 2022. С. 46–49. <https://elibrary.ru/almnup>
10. Водоканал продолжит перекачку воды из Челябинской области. 2017. URL: <https://www.ekburg.ru/news/2/70057-vodokanal-prodolzhit-perekachku-vody-iz-chelyabinskoy-oblasti/> [дата обращения: 06.04.2026].
11. Об утверждении схемы размещения, использования и охраны охотничьих угодий на территории Свердловской области : Указ губернатора Свердловской области от 15 апреля 2015 г. № 180-УГ. URL: <http://www.pravo.gov66.ru/3990/> [дата обращения: 06.04.2026].

УДК 551.3.053

Дистанционное зондирование как метод мониторинга бассейнов селеопасных балок горы Джалган

Сулейманов В. К.¹, Мамаев А. С.¹, Сулейманова Ф. В.², Ахмедов А. С.¹,
Курбанисмаилова А. С.¹, Гусейнова А. Ш.¹

¹Институт геологии ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия

²Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН, Махачкала, Россия

✉ v.suleimanow@yandex.ru

Рассмотрены возможности дистанционного зондирования Земли при мониторинге бассейнов селеопасных балок горы Джалган. Оценено применение беспилотных летательных аппаратов (БЛА) с высоким разрешением камер и специализированных программных решений с открытым кодом для картографирования селевой опасности, что позволяет получить актуальную информацию. Проанализированы перспективы комплексного подхода, включающего обработку космических снимков и создание цифровых моделей рельефа (ЦМР), для получения точных данных о современных экзогенных геологических процессах и для оценки потенциальных рисков.

Ключевые слова: ДЗЗ, картография, селевые потоки, цифровая модель рельефа, мониторинг риска

Город Дербент расположен на сужении Приморской низменности, которая сформирована террасами позднего плейстоцена, сложенными преимущественно галечниково-песчано-глинистыми отложениями шириной около 2,5 км, между горой Джалган на западе и Каспийским морем на востоке. За последние годы Дербент, привлекающий гостей своей древней историей, превратился в один из перспективных центров развития туризма в Республике Дагестан.

Особенности географического положения города представляют серьёзную опасность во время проявления селевых процессов в балках горы Джалган, расположенных вдоль западных склонов.

Гора Джалган высотой 708 м протягивается примерно на 10 км с севера на юг и на 4 км с востока на запад и занимает восточное крыло Рукельской антиклинали. Это определяет её наклон в восточном направлении в сторону Каспийского моря и также обуславливает направление стока со склонов и подножья горы. Гора сложена известняками верхнесарматского яруса неогена с маломощными прослоями песчаников и глин.

Поверхность горы Джалган расчленяется с запада на восток сухими логами-балками (рис. 1), среди которых шесть наиболее крупных представляют значительную опасность для города: это места возможного зарождения и прохождения селевых потоков.

По данным дешифровки космоснимков, площадь селевых бассейнов оценивается примерно в 1428 га (табл. 1).

Таблица 1. Площадь водосборных бассейнов балок горы Джалган

Номер балки	Площадь водосбора балки, га	Номер балки	Площадь водосбора балки, га
1	181	4	247
2	251	5	368
3	102	6	279

Периодически по балкам горы сходят селевые потоки, которые угрожают инфраструктуре и нормальной жизнедеятельности города. Так, водокаменные потоки, сошедшие по балкам вследствие интенсивных дождей в октябре 2012 г., привели к гибели 7 человек, прошли по 8 улицам, затопили более 300 домов и разрушили часть стены крепости Нарын-кала. Данные о динамических характеристиках селевого потока были получены эмпирически (определялись на глаз). Основными факторами, приведшими к сходу селевого потока, стали гидрометеорологическая обстановка и активное вмешательство человека в природную среду [1].

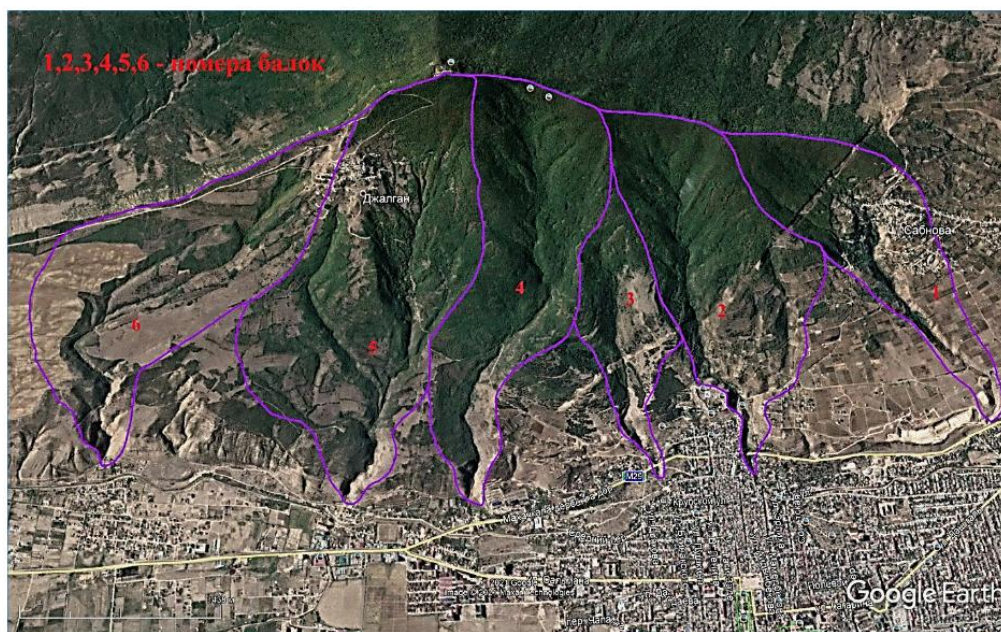


Рис. 1. Селевые балки горы Джалган

Соответственно, расширение знаний о природных явлениях, своевременная инженерно-геологическая оценка бассейнов селеопасных балок горы Джалган, анализ происходящих экзогенных геологических процессов и прогнозирование возможных вариантов развития событий становятся актуальными задачами. В особенности это касается такого динамичного, непредсказуемого и опасного явления, как сель.

Дистанционные методы исследования окружающей среды — это область науки, предполагающая получение информации о состоянии и параметрах объектов на земной поверхности с помощью наблюдения с применением наземных и космических средств.

При анализе инженерно-геологической ситуации важно получить актуальную информацию о состоянии природных комплексов и корректно их картографировать. В настоящее время для этого активно применяются спутниковые снимки и аэрофотосъёмка с использованием беспилотных летательных аппаратов (далее — БЛА). Благодаря высокому разрешению и точности съёмки можно получить детальные карты местности и цифровые модели рельефа (далее — ЦМР), чтобы провести анализ особенностей образования и распространения селевых потоков.

С учётом обширности исследуемой территории, частичного покрытия балок густой лесной растительностью, а также дороговизны и ограниченности коммерческих данных дистанционного зондирования Земли (далее — ДЗЗ) в высоком разрешении и программ для их обработки наиболее эффективным методом мониторинга является применение мультиспектральных снимков высокого разрешения: они обеспечат точное отображение мельчайших деталей местности. Кроме того, такие снимки можно обработать в специализированном программном обеспечении с открытым кодом, чтобы создать ЦМР балок. Соответственно, использование БЛА (квадрокоптеров) с камерами высокого разрешения открывает возможность для быстрого и недорогого сбора необходимой информации. Создание ЦМР базируется на получении снимков и их обработке с помощью специализированных инструментов, например программного обеспечения ArcGIS или QGIS.

Обработка полученных снимков в ArcGIS или на SAGAGIS позволят создать ЦМР селеопасных балок, чтобы выявить современные склоновые и долинные процессы в бассейнах и выполнить их координатную привязку, используя файлы GeoTIFF [2, 6].

Визуализации рельефа в ЦМР позволит узнать инженерно-геологические условия, собрать данные об элементах ландшафта, изучить степень поражённости территории экзогенными геологическими процессами, оконтурить и определить качественные и количественные характеристики

селевого рельефа и отложений с учётом специфики местности, выявить возможные источники и направления поступления в селевые очаги твёрдой и жидкой составляющих и рассчитать вероятные риски.

Возможности дешифрирования будут определяться масштабом и пространственным разрешением снимков. Результат дешифрирования — картографирование территории бассейнов балок с нанесёнными на топографическую основу морфометрическими элементами.

Для облегчения процесса дешифрирования удобно пользоваться таблицей дешифровочных признаков селевых явлений, которые подразделяются на прямые (форма, размер, цвет, тень, тон, структура, рисунок и др.) и косвенные (ландшафтно-индикационные). Для каждой зоны селевого процесса (зарождение, транзит и аккумуляция) характерен свой набор дешифровочных признаков.

Наложение материалов мультиспектральной съёмки на ЦМР предоставит дополнительные возможности для интерпретации полученных моделей и для дешифрирования снимков [3].

Приведённый ниже обзор бассейнов балок горы Джалган основан на срезе дешифрирования данных из открытых источников. Их изучение показывает наличие ряда факторов, способствующих формированию и активизации селевых процессов.

Инженерно-геологические условия бассейнов селеопасных балок горы Джалган обусловлены особенностями рельефа, распространением горных пород различного генетического происхождения, а также активной неотектоникой и рядом климатических факторов [4, 5].

Особенности рельефа — абсолютная высота, крутизна, глубина и густота расчленения — влияют на селевой процесс с нескольких сторон. С увеличением высоты растёт и средний уклон постоянных и временных водотоков. Там движущая сила водных потоков на более крутых склонах возрастает; соответственно, повышается их размывающая способность. Это, в свою очередь, создаёт более подходящие условия для формирования селей.

В распределении рытвин и врезов в балках горы в полной мере соблюдаются закономерности высотной поясности. Крутизна склонов селеопасных балок горы Джалган варьирует от 15 до 47°, а в некоторых местах даже превышает 47°. Средний уклон по протяжённости — 19°; максимальный в верховьях балок — более 47°. На некоторых участках русла балок имеют отвесные склоны высотой от 2–3 до 10 м.

В геологическом строении территории принимают участие инженерно-геологические формации осадочных пород неогеновой и четвертичной систем. Неогеновая система представлена породами сарматского яруса ($N_1^3 S_3$). Четвертичными отложениями сложены склоны балок, где преобладают рыхлые отложения разного происхождения — супеси, суглинки, лёссы. Четвертичные отложения склоновых и делювиально-осыпных фаций, а также фаций временных водотоков распространены по всей площади склонов балок.

Природные особенности бассейнов определяют и развитие разнообразных экзогенных геологических процессов — выветривания, осыпей, оползней, эрозии и др. Они непосредственно участвуют не только в изменении инженерно-геологических условий балок, но и в питании твёрдой фазы селей, в образовании запруд и т. п.

Большая крутизна склонов и гравитационные процессы способствуют смещению и накоплению масс рыхлообломочного материала, формирующих селевые очаги, в основании склонов и руслах балок.

Материал осыпей и мелких оползней находится в постоянном движении и пополнении. Один из источников пополнения селевого материала — мелкие оползни и осыпи, расположенные по бортам русел балок и временных водотоков.

Изучать и фиксировать прохождение и динамику селевого потока в режиме реального времени с помощью методов ДЗЗ крайне затруднительно, поэтому для эффективности и контроля склоновых процессов в бассейнах селеопасных балок горы Джалган рекомендовано и необходимо обновление базы данных посредством периодической повторной съёмки территории с применением БЛА, особенно после продолжительных и сильных атмосферных осадков. Так удастся получить объективную информацию о склоновых процессах, текущих изменениях рельефа и состоянии почвенно-грунтового покрытия, а также создать банк актуальных данных о геоморфологических процессах,

происходящих в бассейнах селеопасных балок, причём с учётом антропогенного влияния. Более того, внедрение автоматизированных систем обнаружения и оповещения повышает безопасность населения и способствует своевременному реагированию на возникающие угрозы.

Методы ДЗЗ позволяют по геоморфометрическим признакам выявлять на ЦМР потенциально селеопасные участки балок.

Мониторинг геоморфологических процессов в бассейнах селеопасных балок горы Джалган с использованием методов ДЗЗ и с привлечением БЛА представляется необходимым условием повышения уровня безопасности жителей и объектов городской инфраструктуры Дербента.

Применение инновационных подходов, в частности комбинирование мультиспектральных изображений и цифровой обработки, значительно улучшает качество результатов исследований и позволяет своевременно реагировать на изменения обстановки.

Использование современных технических средств и открытого программного обеспечения позволяет эффективно решать целый ряд задач и снижать риск катастрофических событий.

Список использованных источников

1. Идрисов И. А., Сулейманов В. К., Черкашин В. И. Опасные геологические (природные) процессы в районе г. Дербент (причина и следствие) // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2019. № 4 (79). С. 90–99. <https://doi.org/10.33580/2541-9684-2019-63-4-90-99>
2. Пластинин Л. А., Ступин В. П. Программы картографо-космического мониторинга природных и антропогенных процессов и явлений (на примере Байкальского региона) // Совершенствование средств и методов сбора и обработки геопространственной информации и системы подготовки специалистов в области топогеодезического и навигационного обеспечения : материалы всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2016. С. 246–252.
3. Ступин В. П., Пластинин Л. А., Олзоев Б. Н. Возможности материалов дистанционного зондирования как информационной основы картографирования селевой опасности Байкальской горной области // ГеоРиск. 2020. Т. 14, № 2. С. 78–87. <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2020-14-2-78-87>
4. Сулейманов В. К., Идрисов И. А., Мамаев А. С. Инженерно-геологические условия балок горы Джалган для образования селевых потоков // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2022. № 4 (91). С. 79–83. <https://doi.org/10.33580/2541-9684-2022-91-4-79-83>
5. Сулейманов В. К., Идрисов И. А., Черкашин В. И., Мамаев А. С. Численная оценка селевой опасности балок горы Джалган // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2022. № 2 (89). С. 63–67. <https://doi.org/10.33580/2541-9684-2022-89-2-63-67>
6. Мамаев С. А., Сулейманов В. К., Мамаев А. С. Современное применение ГИС-технологий при мониторинге экзогенных процессов в Республике Дагестан // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2019. № 1 (76). С. 61–66. <https://doi.org/10.33580/2541-9684-2019-63-1-61-66>

УДК 556.5:504.453:551.4:519.876.5(282.247.34)

Некоторые морфометрические характеристики бассейна реки Салгир

Табунщик В. А.

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

✉ tabunshchik@ya.ru

Река Салгир — самая протяжённая река Крымского полуострова (длина 204 км, площадь водосборного бассейна 3750 км²); она берёт начало в Крымских горах и впадает в Азовское море. На основе литературных данных и обработки цифровой модели рельефа Soretnicus рассчитаны ключевые морфометрические характеристики бассейна реки. Установлено, что абсолютные высоты в пределах бассейна изменяются от 0 до 1438 м (среднее значение 266 м), уклон поверхности — от 0 до 45,1° (среднее 3,1°); глубина расчленения рельефа составляет в среднем 53,1 м·км⁻², а густота расчленения — 1,0 км·км⁻². Полученные результаты позволяют уточнить особенности рельефа и гидрографической сети северного склона Главной гряды Крымских гор.

Ключевые слова: река Салгир, бассейн реки Салгир, морфометрические характеристики, цифровая модель рельефа Soretnicus, ЦМР, расчленение рельефа, абсолютная высота, уклон поверхности, Крымские горы, гидрография Крыма

Морфометрические характеристики водосборных бассейнов составляют основу анализа гидрологических процессов — формирования стока, его объёма и скорости [1, 2]. Эти параметры также напрямую влияют на ландшафтные особенности и метрики и на устойчивость экосистем в пределах речного бассейна. Понимание взаимосвязей между морфометрическими характеристиками и гидрогеоэкологическими процессами позволяет прогнозировать изменения водного режима и оценивать их последствия для окружающей среды [3]. Размеры водосборного бассейна определяют водоносность реки. Большое значение для формирования стока имеет форма бассейна: она задаёт время добегания воды с разных участков по склонам до гидрографической сети, а затем — до расчётного створа. Чем больше это время, тем значительнее потери воды на фильтрацию и испарение.

Река Салгир является самой протяжённой рекой Крымского полуострова. Она берёт своё начало в Крымских горах и впадает в Азовское море. Согласно [4], река Салгир относится к бассейнам рек северного склона Крымских гор. Длина реки составляет 204 км, площадь водосборного бассейна — 3750 км² [5, 6]. Река имеет 36 притоков длиной более 5 км [7]. З. В. Тимченко [4] отмечает, что истоком Салгира является место слияния рек Ангара и Кизил-Кобы севернее села Перевальное, у моста через Ангару, по трассе Симферополь — Алушта. Водосборный бассейн Салгира граничит на востоке с бассейном реки Восточный Булганак, на юго-востоке — с бассейнами рек Южного берега Крыма, на юго-западе — с бассейнами рек Альма и Западный Булганак; северо-западная граница проходит по равнинной местности и выражена нечётко. Средняя густота речной сети бассейна Салгира — 0,25 км·км⁻² (с учётом рек длиной более 5 км). Притоки Салгира расположены в основном на северных склонах Главной гряды. Характерным для них является то, что они не всегда доносят свою воду до Салгира, теряясь на степной равнине [6, 7].

Классические основы количественного морфометрического анализа заложены в работах Р. Э. Хортон и А. Н. Стралера [8, 9], которые установили эмпирические законы (законы Хортон — Стралера) о геометрической прогрессии числа и длины водотоков разных порядков, а также о связи морфометрии с гидрологическим откликом бассейна. Современные исследования широко используют ГИС и цифровые модели рельефа (Soretnicus, SRTM и др.) для расчёта этих параметров и для последующего гидрологического моделирования.

В настоящем исследовании с использованием ЦМР Soretnicus и на основе анализа литературных материалов [10, 11] были рассчитаны некоторые морфометрические характеристики бассейна реки Салгир. Методика основана на обработке растровых данных и их интерпретации [2, 12–14].

В результате исследования получены карты пространственного расположения некоторых морфометрических характеристик бассейна реки Салгир (рис. 1).

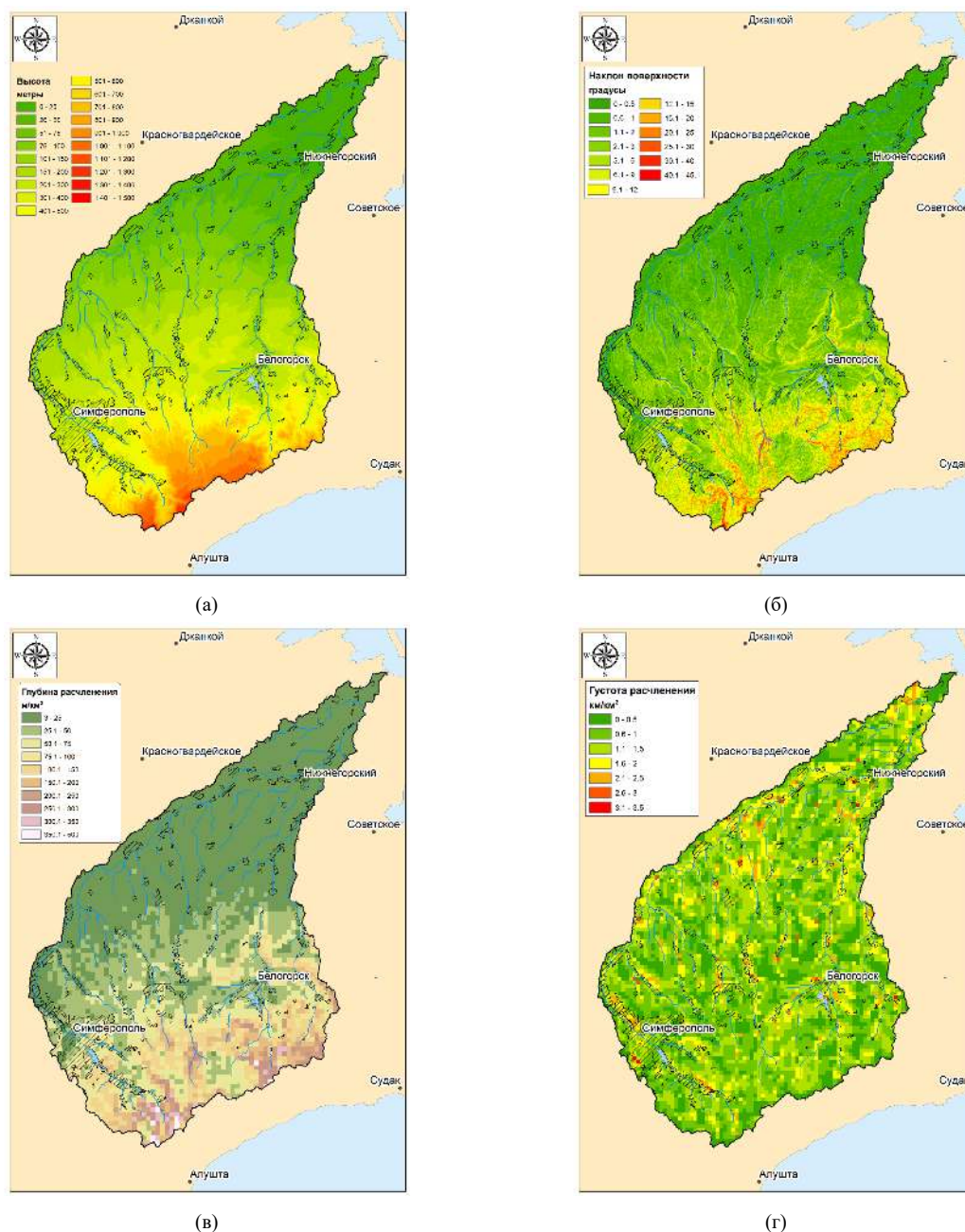


Рис. 1. Характеристики рельефа в пределах бассейна реки Салгир: а — абсолютные высоты; б — наклон поверхности; в — глубина расчленения рельефа (составлено по [10]); г — густота расчленения рельефа (составлено по [11])

В пределах территории бассейна реки Салгир абсолютные высоты изменяются от 0 до 1438 м (см. рис. 1); среднее значение абсолютной высоты — 266 м. Наклон поверхности изменяется от 0 до 45,1°, среднее в пределах всего бассейна — 3,1°. Глубина расчленения рельефа изменяется от 3 до 493 м·км⁻², а густота расчленения рельефа — от 0 до 3,3 км·км⁻². Среднее значение глубины расчленения рельефа в пределах территории бассейна реки Салгир составляет 53,1 м·км⁻², а густоты расчленения рельефа — 1,0 км·км⁻².

Полученные результаты помогут лучше понять особенности рельефа для гидрологических и геоэкологических исследований в бассейне самой крупной реки Крымского полуострова — реки Салгир.

Список использованных источников

1. Revuelta-Acosta J. D., Garrido-Meléndez J., Conde-Gutiérrez R. A., Alcalá-Perea G. Comprehensive geospatial assessment: morphometric parameters and hydrological implications in five Mexican basins. *Scientific Reports*, 2025, vol. 15, art. 21698 (23 p.). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-05194-8>
2. Табунщик В. А. Морфометрические характеристики бассейнов рек северо-западного склона Крымских гор (на примере бассейнов рек Западный Булганак, Альма, Кача, Бельбек, Черная) // Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2021. Т. 7 (73), № 3. С. 267–278. <https://doi.org/10.37279/2413-1717-2021-7-3-267-278>
3. Rai P. K., Chandel R. S., Mishra V. N., Singh P. Hydrological inferences through morphometric analysis of lower Kosi river basin of India for water resource management based on remote sensing data. *Applied Water Science*, 2018, vol. 8, iss. 1, art. 15 (16 p.). <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0660-7>
4. Олиферов А. Н., Тимченко З. В. Реки и озёра Крыма. Симферополь : Доля, 2005. 214 с.
5. Ресурсы поверхностных вод СССР: гидрологическая изученность. Т. 6. Украина и Молдавия. Вып. 3. Бассейн Северского Донца и реки Приазовья / под ред. М. С. Каганера. Ленинград : Гидрометеиздат, 1967. 492 с.
6. Поверхностные водные объекты Крыма. Управление и использование водных ресурсов : справочник // А. А. Лисовский, В. А. Новик, З. В. Тимченко, У. А. Губская. Симферополь : Крымучпедгиз, 2011. 242 с.
7. Тимченко З. В. Гидрография и гидрология рек Крыма. Симферополь : АРИАЛ, 2012. 290 с.
8. Strahler A. N. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In: *Handbook of Applied Hydrology* / V. T. Chow (Ed.). New York : McGraw-Hill Book Company, 1964, pp. 439–476.
9. Horton R. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 1945, vol. 56, no. 3, pp. 275–370. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:edosat\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:edosat]2.0.co;2)
10. Табунщик В. А. Глубина расчленения рельефа на территории Крымского полуострова // ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий : материалы международной конференции. Москва : Изд-во Московского университета, 2020. Т. 26, ч. 2. С. 95–105. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2020-2-26-95-105>
11. Табунщик В. А., Петлюкова Е. А. Густота расчленения рельефа на территории Крымского полуострова // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2019. № 1 (201). С. 95–100. <https://elibrary.ru/zxqiix>
12. Табунщик В. А., Горбунов Р. В. Оценка геоэкологического состояния бассейнов рек северо-западного склона Крымских гор. Симферополь : ИТ «АРИАЛ», 2025. 224 с. <https://elibrary.ru/saecpm>

13. Табунщик В. А. Крутизна склонов в пределах ландшафтных уровней Крымского полуострова // Региональная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных по естественным наукам, Владивосток, 16–30 апреля 2018 г. : материалы. Владивосток : Дальневосточный федеральный университет, 2018. С. 62–64. <https://elibrary.ru/ytqktz>
14. Табунщик В. А., Келип А. А., Андрончик Я. О. Анализ абсолютных высот рельефа в пределах ландшафтов Крымского полуострова // Труды Карадагской научной станции имени Т. И. Вяземского – природного заповедника РАН. 2021. № 4 (20). С. 54–66. <https://doi.org/10.21072/eco.2021.20.07>

УДК 911.2:504.06:556.53

Антропогенная трансформация ландшафтов бассейна реки Самур в условиях водохозяйственного освоения, сельскохозяйственной нагрузки и деградации дельтовых экосистем

Фролов Д. А.¹, Атаев З. В.^{1,2,3}, Гюльмагомедов А. М.¹, Нуралиев М. Э.¹

¹Дагестанский государственный педагогический университет имени Р. Гамзатова, Махачкала, Россия

²Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН, Махачкала, Россия

³Кабардино-Балкарский научный центр РАН, Нальчик, Россия

✉ zagir05@mail.ru

Рассмотрены основные направления антропогенной трансформации ландшафтов бассейна реки Самур — крупнейшей трансграничной реки Восточного Кавказа. На основе полевых исследований 2024–2025 гг., анализа материалов научных отчётов, данных дистанционного зондирования и современной литературы показано, что драйверами преобразования выступают водохозяйственное перераспределение стока, сельскохозяйственная нагрузка и деградация дельтовых экосистем, усиливаемые современными климатическими изменениями и регрессией Каспийского моря. Наиболее уязвимыми звеньями являются предгорно-низменная и дельтовая части бассейна, где фиксируются понижение уровня грунтовых вод, засоление, эрозийная деградация склонов и сокращение площадей водно-болотных угодий. Сформулированы приоритетные меры по адаптивному экологическому попуску, восстановлению гидрологического режима дельты и совместному трансграничному мониторингу.

Ключевые слова: Самур, антропогенная трансформация, водохозяйственное освоение, сельскохозяйственная нагрузка, дельтовые экосистемы, лиановый лес, регрессия Каспийского моря

Бассейн реки Самур является одной из наиболее контрастных природно-хозяйственных систем Восточного Кавказа. Здесь в пределах одного речного бассейна сочетаются высокогорные снегово-ледниковые комплексы, среднегорные лесные и лугово-степные ландшафты, предгорные агроландшафты и уникальная дельта с единственным в России массивом субтропического лианового леса. Такая структура делает Самур показательным полигоном для анализа взаимодействия природных и антропогенных факторов [1].

В последние десятилетия на пространственную организацию и состояние ландшафтов Самура всё сильнее влияют три взаимосвязанных процесса: перераспределение стока в интересах водохозяйственного комплекса, интенсификация сельскохозяйственного природопользования и деградация дельтовых экосистем. Дополнительным фактором дестабилизации выступают климатические изменения и регрессия Каспийского моря, усиливающие падение уровня грунтовых вод и трансформацию гидрологического режима низовий [8, 12, 13].

Цель работы — выявить основные направления антропогенной трансформации ландшафтов бассейна реки Самур и показать, как водохозяйственное освоение, аграрная нагрузка и деградация дельтовых экосистем образуют единый геоэкологический узел напряжения.

Материал и методы. В основу работы положены результаты полевых и камеральных исследований 2024–2025 гг., которые были выполнены в пределах бассейна Самура, а также материалы итоговых научных отчётов по проекту, посвящённому динамике геоэкологического состояния бассейнов горных рек Северо-Восточного Кавказа, Азербайджана и Ирана. Использованы маршрутные наблюдения, описания ландшафтных фаций, фотодокументирование очагов деградации, анализ материалов среднемасштабного ландшафтного картографирования [1, 2] и сопоставление наземных данных со спутниковыми изображениями Landsat и Sentinel-2.

Методически работа опирается на бассейновый подход, позволяющий рассматривать Самур как целостную природно-антропогенную систему, где преобразования верхнего, предгорно-низменного и дельтового звеньев связаны потоками воды, наносов и растворённых веществ и хозяйственными воздействиями [3]. Отдельный блок анализа посвящён водохозяйственному регулированию трансграничной реки и современным оценкам климатически обусловленного снижения уровня Каспийского моря [7, 10, 12, 13].

Результаты и обсуждение. Водохозяйственное освоение остаётся драйвером антропогенной трансформации бассейна Самура (табл. 1). В нижнем течении, у Яраг-Казмаляра, от гидроузла отходят Самур-Дербентский и Самур-Апшеронский каналы с пропускной способностью 17 и 45,5 м³·с⁻¹ соответственно. Воду из реки забирают и ещё пять оросительных систем. Суммарный водоотбор в отдельные годы достигает 50–60 % годового стока, а экологический попуск выдерживается не всегда, особенно в маловодные периоды. Это приводит к понижению уровня грунтовых вод в дельте на 1–3 м и нарушает водный режим наиболее ценных природных комплексов [8].

Таблица 1. Пространственные проявления антропогенной трансформации ландшафтов бассейна Самура

Зона бассейна	Основные формы трансформации	Геоэкологические последствия	Приоритетные меры
Высокогорье	Перевыпас; снижение устойчивости лугов; климатически обусловленная деградация криосферы	Падение продуктивности пастбищ; усиление ливневой эрозии; изменение сезонности стока	Мониторинг пастбищ и стока; регламентация выпаса; охрана источников стока
Среднегорье и предгорья	Распашка склонов; разрушение террас; дорожное строительство; локальное загрязнение	Эрозия почв; оврагообразование; склоновые деформации; вынос наносов и биогенов	Почвозащитное земледелие; лесомелиорация; контроль за застройкой и стоками
Низовья и дельта	Водозабор; оросительная мелиорация; осушение; свалки; замусоривание приморской полосы	Понижение уровня грунтовых вод; усыхание лианового леса; засоление; утрата водно-болотных угодий	Адаптивный экологический попуск; восстановление проток; совместный мониторинг Россия — Азербайджан

Сельскохозяйственная нагрузка носит высотно-дифференцированный характер. В высокогорьях и на субальпийских пастбищах перевыпас приводит к снижению их продуктивности на 20–30 %, изменению видового состава травостоя и усилению склоновой эрозии. В среднегорных и предгорных районах основные проблемы связаны с распашкой склонов, эрозией почв и деградацией традиционных террас; на отдельных участках темпы смыва оцениваются в 30–40 т·га⁻¹·год⁻¹. В низовьях и дельте антропогенная трансформация проявляется в расширении пашни, осушении заболоченных земель, вторичном засолении и загрязнении оросительной сети [11] (рис. 1).

Наиболее чувствительным звеном системы является дельта Самура. Здесь сосредоточен уникальный лиановый лес, зависящий от устойчиво высокого стояния грунтовых вод и режима подпитки дельтовых протоков. Полевые наблюдения 2025 г. фиксируют усыхание древесной растительности, суховершинность и деградацию прибрежных участков. Сомкнутость крон в отдельных массивах снизилась на 15–20 % за два десятилетия, а площади открытых вод и тростниковых плавней за 1990–2024 гг. сократились на 30–35 %, что сопровождается потерей нерестилищ и местообитаний водоплавающих птиц [1].

Дополнительным фактором трансформации выступает загрязнение и техногенно-бытовое нарушение ландшафтов. В предгорно-низменной зоне фиксируются засорение оросительных каналов, появление свалочных участков и локальное поступление неочищенных стоков, что усиливает



Рис. 1. Проявления антропогенной трансформации ландшафтов бассейна реки Самур: а — загрязнение оросительного канала; б — техногенно-бытовое нарушение ландшафта; в — замусоривание приморской полосы дельты; г — деградация береговой и древесной растительности

эвтрофикацию и ухудшает качество воды. Дegradация экосистем приобретает кумулятивный характер: загрязнение сочетается с дефицитом влаги, изменением русловой сети и высоким хозяйственным прессом [2].

Климатические изменения и регрессия Каспийского моря усиливают антропогенную перестройку ландшафтов. Для бассейна Самура уже отмечены сокращение площади оледенения на 30–50 % за 50–60 лет [14], а также повышение температуры и более раннее прохождение пика половодья [9]. При этом уровень Каспийского моря снизился примерно до отметки –29,3 м [6, 12], и современные модели допускают дальнейшее падение уровня моря в течение XXI в. [13]. Для дельты это означает понижение базиса эрозии, врезание русел, дальнейшее падение уровня грунтовых вод и рост риска засоления.

Заключение. Проведённое исследование показывает, что антропогенная трансформация ландшафтов бассейна Самура имеет системный и каскадный характер. Её основные направления связаны с водохозяйственным перераспределением стока, сельскохозяйственной нагрузкой, загрязнением оросительной сети и деградацией дельтовых экосистем, причём наиболее уязвимыми остаются предгорно-низменное и дельтовое звенья бассейна. Именно здесь хозяйственный пресс накладывается на снижение устойчивости гидрогеологического режима, понижение уровня грунтовых вод, засоление и утрату водно-болотных угодий.

Современные климатические изменения и регрессия Каспийского моря не создают эти проблемы с нуля, но заметно усиливают их, ускоряя деградацию природных комплексов низовьев Самура. Именно поэтому приоритетными направлениями управления должны стать переход к адаптивному экологическому попуску, восстановление гидрологического режима дельты, почвозащитная организация природопользования в предгорьях, контроль загрязнения каналов и развитие постоянного российско-азербайджанского мониторинга. Без такой связки природоохранных и водохозяйственных мер уникальные дельтовые экосистемы Самура будут оставаться в зоне нарастающего геоэкологического риска.

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. Атаев З. В. Ландшафтное разнообразие и геоэкологическое состояние бассейна реки Самур на Восточном Кавказе // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2025. № 2 (101). С. 63–68. <https://elibrary.ru/eqzhhi>
2. Атаев З. В., Абдулаев К. А., Гаджибеков М. И. Опыт дробного картирования ландшафтного разнообразия дельты реки Самур // Биоразнообразие и рациональное использование природных ресурсов : материалы докладов VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Махачкала, 29–30 марта 2018 г. Махачкала : ДГПУ, 2018. С. 238–244. <https://elibrary.ru/xmylgh>
3. Атаев З. В., Братков В. В., Абдулаев К. А., Гаджибеков М. И. Ландшафты национального парка «Самурский» // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2020. Т. 14, № 3. С. 63–80. <https://elibrary.ru/ocmmnn>
4. Атаев З. В., Гаджибеков М. И., Абдулаев К. А. Природно-территориальные комплексы Самурского национального парка и их использование // Труды Государственного природного заповедника «Дагестанский». 2020. Вып. 17. С. 137–153. <https://elibrary.ru/lcweub>
5. Баламирзоев М. А., Мирзоев Э. М. Р. Экологические аспекты сохранения биоразнообразия и рационального природопользования в дельте реки Самур // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2009. № 1 (6). С. 42–47. <https://elibrary.ru/kwpalv>
6. Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А. Межгодовые изменения уровней в системе Каспийское море – залив Кара-Богаз-Гол и гидрометеорологических параметров Каспийского региона в первой четверти XXI века // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22, № 6. С. 312–325. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-6-312-325>
7. Демин А. П., Шаталова К. Ю. Принципы и практика распределения водных ресурсов трансграничных рек России // География и природные ресурсы. 2015. № 1. С. 22–29. <https://elibrary.ru/tkkwcl>
8. Иманов Ф. А., Асадов М. Я. Оценка водных ресурсов и экологического состояния реки Самур (Восточный Кавказ) // География и природные ресурсы. 2011. № 3. С. 156–160. <https://elibrary.ru/ocrddz>
9. Росгидромет. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. Санкт-Петербург : Научно-технологические, 2022. 124 с. URL: https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/compressed.pdf [дата обращения: 16.03.2026].
10. Соглашение между Правительством Российской Федерации и Правительством Азербайджанской Республики о рациональном использовании и охране водных ресурсов трансграничной реки Самур (Баку, 03.09.2010). URL: <https://voda.gov.ru/regulatory/doc-3276/> [дата обращения: 14.03.2026].
11. Ahmadov E. Water resources management to achieve sustainable development in Azerbaijan. Sustainable Futures, 2020, vol. 2, art. 100030 (10 p.). <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2020.100030>

12. Court R., Lattuada M., Shumeyko N., Baimukanov M., Eybatov T., Kaidarova A., Mamedov E. V., Rustamov E., Tasmagambetova A., Prange M., Wilke T., Hassall C., Goodman S. J. Rapid decline of Caspian Sea level threatens ecosystem integrity, biodiversity protection, and human infrastructure. *Communications Earth & Environment*, 2025, vol. 6, art. 261 (12 p.). <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02212-5>
13. Samant R., Prange M. Climate-driven 21st century Caspian Sea level decline estimated from CMIP6 projections. *Communications Earth & Environment*, 2023, vol. 4, art. 357 (12 p.). <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01017-8>
14. Tielidze L. G., Nosenko G. A., Khromova T. E., Paul F. Strong acceleration of glacier area loss in the Greater Caucasus between 2000 and 2020. *The Cryosphere*, 2022, vol. 16, iss. 2, pp. 489–504. <https://doi.org/10.5194/tc-16-489-2022>

УДК 551.35

Оценка влияния морского торгового порта Находка на донные отложения акватории бухты Находка

Хусаинова А. У., Юрова Ю. Д.

Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия

✉ yuliya.yurova.1996@mail.ru

Цель работы — оценить техногенное влияние порта Находка на донные отложения акватории бухты Находка. Исследование и отбор проб проводились в период с 2021 по 2024 г., применялся метод расчёта суммарного показателя загрязнения (Z_c). Отмечено, что распределение загрязняющих веществ — нефтепродуктов и тяжёлых металлов — напрямую связано с изменением объёма работы и нагрузки на угольные терминалы порта.

Ключевые слова: донные отложения, техногенное воздействие, загрязнение, тяжёлые металлы, нефтяные углеводороды, суммарный показатель загрязнения Z_c , угольные терминалы, антропогенная нагрузка

Актуальность исследования влияния морского торгового порта (далее — МТП) Находка на донные отложения бухты обосновывается его значительной ролью в экономике Дальневосточного региона и растущими экологическими проблемами, которые связаны с деятельностью порта. МТП является ключевым транспортным узлом в международной торговле и обеспечивает устойчивое экономическое развитие, однако интенсивность и объём грузоперевозок, в частности угля, создают повышенную антропогенную нагрузку на экосистемы акватории.

В связи с этим возникает необходимость исследования экологической обстановки бухты и мониторинга водных ресурсов, морской биоты и донных отложений, что позволит оценить последствия хозяйственной деятельности МТП Находка. Целью данного исследования является анализ и оценка влияния МТП на донные отложения акватории бухты.

Донные отложения исследуемого участка бухты Находка имеют уникальные черты, которые формируются под воздействием различных факторов — климата, гидрологических условий и антропогенной нагрузки на водоём [2]. В акваторию впадает несколько горных рек: Партизанская (длина 141 км) — в залив Находка в западной части; Хмыловка (длина 10 км, с притоками 45 км) — в бухту Врангель залива Находка [3]. Залив важен для региона с экономической точки зрения, что обуславливает необходимость оценки уровня загрязнения донных отложений: анализ полученных результатов позволит принять меры, направленные на снижение антропогенной нагрузки и на улучшение экологической обстановки [4, 5].

Цель данного исследования — оценить техногенное влияние порта Находка на донные отложения акватории одноимённой бухты.

Объекты и методы исследования. Донные отложения анализировались по таким параметрам, как гранулометрический состав, органический углерод, суммарное содержание нефтяных углеводородов, содержание тяжёлых металлов (Cu, Fe, Pb, Cr и Zn) и угольная пыль (зольность) [1, 4].

Отбор проб донного грунта, бентоса и планктона осуществлялся с портового буксира в летние сезоны 2021, 2023 и 2024 гг. в период с 10:00 до 17:00. Погодные условия при проведении работ были удовлетворительными. Температура воздуха колебалась от +14 до +19 °C, температура воды у дна — от +14,5 до +19,5 °C. Прозрачность воды во время погружения составила около 0,9 м. Ветер был юго-восточным слабым, волнение — слабым [5].

Материал исследования. Для анализа использовались отчёты компании «ЭкоСтандарт», проводившей мониторинг донных отложений для АО «Находкинский МТП» в акватории бухты Находка, за 2021, 2023 и 2024 гг. [5]. Мониторинг выполнялся для оценки техногенного воздействия на участок, выявления причин ухудшения биоразнообразия и выработки рекомендаций по уменьшению негативного влияния предприятий, функционирующих в данной акватории [4, 5].

Настоящее исследование было направлено на комплексную оценку экологического состояния бухты Находка и предполагало применение суммарного подхода, включающего детальный анализ донных отложений [2, 4]. В рамках работы использовались данные многолетних отчётов по деятельности МТП Находка и разрабатывались тематические картосхемы [3, 5].

Оценка влияния морского торгового порта Находка на донные отложения. Картосхемы донных отложений для 2021, 2023 и 2024 гг. были построены на основании расчётов суммарного показателя загрязнения почвы (Zc) согласно МУ 2.1.7.730-99 [1] (пункт 6.7). Использовался материал, полученный в ходе производственной практики [5]. Показатель Zc определялся на основе данных, представленных в табл. [1–3].

Расчёт Zc донных отложений проводился по формуле (1):

$$Zc = \left(\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{ПДК_i} \right) - (n - 1), \quad (1)$$

где C_i — концентрация вещества;

ПДК_i — предельно допустимая концентрация вещества;

n — количество веществ [1].

Таблица 1. Исходные данные для расчёта Zc донных отложений за 2021 г.

Створ	Нефтеуглеводороды	Zn	Cu	Fe	Pb	Cr
№ 1	868	86	58	0,11	89	34
№ 2	615	98	61	3	45	21
№ 3	340	96	25,8	0,45	33	32
№ 4	650	149	131	0,1	88	31,5
№ 5	1156	199	148	0,2	123	47
№ 6	1124	156	48,5	0,29	101	43,5
ПДК	1000	23	33	0,2	32	100

Таблица 2. Исходные данные для расчёта Zc донных отложений за 2023 г.

Створ	Нефтеуглеводороды	Zn	Cu	Fe	Pb	Cr
№ 1	465	55	24	0,13	64	29
№ 2	1190	75	31	0,23	123	36
№ 3	970	140	70	0,11	87	31
№ 4	2090	194	82	0,08	143	52
№ 5	1200	153	69	1,3	123	47
№ 6	440	115	15	0,18	87	31
ПДК	1000	23	33	0,2	32	100

Таблица 3. Исходные данные для расчёта Zc донных отложений за 2024 г.

Створ	Нефтеуглеводороды	Zn	Cu	Fe	Pb	Cr
№ 1	878	134	54	0,33	91	34
№ 2	384	142	45	0,12	72	32
№ 3	370	74	31	0,76	67	37
№ 4	596	254	101	1	106	56
№ 5	789	200	64	0,83	99	31
№ 6	704	73	15	0,1	87	23
ПДК	1000	23	33	0,2	32	100

В 2021 г. вся основная нагрузка приходилась на угольный терминал (далее — УТ), расположенный на левом берегу, то есть загрязнению подвергались донные отложения с левого

берега (створ № 2), что видно на картосхеме (рис. 1). За этот год МТП отгрузил около 2,3 млн т угля. Можно также предположить, что УТ, расположенный с западной стороны, воздействует на горную реку Партизанскую.

В 2023 г. УТ на левом берегу прекратил выгрузку угля на суда в связи с сильной антропогенной нагрузкой. Основная погрузка угля на суда стала выполняться УТ правого берега (створ № 5). Также начал функционировать УТ у Приморского завода (створ № 4), поскольку объём погрузки угля вырос до 3,23 млн т за год и УТ на правом берегу не справлялся. Активная работа УТ наглядно видна на картосхеме (см. рис. 1).

В 2024 г. отгрузка угля на суда полностью перешла на УТ Приморского завода, что видно на картосхеме (рис. 1). Соответственно, начали загрязняться донные отложения в этой части бухты (створ № 4). Годовой объём увеличился до 3,5 млн т.

Исходя из расчётов Z_c , можно заключить, что степень загрязнения донных отложений в бухте соответствует 2-му классу — слабозагрязнённые.

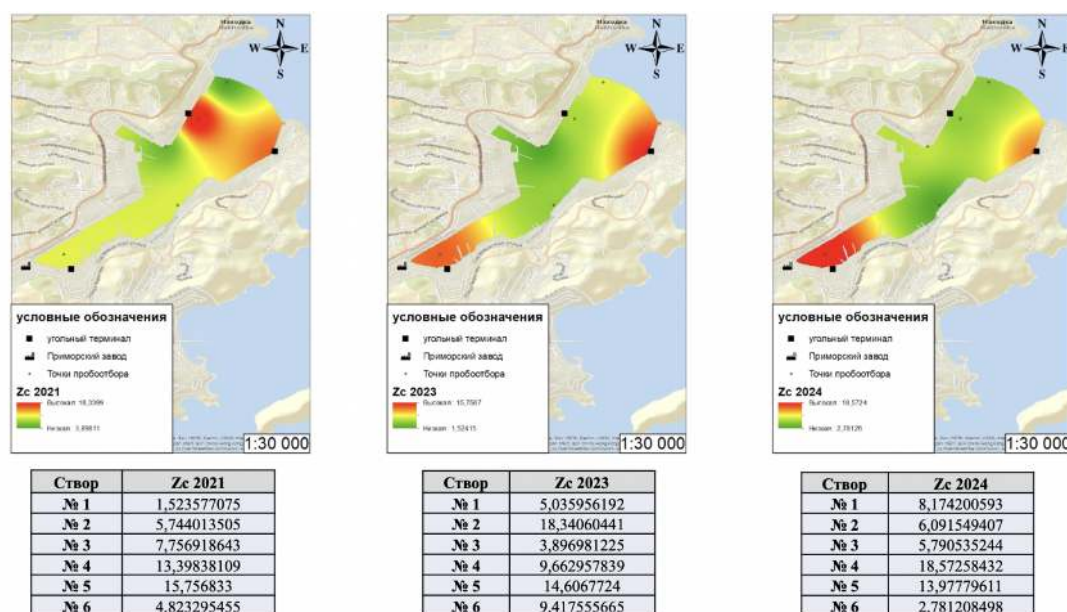


Рис. 1. Z_c донных отложений за 2021, 2023 и 2024 гг.

Заключение. Результаты геоэкологической оценки донных отложений бухты Находка по показателю Z_c позволили определить, что они относятся к слабозагрязнённым (2-й класс). Однако проведённые расчёты свидетельствуют о значительной антропогенной нагрузке на акваторию и на впадающие в бухту горные реки. Основной источник этой нагрузки — угольные терминалы, расположенные в прибрежной зоне морского торгового порта.

Донным отложениям присвоен умеренный класс загрязнения, однако они способны аккумулировать загрязняющие вещества. В них происходит постепенное накопление тяжёлых металлов и иных токсичных соединений, что создаёт долгосрочную угрозу для качества морской экосистемы. Оседающая угольная пыль не только напрямую загрязняет грунты, но и запускает цепь процессов, ведущих к системной дисфункции всей прибрежной экосистемы.

Высокий уровень загрязнения оказывает сублетальное воздействие на морские организмы, проявляющееся в снижении их жизнестойкости и в угнетении репродуктивных функций. Для Приморского края, экономика которого в значительной степени зависит от морских биоресурсов, последствия могут быть серьёзными. Деградация природных популяций, которые напрямую связаны с донными отложениями, может спровоцировать не только экологический, но и экономический кризис и привести к существенным финансовым потерям региона. Таким образом, ухудшение состояния биоты нарушает естественные биогеохимические циклы, а это в итоге негативно отразится на качестве жизни населения.

Список использованных источников

1. МУ 2.1.7.730-99 «Гигиеническая оценка качества почвы населённых мест». Москва : Минздрав России, 1999. 23 с.
2. Наумов Ю. А. Состояние окружающей среды морских портов и их акваторий (на примере портового комплекса бухты Находка на Японском море) // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 10-4. С. 623–626. <https://elibrary.ru/wvrubh>
3. Находкинский морской торговый порт : [официальный сайт]. URL: <http://www.nmtport.ru/> [дата обращения: 01.03.2026].
4. Обоснование планируемой хозяйственной деятельности АО «Находкинский МТП» во внутренних морских водах и в территориальном море РФ. Обосновывающая документация. Раздел 1. Оценка воздействия на окружающую среду : [электронный ресурс]. URL: https://www.nakhodka-city.ru/docs/2023/9/20239261646551_5853_547.pdf [дата обращения: 02.03.2026].
5. Отчёт «О результатах мониторинга донных отложений и морской биоты в бухте находка в зоне производственной деятельности АО «Находкинский МТП» за летний период 2020–2024 гг.» : [электронный ресурс] // Архив АО «Находкинский МТП». Находка, 2024. С. 26–32. Режим доступа : внутренняя электронная база данных компании [дата обращения: 02.09.2024].

УДК 502/504:551:311.2

Особенности геоэкологических проблем бассейна реки Баксан (Центральный Кавказ)

Чигирова Л. Б.

Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия

✉ leilyach@yandex.ru

Проанализированы основные геоэкологические проблемы бассейна реки Баксан — паводки и селевые потоки; рассмотрено состояние Тырныаузского хвостохранилища. Приведены примеры наиболее разрушительных паводков и селепроявлений с 2017 г. по настоящее время. Предложены меры по минимизации опасного воздействия Тырныаузского хвостохранилища и селевых процессов в бассейне реки Баксан.

Ключевые слова: река Баксан, паводки, селепроявления, Тырныаузское хвостохранилище, рекреация

Река Баксан является одним из крупнейших притоков в системе Терского речного бассейна. Её исток — ледники горы Эльбрус. Общая площадь селевых бассейнов до выхода на предгорную равнину составляет около 2043 км², средняя площадь селевого бассейна — 32,4 км². В бассейне реки Баксан имеют место сели разного происхождения. По водной составляющей преобладают сели дождевого (ливневого) происхождения — 51 % известных селевых процессов [3, 5].

Наиболее проблемными с точки зрения геоэкологии бассейна реки Баксан являются три аспекта — паводки, селевые потоки и наличие Тырныаузского хвостохранилища.

Паводки на реке Баксан возникают практически ежегодно в результате таяния ледников, а также при прохождении интенсивных ливней. При совместном однонаправленном воздействии температуры и осадков неизбежно образование селевого потока или паводка значительной разрушительной способности. Примером может служить мощный наносоводный паводок, прошедший по реке Баксан 5 июля 2018 г. Он образовался вследствие выпадения обильных осадков, когда на высокие уровни половодья наложился дождевой паводок с превышением опасных отметок. Негативные последствия паводка, затронувшего территорию от моста на поляну Чегет до города Тырныауза, включали снос 2 домов, повреждение 4 мостов и 12 участков подмыва, обрушение дорожного полотна автомобильной дороги федерального значения А-158, а также повреждение участков линии газопровода и опоры ЛЭП [5].

Прорыв озера Башкара 1 сентября 2017 г. стал причиной образования катастрофического селевого паводка, который нанёс ощутимый ущерб инфраструктуре населённых пунктов, расположенных в бассейне реки Баксан. Тогда погибли три человека. Федеральная автодорога А-158 Прохладный — Баксан — Эльбрус была повреждена, местами даже полностью разрушена. Почти 7750 местных жителей и отдыхающих оказались заблокированы в Приэльбрусье без транспортного сообщения с остальной частью страны, вывоз туристов и доставку жизненно необходимых продуктов осуществляли вертолётами. Было нарушено газоснабжение шести населённых пунктов: Терскола, Тегенекли, Эльбруса, Нейтрино, Байдаевки и Верхнего Баксана. Отсутствовало энергоснабжение и телефонная (стационарная и мобильная) связь [4].

Бассейн реки Герхожансу считается одним из самых селеопасных и селеактивных не только в Кабардино-Балкарии, но и на всём Северном Кавказе. Практически ежегодно на город Тырныауз обрушиваются селевые потоки этой реки. Так, летом 2025 г. катастрофический сел нанёс огромный ущерб инфраструктуре Тырныауза. Был повреждён мост на федеральной автодороге А-158, она была полностью завалена селевыми массами на протяжении более чем 150 м, оказался снесён пешеходный мост на реке Герхожансу, разрушена левосторонняя часть железобетонной стенки селепропускного лотка, повреждены опоры линии ЛЭП и линии газо- и водоснабжения Тырныауза и т. д. (рис. 1).



Рис. 1. Город Тырнауз после прохождения селевых потоков 21 и 31 июля 2025 г. [6]

Многочисленные объекты (карьер, шахты и пр.) не действующего сейчас Тырнаузского горнообогатительного комбината до сих пор оказывают заметное воздействие на качество вод реки Баксан и её притоков. Поступление отходов обогащения вольфрамо-молибденовых руд в Тырнаузское хвостохранилище прекратилось в 1997 г. и не возобновлялось. К тому времени было накоплено 118 млн м³ мелко- и тонкозернистых масс, содержащих соединения высокой степени опасности [2]. Хвостохранилище расположено на левом берегу реки Баксан, в 1,5 км от посёлка Былым. Это естественный каньон реки Гижгит (левый приток Баксана), закрытый с устьевой стороны дамбой. В обогащённых отходах хвостохранилища содержится до 40 наименований химических соединений, в том числе высокого класса опасности, которые с поверхности пляжа хвостохранилища в виде пылеватых облаков переносятся постоянно дующими вдоль долины реки Баксан ветрами на прилегающие сельхозугодья и природные пастбища.

Угроза прорыва на этом объекте может возникнуть по многим причинам — из-за потери устойчивости низового откоса, переполнения хвостохранилища и размыва поверхностного сбросного канала, разрушения (обвала) обводного туннеля, землетрясения и пр. Положение резко усугубилось в последние десятилетия в связи с активизацией селевых процессов в вышерасположенном водосборном бассейне реки Гижгит: в русло реки выносятся значительные объёмы грунтообломочного материала, камней, поваленных деревьев и др. [1].

Выводы. В связи с активным рекреационным развитием Эльбрусского района важно более детальное изучение геоэкологических проблем бассейна реки Баксан, а также всех паводковых явлений и селепроявлений. Ключевое значение имеют постоянный мониторинг и принятие ряда мер по противоселевой инженерной защите территорий.

Для предотвращения экологической катастрофы в бассейне реки Баксан необходима реконструкция гидротехнических сооружений хвостохранилища на реке Гижгит: это позволит повысить их надёжность и обеспечит безопасность эксплуатации.

Список использованных источников

1. Анахаев К. Н. Об основных природно-техногенных и экологических проблемах Кабардино-Балкарии // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2018. № 6 (86). С. 53–61. <https://elibrary.ru/vrzjgw>
2. Докукин М. Д., Запорожченко Э. В., Знаменский Д. В. Хвостохранилища – объекты повышенной селевой опасности // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита : труды 6-й Международной конференции (Душанбе – Хорог, Таджикистан). Т. 1 / отв. ред. С. С. Черноморец, К. С. Висхаджиева. Душанбе : ООО «Промоушн», 2020. С. 25–38. <https://elibrary.ru/xyhodz>
3. Кадастр селевой опасности юга европейской части России / Н. В. Кондратьева, А. Х. Аджиев, М. Ю. Беккиев [и др.]. Москва ; Нальчик : Феория, 2015. 148 с. <https://elibrary.ru/vhkujh>
4. Черноморец С. С., Петраков Д. А., Алейников А. А., Беккиев М. Ю., Висхаджиева К. С., Докунин М. Д., Калов Р. Х., Кидяева В. М., Крыленко В. В., Крыленко И. В., Крыленко И. Н., Рец Е. П., Савернюк Е. А., Смирнов А. М. Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года // Криосфера Земли. 2018. Т. 22, № 2. С. 70–80. <https://elibrary.ru/ywtcfff>
5. Чигирова Л. Б. О паводке 5 июля 2018 года в бассейне р. Баксан: причины, последствия // Всероссийская открытая конференция по исследованиям атмосферных и склоновых стихийных явлений в условиях современного изменения климата, посвящённая 190-летию создания Гидрометеорологической службы России и 90-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР. Нальчик, 07–11 октября 2024 г. : сборник докладов / под ред. Л. М. Федченко, М. В. Барековой, Р. Х. Калова, М. Д. Докукина. Нальчик : Издательская типография «Принт Центр», 2024. С. 327–330.
6. Чигирова Л. Б. Селепроявления 2025 года в Кабардино-Балкарской Республике и их последствия // Вестник Владикавказского научного центра РАН. 2025. Т. 25, № 4. С. 120–124. <https://doi.org/10.46698/n8132-2756-8608-d>

УДК 911.2:504.06:556.53

Геоэкологическая оценка бассейна реки Самур в условиях трансграничного природопользования и климатических изменений

Шерифова З. Х.¹, Атаев З. В.^{1,2,3}, Зангиева М. Р.^{4,5}

¹Кабардино-Балкарский научный центр РАН, Нальчик, Россия

²Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН, Махачкала, Россия

³Дагестанский государственный педагогический университет имени Р. Гамзатова, Махачкала, Россия

⁴Загатальский государственный природный заповедник, Загата, Азербайджан

⁵Азербайджанский государственный экономический университет, Загатальский филиал, Загата, Азербайджан

✉ kbncran@mail.ru

Дана геоэкологическая оценка современного состояния бассейна реки Самур — одной из важнейших трансграничных рек Восточного Кавказа. На основе полевых и камеральных исследований 2024–2025 гг., ландшафтного картографирования, анализа данных дистанционного зондирования и многолетних гидроклиматических рядов показано, что бассейн испытывает нарастающее давление со стороны трансграничного водопользования, современных климатических изменений и регрессии Каспийского моря. Установлена ведущая роль предгорно-низменного и дельтового звеньев как наиболее уязвимых участков, где пересекаются водохозяйственные, ландшафтно-экологические и биогеографические риски. Сформулированы приоритетные меры устойчивого управления, включающие совместный российско-азербайджанский мониторинг, адаптивный экологический попуск и восстановление дельтовых лесных экосистем.

Ключевые слова: Самур, трансграничное природопользование, геоэкологическая оценка, лиановый лес, климатические изменения, регрессия Каспийского моря, экологический попуск

Бассейн реки Самур относится к числу ключевых природно-хозяйственных систем восточной части Кавказа. Река является важнейшим источником пресной воды для юга Дагестана и северных районов Азербайджана, а в её низовьях сформировался уникальный дельтовый комплекс с реликтовым лиановым лесом, не имеющий аналогов в России. В пределах бассейна сочетаются высокогорные нивально-гляциальные комплексы, внутригорные лесные и лугово-степные ландшафты, предгорные агроландшафты и приморско-дельтовые экосистемы, чувствительные к любым сдвигам гидрологического режима [3].

В последние десятилетия значение Самура как трансграничной реки существенно возросло. На его состоянии одновременно сказываются водохозяйственное перераспределение стока, аграрная трансформация низовий, загрязнение каналов и пойменных участков, деградация пастбищ и ускорение современных климатических изменений. Дополнительным дестабилизирующим фактором выступает регрессия Каспийского моря, изменяющая базис эрозии, гидрогеологические условия дельты и режим увлажнения пойменно-лесных комплексов [4, 7, 9]. Целью работы является комплексная геоэкологическая оценка современного состояния бассейна Самура и выявление приоритетных направлений устойчивого трансграничного природопользования.

Материал и методы. Объектом исследования является бассейн реки Самур длиной 213 км и площадью водосбора 7330 км², вытянутый от высокогорий Главного Кавказского хребта до дельты и побережья Каспийского моря. Высшая точка бассейна — гора Базардюзю (4466 м). В 2024–2025 гг. выполнены экспедиционные исследования, включавшие описание 42 ключевых точек ландшафтных фаций и отбор 86 проб воды, донных отложений, почв и растительности. Камеральный этап включал дешифрирование спутниковых снимков Landsat и Sentinel-2, ГИС-анализ, сопоставление материалов ландшафтного картографирования и анализ многолетних гидроклиматических рядов (1960–2025 гг.).

При интерпретации результатов использован бассейновый подход, позволяющий рассматривать Самур как целостную природно-антропогенную систему, где процессы в высокогорной части, внутригорных долинах, предгорьях и дельте связаны потоками воды, наносов и растворённых веществ. Особое внимание уделено функциональным связям между горным звеном, предгорно-низменными территориями и дельтовыми экосистемами, поскольку именно здесь наиболее отчётливо проявляются эффекты трансграничного водопользования и регрессии Каспия.

Результаты и обсуждение. По материалам среднемасштабного картографирования в бассейне Самура выделены 2 класса, 6 типов и 15 родов ландшафтов. Доминируют высокогорные луговые комплексы площадью около 4171 км² (57 % бассейна) и горные гумидные ландшафты площадью около 1103 км² (15 %) [2]. Чёткая высотная поясность нарушается в Ахтынской котловине и ряде внутригорных расширений, где заметно усиление ксерофитных вариантов растительности и кустарниково-степных комплексов. Особую природоохранную ценность имеют два кластера национального парка «Самурский» — «Дельта Самура» площадью 10 134 га и «Шалбуздаг» площадью 38 139 га [3].

Речная сеть бассейна включает 65 водотоков длиной более 5 км; ключевыми притоками Самура являются Ахтычай, Усухчай и Кара-Самур [5]. Питание реки имеет смешанный характер. Так, ведущую роль играет снегово-ледниковое и дождевое питание, но значимо и участие подземных вод. Для бассейна характерна чрезвычайно высокая эрозионная активность: в бассейне Ахтычая вынос наносов достигает 3,7 млн т·год⁻¹, а модуль эрозии на отдельных участках приближается к 4000 т·км⁻²·год⁻¹ [5]. Это усиливает русловые деформации, заиливание отдельных звеньев русла и уязвимость аллювиально-пролювиальных комплексов предгорий и низовий.

После распада СССР Самур окончательно превратился в объект межгосударственного регулирования. Протокол 1967 г. закреплял схему, по которой 51 % стока отходило Азербайджану, 17 % — Дагестану, а 32 % предназначалось для экологического попуска; на практике российская сторона долгое время недополучала значительные объёмы воды [6]. Соглашение 2010 г. зафиксировало паритетное распределение после вычета 30 % на экологические нужды [8]. Однако современное состояние дельты показывает, что фиксированный экологический попуск в условиях меняющейся водности года и роста водопотребления уже не обеспечивает стабильности природных комплексов. Нижнее звено бассейна дополнительно трансформировано Самур-Дербентским и Самур-Апшеронским каналами, а суммарный водоотбор в отдельные годы достигает очень высоких значений [2].

Для высокогорной части бассейна зафиксировано устойчивое потепление около 0,3–0,4 °C за десятилетие; в региональном масштабе по Восточному Кавказу суммарный рост температуры за последние десятилетия оценивается в 0,8–1,2 °C [1, 7]. Площадь современного оледенения в верховьях Самура за 50–60 лет сократилась на 30–50 %, продолжительность снежного покрова уменьшилась на 15–20 дней, а пик половодья сместился: он происходит на 10–15 дней раньше [10]. Наряду с этим увеличивается повторяемость экстремальных теплосезонных ливней, активизируются эрозионно-склоновые процессы и селевые явления [7]. Не менее значим каспийский фактор: в 2025 г. уровень моря опустился до отметки около –29,3 м, а скорость понижения достигала 30 см·год⁻¹ [4, 9]. Это ведёт к понижению базиса эрозии, врезанию русел в низовьях, падению уровня грунтовых вод и осушению дельтовых и пойменных участков (табл. 1).

По материалам полевых наблюдений и картографического анализа, именно в дельте Самура пересекаются эффекты межгосударственного водodelения, регрессии Каспия и антропогенного преобразования низовий. Дельтовые лугово-лесные ландшафты, прежде занимавшие значительные площади, в последние десятилетия деградируют под влиянием снижения грунтового увлажнения, вырубок, загрязнения и расширения сельхозугодий [3]. Архивные и современные материалы свидетельствуют о существенном сокращении площади Самурского лианового леса, который критически зависит от залегания грунтовых вод и устойчивого экологического попуска.

Таблица 1. Ключевые геоэкологические угрозы и приоритетные меры
в функциональных зонах бассейна Самура

Зона бассейна	Основные проявления геоэкологического напряжения	Приоритетные меры
Высокогорье	– деградация оледенения; – сокращение снежного покрова; – смещение сроков половодья; – усиление ливневой эрозии и селевой активности	– мониторинг криосферы и стока; – наблюдения за опасными процессами; – ограничение локальных рекреационных перегрузок
Внутригорье и предгорья	– высокая эрозионная расчленённость; – перераспределение наносов; – распашка склонов; – деградация пастбищ; – транспортная и селитебная нагрузка	– почвозащитное земледелие; – лесомелиорация и контроль выпаса; – учёт зон опасных процессов при планировании
Низовья и дельта	– снижение экологического попуска; – падение уровня грунтовых вод; – деградация лианового леса; – загрязнение каналов; – риск засоления	– совместный мониторинг Россия — Азербайджан; – адаптивный экологический попуск; – восстановление дельтовых экосистем

Помимо водохозяйственного давления, в бассейне фиксируют сельскохозяйственное загрязнение, наличие бытового и пластикового мусора в каналах и низовьях, а также потенциальную горнодобывающую угрозу, связанную с месторождением Кизил-Дере. В системе приоритетных мер следует выделить следующие: создание совместной российско-азербайджанской системы мониторинга стока и уровня грунтовых вод дельты; переход к адаптивному экологическому попуску; лесомелиоративные и восстановительные работы в Самурском лесу; усиление контроля за загрязнением оросительных каналов; регламентацию рекреационного и паломнического давления в высокогорном кластере «Шалбуздаг».

Закключение. Проведённое исследование показало, что бассейн Самура представляет собой сложную трансграничную геосистему, в которой нарастающее геоэкологическое напряжение формируется под совместным воздействием водохозяйственного перераспределения стока, современных климатических изменений и регрессии Каспийского моря. Наиболее уязвимыми звеньями являются предгорно-низменная и дельтовая части бассейна: именно здесь высокая хозяйственная освоенность сочетается с перестройкой гидрогеологических условий, снижением грунтового увлажнения и деградацией лугово-лесных экосистем.

Современные тенденции — сокращение оледенения, уменьшение продолжительности снежного покрова, смещение сроков половодья, усиление ливневой эрозии и понижение уровня грунтовых вод в дельте — свидетельствуют о необходимости перехода от статической схемы водodelения к адаптивной модели экологического попуска. Такая модель должна учитывать межгодовую изменчивость стока, потребности дельтовых лесных экосистем и возрастающее влияние регрессии Каспийского моря на гидрогеологические условия низовий.

Сохранение уникальных ландшафтов Самура возможно только при координации действий России и Азербайджана и при развитии совместного мониторинга стока, уровня грунтовых вод и состояния дельтовых комплексов, а также при включении природоохранных мер в практику трансграничного управления бассейном. В прикладном отношении приоритетными остаются поддержание адаптивного экологического попуска, восстановление Самурского лианового леса, контроль загрязнения оросительной сети и ограничение нагрузок в наиболее чувствительных горных, предгорных и дельтовых звеньях бассейна.

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. Атаев З. В., Абдулаев К. А. Динамика климата Приморского Дагестана // Биологическое и ландшафтное разнообразие Северного Кавказа и особо охраняемых природных территорий. Труды Тебердинского государственного природного биосферного заповедника. 2006. Вып. 43. С. 214–220.
2. Атаев З. В. Ландшафтное разнообразие и геоэкологическое состояние бассейна реки Самур на Восточном Кавказе // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2025. № 2 (101). С. 63–68. <https://elibrary.ru/eqzhhi>
3. Атаев З. В., Абдулаев К. А., Гаджибеков М. И. Опыт дробного картирования ландшафтного разнообразия дельты реки Самур // Биоразнообразие и рациональное использование природных ресурсов : материалы докладов VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Махачкала : ДГПУ, 2018. С. 238–244. <https://elibrary.ru/xmylgh>
4. Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А. Межгодовые изменения уровней в системе Каспийское море – залив Кара-Богаз-Гол и гидрометеорологических параметров Каспийского региона в первой четверти XXI века // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22, № 6. С. 312–325. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-6-312-325>
5. Гюль К. К., Власова С. В., Кисин И. М., Тертеров Ф. Ф. Реки Дагестанской АССР. Махачкала : Дагкнигоиздат, 1961. 370 с.
6. Демин А. П., Шаталова К. Ю. Принципы и практика распределения водных ресурсов трансграничных рек России // География и природные ресурсы. 2015. № 1. С. 22–29. <https://elibrary.ru/tkkwcl>
7. Росгидромет. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. Санкт-Петербург : Научно-технологические технологии, 2022. 124 с. URL: https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/compressed.pdf [дата обращения: 17.03.2026].
8. Соглашение между Правительством Российской Федерации и Правительством Азербайджанской Республики о рациональном использовании и охране водных ресурсов трансграничной реки Самур (Баку, 03.09.2010). URL: <https://voda.gov.ru/regulatory/doc-3276/> [дата обращения: 17.03.2026].
9. Kasimov N. S., Lychagin M. Yu., Gennadiev A. N., Kroonenberg S. B. The Caspian Sea shores as natural laboratory for coastal landscape geochemical change // Proceedings of the 9th International Conference on the Mediterranean Coastal Environment, MEDCOAST 2009, Sochi, 10–14 November, 2009. Vol. 1. Sochi, 2009, pp. 343–350. <https://elibrary.ru/sldrrx>
10. Tielidze L. G., Nosenko G. A., Khromova T. E., Paul F. Strong acceleration of glacier area loss in the Greater Caucasus between 2000 and 2020. The Cryosphere, 2022, vol. 16, no. 2, pp. 489–504. <https://elibrary.ru/cvvchf>

УДК 504.064/504.4.054

Геоэкологическая оценка реки Кальмиус на территории города Донецка

Шмаков А. С.¹, Юрова Ю. Д.¹, Широкова В. А.²

¹Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия

²Институт истории естествознания и техники имени С. И. Вавилова РАН, Москва, Россия

✉ yuliya.yurova.1996@mail.ru

Представлена комплексная геоэкологическая оценка состояния реки Кальмиус в пределах города Донецка. На основе анализа многолетних данных мониторинга качества воды (2013–2014 и 2022–2024 гг.) и расчёта индекса загрязнения воды (ИЗВ) выявлена динамика техногенной нагрузки. Идентифицированы основные источники антропогенного воздействия: промышленные предприятия, шахтные и дренажные воды, а также коммунально-бытовые и ливневые стоки, привносящие нефтепродукты, фенолы, тяжёлые металлы, органические и биогенные вещества. Результаты исследования подчёркивают критическое состояние экосистемы реки и актуальность разработки комплексных природоохранных мер и долгосрочной стратегии реабилитации.

Ключевые слова: река Кальмиус, Донецк, река, геоэкология, геоэкологическая оценка, антропогенное воздействие, мониторинг, индекс загрязнения воды

Река Кальмиус — доминирующий гидрографический элемент и ключевой источник пресноводных ресурсов Донецкого региона. Кальмиус берет начало на южных склонах Донецкого кряжа (в районе Ясиноватой) и впадает в Азовское море в городе Мариуполе, на территории завода «Азовсталь». Общая протяжённость водотока составляет 209 км, а площадь водосборного бассейна — более 5040 км². В региональной инфраструктуре река играет огромную роль, выполняя разные функции от обеспечения технологических процессов тяжёлой промышленности до поддержания биоразнообразия и удовлетворения рекреационных потребностей городских территорий.

Современное экологическое состояние реки Кальмиус, особенно в пределах Донецка, характеризуется критическим уровнем деградации. На протяжении длительного времени гидросистема испытывает мощнейшую техногенную нагрузку, обусловленную сочетанием плотной городской застройки, концентрации крупных промышленных предприятий и разрушения инфраструктуры вследствие боевых действий в ДНР. Русло реки на территории Донецка зарегулировано, что замедляет процессы естественного самоочищения и обуславливает аккумуляцию загрязняющих веществ в донных отложениях.

По результатам мониторинга, проводимого профильным ведомством — Центром гигиены и эпидемиологии города Донецка, в реке Кальмиус фиксируются нарушения санитарно-гигиенических регламентов. Гидрохимические показатели указывают на глубокую эвтрофикацию водоёма: концентрации азота аммонийного превышают ПДК в 2,5 раза. Содержание нефтепродуктов стабильно удерживается на уровне двухкратного превышения нормативов.

Сложившаяся ситуация диктует необходимость проведения глубокого анализа текущего состояния реки. Комплексная оценка Кальмиуса актуальна не только для локального экологического мониторинга, но и для разработки стратегии восстановления водной безопасности региона в послевоенных условиях.

Цель работы — провести комплексную геоэкологическую оценку реки Кальмиус на территории города Донецка. Был использован комплекс методов. Был проведён анализ литературы и результатов мониторинга вод Кальмиуса в черте Донецка. В соответствии с СанПиН 1.2.3685-21 и РД 52.24.643-2002 был рассчитан индекс загрязнения воды (ИЗВ), для чего использованы данные мониторинга состояния реки в двух створах за 2013, 2014 и 2022–2024 гг. В фокус попал целый ряд показателей: биологическое потребление кислорода (БПК₅), водородный показатель (рН), растворённый кислород (O₂), нитрит-ионы, нефть и нефтепродукты, фенолы, железо общее, молибден, магний, свинец, фосфаты и др.

Основу мониторинга составляют результаты исследований проб воды в двух створах реки Кальмиус — в центре Донецка. Точка 1 — пляж вблизи моста на проспекте Ильича, точка 2 — пляж вблизи моста на бульваре Шевченко (см. ниже рис. 3).

Исследуемые показатели можно назвать основными параметрами, характеризующими техногенное воздействие и органическое загрязнение реки. Сравнение результатов за несколько лет позволило оценить динамику изменений загрязнения воды в реке, определить ключевые факторы загрязнения реки и проанализировать антропогенное воздействие.

Источники антропогенного воздействия на реку Кальмиус. В результате проведённого исследования определены ключевые источники антропогенного воздействия, определяющие экологическое состояние как Донецка, так и всего Донбасса. К основным источникам воздействия можно отнести промышленные предприятия, шахтные и дренажные воды, а также коммунально-бытовые и ливневые стоки.

По результатам проведённого анализа можно сделать вывод о процентном распределении долей влияния трёх категорий источников загрязнений (рис. 1).



Рис. 1. Процентное соотношение распределения вклада источников загрязнений в реку Кальмиус

С 2020 г. в Донецке проводится расчистка русла реки Кальмиус, но это не приводит к улучшению экологической обстановки. Меры, принимаемые на данный момент, недостаточно эффективны ни для полной очистки сточных вод (табл. 1), ни для предотвращения дальнейшего загрязнения реки.

Таблица 1. Характеристика сточных вод, сбрасываемых в реку Кальмиус за 2021 г. [8]

Показатель	Значение
Объём сброса, тыс. м ³	146 015,6
Без очистки, тыс. м ³	5861,7
Недостаточно очищена, тыс. м ³	47 387,2
Нормально очищена, тыс. м ³	80 000,3
Нормативно чистая без очистки, тыс. м ³	12 766,2

Промышленные предприятия. Река Кальмиус подвергается значительной техногенной нагрузке именно из-за промышленных предприятий, а их вдоль её берегов сконцентрировано немало. Главный источник техногенной нагрузки — Донецкий металлургический завод, расположенный непосредственно на берегу. До начала боевых действий на территории ДНР завод был одним из основных источников загрязнения реки. В сточных водах с завода фиксировались высокие концентрации хлоридов, железа, марганца, взвешенных веществ, нефтепродуктов, тяжёлых металлов. С началом боевых действий предприятие остановило свою деятельность, однако после 2022 г. и отведения линии боевого соприкосновения от границ города завод вновь начал функционировать и даже восстанавливать прежние объёмы выплавки чугуна и стали. Другой источник техногенной нагрузки — Донецкий

коксохимический завод. Он с 2014 г. практически не осуществляет свою деятельность, но остаточные источники загрязнения сохраняются: технологические резервуары, шламонакопители и прилегающие шахтные выработки продолжают вымывать в реку аммоний и другие вещества.

Шахтные и дренажные воды. Донецк, расположенный в самом центре Донбасса — одного из крупнейших в мире месторождений каменного угля, входит в число крупных промышленных центров России. Здесь залегают огромные пласты высококачественного угля, включая антрацит и коксующий уголь. В таких условиях Кальмиус является важнейшим реципиентом коллекторно-дренажных и шахтных вод. Этот вид стоков характеризуется специфическим химическим составом и высокой агрессивностью по отношению к естественным водным экосистемам. Влияние горнорудной промышленности на регион обусловлено как функционирующими предприятиями, так и процессами, протекающими на ликвидированных (затопленных) и недействующих шахтах.

Основной источник деградации вод в Кальмиусе — принудительный водоотлив, необходимый для поддержания стабильности горных выработок.

Шахтные воды Донецкого бассейна характеризуются экстремально высокими показателями сухого остатка (от 2500 до 5000 мг·дм⁻³). Такие воды поступают как из проложенных каналов, так и через грунт, что приводит к переходу воды Кальмиуса из гидрокарбонатного класса в сульфатно-натриевый, а это делает её непригодной для большинства видов хозяйственного использования без дорогостоящей водоподготовки.

Коммунально-бытовые и ливневые стоки. Эти стоки оказывают на Кальмиус максимальное влияние. Система коммунального водоотведения Донецка — мощный источник поступления загрязняющих веществ в реку. В городе функционируют комплексы очистных сооружений, однако их проектная мощность и технологические циклы не всегда обеспечивают достижение нормативных показателей очистки. Некоторые объекты — комплексы очистных сооружений — разрушены или уничтожены в результате боевых действий в регионе.

Основными аспектами воздействия являются биогенное загрязнение (для коммунальных стоков характерна высокая концентрация соединений азота и фосфора), органическое загрязнение (поступление органических веществ оценивается по БПК₅, свидетельствующему об окислительной деструкции органики) и микробиологические риски (стоки бытового сектора несут в себе значительную бактериальную нагрузку, что ограничивает использование реки в рекреационных целях).

Ливневые стоки в Донецке — слабо контролируемый фактор загрязнения. В отличие от коммунальных вод, которые проходят через очистные сооружения, значительная часть поверхностного стока попадает в русло реки через систему ливневой канализации или непосредственно с рельефа местности (с дорог, мостов и пр.), причём без очистки (рис. 2).

Также существенный вклад в деградацию прибрежных экосистем вносят стихийные скопления твёрдых коммунальных отходов. Процессы биохимического разложения мусора в пойменной зоне инициируют вымывание высокотоксичного фильтрата, насыщенного фенольными соединениями, аммонийным азотом и тяжёлыми металлами, попавшими в водоносные горизонты и речной сток.

Именно поверхностный сток и неочищенные хозяйственно-бытовые воды являются доминирующим фактором загрязнения реки Кальмиус.

В результате многолетнего воздействия — от загрязнений шахтными водами и промышленными сбросами до нефтяного и химического загрязнения городскими ливневыми стоками — вода в Донецке стабильно остаётся загрязнённой.

Мониторинг экологического состояния реки Кальмиус. Чтобы оценить текущее состояние реки, был проведён анализ множества литературных источников, а также данных экологического мониторинга за 2013, 2014 и 2022–2024 гг. Отбор проб воды осуществлялся на участке Нижнекальмиусского водохранилища в двух точках вблизи важнейших автодорог города Донецка (проспекта Ильича и бульвара Шевченко), а в 2024 г. — ещё и в точке на Верхнекальмиусском водохранилище (рис. 3).

Обнаружено превышение ПДК по следующим показателям: биохимическое потребление кислорода (БПК₅), аммоний-ион, нитрит-ион, нефть и нефтепродукты, фенолы, синтетические поверхностно-активные вещества, железо общее, медь, цинк, хром (шестивалентный), марганец,

Шмаков А. С., Юрова Ю. Д., Широкова В. А.

Концентрации фенолов и тяжёлых металлов, основным источником которых являются промышленные предприятия в черте города, существенно превышали ПДК в 2013 и 2014 гг. В 2022–2024 гг., при практически нулевой промышленной нагрузке на регион, значения многих показателей, практически пришли к ПДК и увеличивались лишь в случае восстановления промышленных выработок предприятий. При этом уровень загрязнения реки остаётся высоким.

Для детальной оценки качества вод использован метод расчёта индекса загрязнения воды (ИЗВ) для каждой пробы по ряду показателей, для которых выявлены наиболее значимые превышения ПДК. Результаты расчётов представлены в табл. 2 и на рис. 4.

Таблица 2. Результаты расчётов индекса загрязнения воды для конкретных точек и дат (н. д. — нет данных)

Дата отбора проб	Пляж вблизи проспекта Ильича	Пляж вблизи бульвара Шевченко	Верхнекальмиусское водохранилище
24.04.2013	4,08214286	4,0160714	н. д.
15.05.2013	4,3802571	4,1875	н. д.
03.06.2013	4,9	4,3839286	н. д.
01.07.2013	4,9392857	4,6428571	н. д.
05.08.2013	8,5339286	8,2339286	н. д.
03.09.2013	4,6625	5,2071429	н. д.
16.04.2014	4,4875	4,7982143	н. д.
14.04.2022	5,0017857	4,6428571	н. д.
16.05.2022	3,7803571	3,4089286	н. д.
25.05.2022	3,4857143	3,7476191	н. д.
27.06.2022	3,8392857	4,6785714	н. д.
25.07.2022	3,9464286	4,425	н. д.
07.09.2022	5,1775	5,0507143	н. д.
29.03.2023	4,4203571	4,7571426	н. д.
16.05.2023	4,7547143	4,7571429	н. д.
22.11.2024	3,7256444	3,7121429	3,9678588

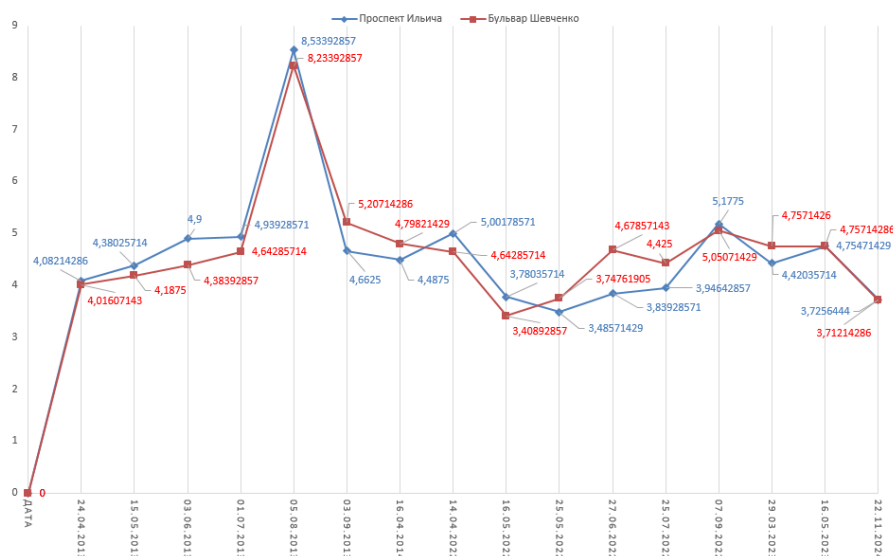


Рис. 4. График изменения индекса загрязнения воды по двум точкам отбора на реке Кальмиус

В 2024 г. к местам отбора проб добавилась ещё одна точка, находящаяся на Верхнекальмиусском водохранилище. ИЗВ для неё также был рассчитан. Значение составило 3,9678588.

Результаты геоэкологической оценки Кальмиуса на территории Донецка свидетельствуют о том, что река находится под колоссальной антропогенной нагрузкой. Она непосредственно связана с работой предприятий и шахт, а также со сточными водами (с хозяйственно-бытовыми стоками).

Данные исследований позволили сделать следующие выводы. Периодом наибольшего загрязнения является 2013 г.: тогда все промышленные предприятия региона и шахты работали в штатном режиме и оказывали огромное влияние на экологическое состояние.

После начала боевых действий большая часть промышленных предприятий и шахт закрылась. Состояние Кальмиуса стало улучшаться, но значительных подвижек не произошло. Это напрямую связано не только с ведением боевых действий на территории региона, но и с изношенностью коммунальной инфраструктуры.

Донецкая фильтровальная станция (ДФС) — основной водоснабжающий объект региона — за 2014–2018 гг. была обстреляна не менее шести раз, и её оборудование уничтожалось частично или полностью. В апреле 2024 г. глава ДНР Денис Пушилин заявил: «Это важный для нас объект, который снабжал водой жителей Донецкой агломерации. Поэтому проектные работы начнём в ближайшее время». Он добавил, что оборудование для восстановления закуплено и вопрос восстановления ДФС уже обсуждался с заместителем председателя правительства Российской Федерации Маратом Хуснулиным [3].

Кроме того, вся инфраструктура Донбасса максимально изношена: она не восстанавливалась и не модернизировалась со времён СССР.

Всё это подтверждает необходимость дальнейшего мониторинга состояния реки Кальмиус для прогнозирования её состояния, а также для разработки новых природоохранных мер и формирования долгосрочной стратегии реабилитации реки, что позволит улучшить экологическую обстановку в реке Кальмиус и в Донбассе в целом.

Список использованных источников

1. «Геоизыскания». «Мониторинг водных объектов: цели, методы и регулярные наблюдения». ООО Геоизыскания, 2021.
2. Государственный комитет экологической политики ДНР. Информационная записка о состоянии водных ресурсов г. Донецк, 2017. URL: <https://gkecopoldnr.ru/stat-wr-donetsk/> [дата обращения: 30.01.2025].
3. Важный объект, снабжающий водой республику: в ДНР восстановят Донецкую фильтровальную станцию. Комсомольская правда. 2024. URL: <https://www.donetsk.kp.ru/daily/27600/4925282/> [дата обращения: 26.03.2026].
4. Побережнюк Р. Чем ниже по течению, тем хуже качество воды. Комсомольская правда. 2020. URL: <https://www.donetsk.kp.ru/daily/27139.5/4231684/> [дата обращения: 25.03.2026].
5. В апреле — декабре 2024 г. Донецксталь выпустила почти 175 тыс. т продукции. Metalinfo.ru. Новость от 15.01.2025.
6. В реках Донбасса обнаружены ртуть, фосфаты и нефтепродукты. Национальное информационное агентство «Экология». 2025. URL: <https://nia.eco/2025/03/19/99588/> [дата обращения: 23.03.2026].
7. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические требования к качеству воды центрального водоснабжения. ПДК химических веществ для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования.
8. Сырых А. С., Трошина Е. А. Экологическое состояние реки Кальмиус и её притоков: оценка пути решения проблем // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов : сборник материалов всероссийской научной конференции (с международным участием) аспирантов и обучающихся, посвящённой Всемирному дню окружающей среды, Донецк,

- 16–17 апреля 2025 г. Донецк : Донецкий национальный технический университет, 2025. С. 112–116. <https://elibrary.ru/pbegda>
9. Экологические проблемы Донбасса : сборник материалов. Донецк : Министерство образования и науки ДНР, 2017.
10. Шмаков А. С. Геоэкологическая оценка реки Кальмиус на территории города Донецка : выпускная квалификационная работа по направлению 05.03.06 «Экология и природопользование» (профиль «Природопользование»). Москва : ГУЗ.

UDC 556.166:528.8

Flood susceptibility assessment in a mountain river basin using the Physical Susceptibility to Floods Index in the municipality of Petrópolis, Brazil

Lado M. L. R., Miranda F. M., de Sousa M. M., and Rezende O. M.

Environmental Engineering Program, Polytechnic School of Federal University of Rio de Janeiro (PEA-POLI/UFRJ)

✉ francismiranda@poli.ufrj.br

The assessment of flood physical susceptibility constitutes a parallel and preliminary stage that is fundamental to flood risk management, providing support for land use planning, flood protection policies, mitigation measures, and alert systems, among others. This study applies the Physical Susceptibility to Floods Index in the municipality of Petrópolis, settled in a mountainous region of Rio de Janeiro (Brazil), based on topographic and hydrographic parameters derived from geospatial data. The results identify spatial patterns of flood-prone areas, highlighting zones with greater predisposition to water accumulation and concentration.

Keywords: flood susceptibility, GIS, mountain basin, Petrópolis, PhySFI

Floods are among the most recurrent and damaging natural disasters, affecting urban infrastructure and socioeconomic systems worldwide. Climate change and increasing urbanization intensify flood occurrence, especially in mountain regions where steep slopes and rapid runoff dynamics amplify hydrological responses. In this context, identifying areas prone to flooding is essential for effective flood risk management, which encompasses hazard prediction, vulnerability assessment, and the development of mitigation and adaptation strategies aimed at reducing flood impacts [9].

This study aims to assess flood susceptibility using the Physical Susceptibility to Floods Index in a mountain river basin applied to the municipality of Petrópolis, Brazil, a region historically affected by recurrent hydrometeorological disasters. Between 2020 and 2024, flood events, pluvial flooding, and intense rainfall episodes in the municipality resulted in approximately 15,270 displaced people and economic losses exceeding USD 221,3 million, highlighting the high social and economic vulnerability of the region to extreme rainfall events [1]. The severity of this context was evidenced by the 2022 disaster, when intense rainfall triggered floods and landslides that resulted in 241 fatalities [3], marking one of the deadliest events in the city's history.

Material and Methods. The Physical Susceptibility to Floods Index (PhySFI) [8] is a GIS-based multicriteria methodology designed to evaluate the physical predisposition of an area to flooding based on measurable terrain and surface characteristics. The method integrates key factors that influence water accumulation and flow dynamics, allowing the identification of areas with greater susceptibility to inundation.

In this study, the adapted version of the index proposed by Cabral [2] was applied, which refines the original formulation by adjusting the normalization procedures and the weighting process of the conditioning factors, improving the sensitivity of the model to local topographic conditions.

The analysis was conducted for the municipality of Petrópolis, located in a mountainous region of the state of Rio de Janeiro (Brazil). The area is characterized by steep slopes, complex relief, and a dense drainage network, which contribute to rapid runoff generation and increased flood potential during intense rainfall events.

The primary dataset used was a Digital Elevation Model (DEM), from which elevation and slope were derived. Elevation was used to identify low-lying areas prone to water accumulation, while slope was used to represent surface runoff dynamics, with lower gradients favoring water retention and higher gradients promoting faster drainage.

In addition, land use data were incorporated to estimate surface impermeability, representing the influence of urbanization on runoff generation. This variable allows distinguishing between permeable and impermeable surfaces, which directly affect infiltration capacity and surface flow.

Hydrographic data was also used to compute proximity to watercourses, representing the spatial relationship between terrain and drainage channels. This factor accounts for the increased likelihood of flooding in areas located closer to rivers and streams, particularly in zones with low slopes.

All variables were standardized and integrated within a GIS environment according to the PhySFI formulation, resulting in a continuous spatial index. Higher index values indicate greater physical susceptibility to flooding, allowing the identification of critical areas within the study region.

Results. The analysis was based on geospatial datasets representing the main physical controls on flood susceptibility. A DEM with 30-m spatial resolution, obtained from the Copernicus program [4], was used to derive elevation and slope. Hydrographic information was extracted from the DEM using the WhiteboxTools [6] extension within QGIS, allowing the delineation of the drainage network and the calculation of distance and slope relative to watercourses. In addition, land use data from 2024, provided by the MapBiomass project [7], was used to represent surface characteristics associated with runoff generation.

Once the PhySFI partial indicators were calculated and normalized, the Physical Susceptibility to Floods Index was calculated as a weighted combination of standardized variables [2], according to the following expression:

$$PhySFI_v2.0 = \left[I_{slope}^{n1} \cdot (p1 \cdot I_{imp} + p2 \cdot I_{prox})^{n2} \right] \cdot I_{elev}, \quad (1)$$

where I_{elev} is elevation indicator;

$n1$ is weight assigned to the slope indicator (I_{slope});

$p1$ is weight assigned to the impermeabilization indicator (I_{imp});

$p2$ is weight assigned to the watercourse proximity indicator (I_{prox});

$n2$ is weight assigned to the second term of the product composed of the weighted sum of the impermeabilization and proximity indicators.

Note that $n1 + n2 = 1$, and $p1 + p2 = 1$.

In this study, the adopted weights were as follows: $n1 = 0.33$; $n2 = 0.67$; $p1 = 0.5$; and $p2 = 0.5$. This configuration emphasizes the combined contribution of proximity to drainage and surface impermeabilization, while preserving the influence of slope and elevation on runoff processes. This balance reflects the main physical controls on flood susceptibility in the Petrópolis region.

The resulting PhySFI values were spatially distributed to generate a flood susceptibility map for the municipality of Petrópolis (Fig. 1). Although the index ranges from 0 to 1, the results were classified into five susceptibility classes (very low, low, medium, high, and very high) to enhance spatial interpretation and support the identification of critical areas.

The spatial distribution of flood susceptibility in Petrópolis reveals a strong correlation between the drainage network and areas with elevated PhySFI values. While most of the municipality is classified as a zone of “Very Low” susceptibility, corresponding to the steep slopes and largely forested areas known as the Serra dos Órgãos, zones of “High” and “Very High” susceptibility are concentrated in the narrow valley bottoms.

These critical areas closely follow the patterns of the Piabanha and Quitandinha river basins. The analysis indicates that the regions most prone to flooding coincide with historical urban expansion, highlighting the interaction between natural topography and anthropogenic modifications. In these valleys, the combination of low slopes, high surface impermeability, and immediate proximity to rivers and streams creates a “funnel effect,” which accelerates surface runoff and enhances the risk of rapid inundation during extreme rainfall events.

A more detailed analysis was conducted, focusing on an urbanized valley area on the banks of the Piabanha River (Fig. 2), where high susceptibility values coincide with densely occupied areas. This localized assessment highlights the practical applicability of the PhySFI in identifying critical zones within urbanized areas. Although the present study focuses on physical susceptibility, these results provide

a valuable basis for preliminary flood risk assessments when combined with vulnerability indicators, such as population exposure, socioeconomic conditions, infrastructure, and economic activities. This integration would allow for a more comprehensive understanding of flood risk, supporting targeted and effective risk management strategies.

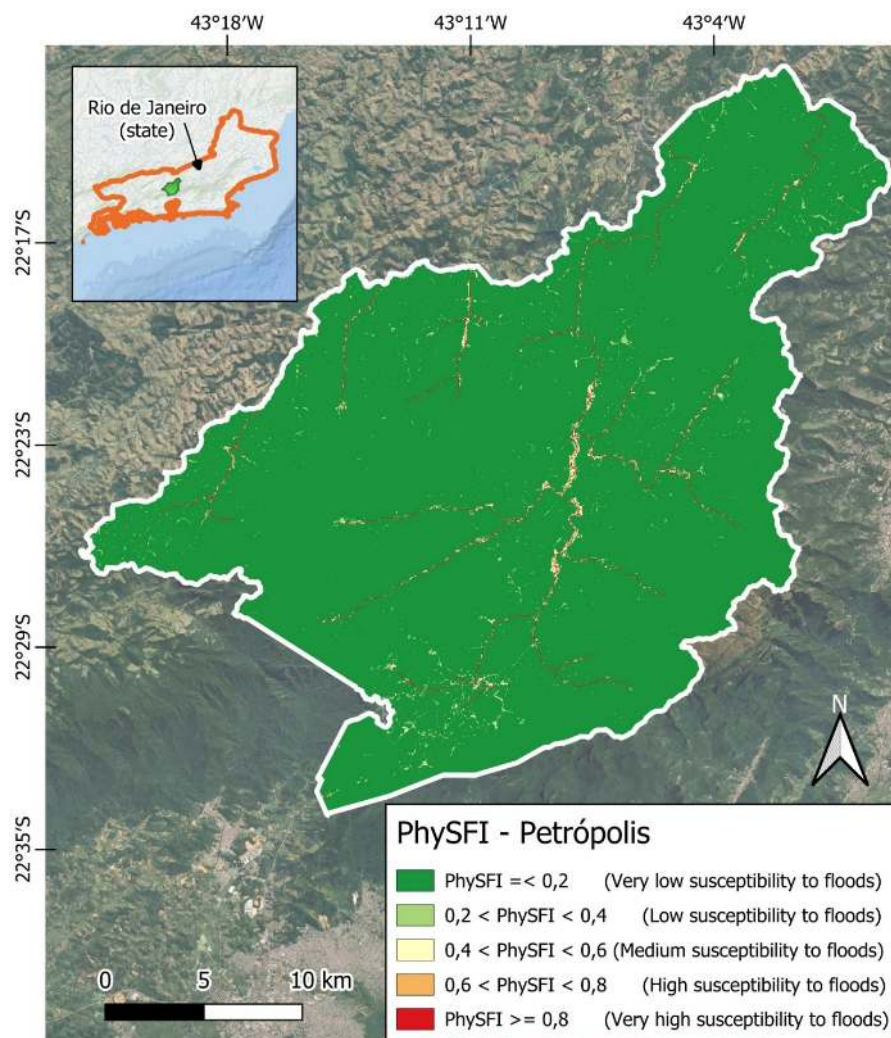


Fig. 1. Physical Susceptibility to Floods Index – Municipality of Petrópolis

Validation. The validation of the PhySFI results was conducted through a spatial comparison with flood extent simulations generated by the MODCEL hydrodynamic model for the central region of Petrópolis. This model explicitly represents flow dynamics and has been previously calibrated and validated for the study area [5].

The comparison was based on the flood map corresponding to the 50-year return period, selected as a representative scenario of significant overflow conditions. As shown in Fig. 3, the PhySFI map presents a reasonable spatial correspondence with the MODCEL simulated flood map, particularly along the main drainage axes and valley bottoms, where areas of high susceptibility tend to coincide with inundated zones, classified as highly susceptible at all flood heights above 0.30 m.

However, the comparison also highlights important conceptual and practical differences between the two approaches. The MODCEL model simulates the temporal and spatial dynamics of flooding, accounting for rainfall inputs, flow data within river channels, hydraulic interactions with floodplains, and the influence of urban drainage systems. In contrast, the PhySFI is a static index based solely on physical terrain attributes, such as elevation, slope, land use, and proximity to watercourses. As a result, the PhySFI does not aim

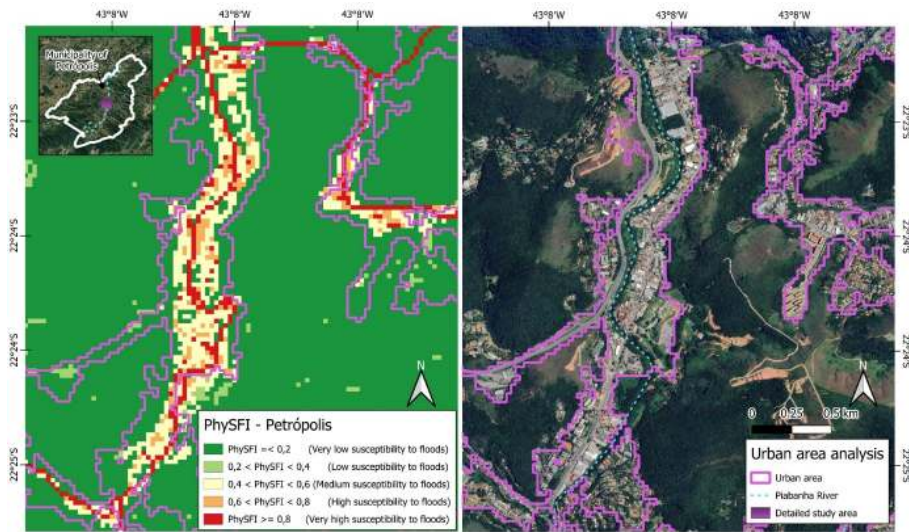


Fig. 2. Local analysis of the PhysFI in an urban valley of Petrópolis

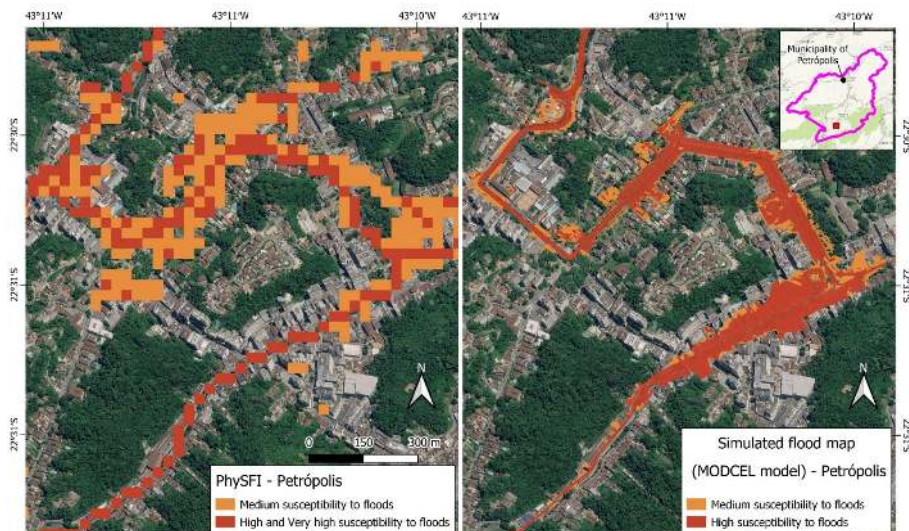


Fig. 3. Comparison between flood maps

to predict where flooding will occur under a specific event, but rather aims to identify areas that are inherently more prone to water accumulation and flow concentration. Consequently, not all areas classified as highly susceptible are necessarily inundated in the MODCEL simulation, and some flooded areas may not be fully captured by the index due to the absence of hydrodynamic processes and infrastructure representation.

These differences reflect the complementary nature of the two approaches. Despite these limitations, the PhysFI consistently identifies the main flood-prone corridors, demonstrating its usefulness as a preliminary tool to indicate priority areas for flood risk assessment.

Discussion. The flood susceptibility map generated using the PhysFI reveals consistent spatial patterns controlled by terrain characteristics. Areas of high and very high susceptibility are concentrated along the narrow valley bottoms of the Piabanha and Quitandinha basins, where low slopes, proximity to watercourses, and increased surface impermeability favor water accumulation and runoff concentration. These patterns highlight the combined influence of topography and land use in mountainous urban environments such as Petrópolis. The concentration of high-susceptibility zones in densely occupied valleys reflects the overlap between natural drainage pathways and urban expansion, increasing the potential for flooding.

The comparison with hydrodynamic simulation results indicates that the areas identified by the index are representative of the main flood-prone zones. However, important differences remain, as actual flooding depends on dynamic factors, such as rainfall intensity, flow routing, and drainage system performance, which are not captured by the PhySFI.

Additionally, mountainous regions are susceptible to flash floods, which exhibit distinct dynamics and formation processes not adequately captured by the PhySFI formulation. These events thus warrant mapping through complementary approaches.

In this sense, the index should be interpreted as an indicator of areas more prone to flooding rather than a predictor of flood extent, providing a simplified but meaningful representation of the main factors influencing flooding.

Conclusion. This study demonstrates that the PhySFI is effective in identifying areas with higher flood susceptibility in the mountainous urban context of Petrópolis. The method captures the main spatial patterns associated with terrain and land use, particularly in valley bottoms, where flood potential is naturally higher and intensified by urbanization.

Although it does not represent hydrodynamic processes, the index provides a reliable initial assessment of flood-prone areas. Its simplicity and reliance on widely available data make it a practical tool for preliminary analyses, especially in contexts where detailed modeling is not available.

The results can support urban planning and risk management by indicating priority areas for further investigation, as well as for the application of more detailed hydrological and hydraulic studies.

References

1. Brazil. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (MIDR). Atlas Digital de Desastres no Brasil. Available at: <https://atlasdigital.mdr.gov.br>.
2. Cabral F. M. Índice de risco potencial a inundações como ferramenta para o planejamento de áreas urbanas em expansão. Master's Dissertation, Federal University of Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), Rio de Janeiro, 2021.
3. DRM-RJ (Serviço Geológico do Estado do Rio de Janeiro). Relatório Técnico: Evento de movimentos de massa e inundações em Petrópolis – RJ, fevereiro de 2022. Rio de Janeiro, 2022. Available at: https://www.rj.gov.br/drm/sites/default/files/arquivos_paginas/rl_09.2022.01-mtdlg-petropolis.pdf.
4. European Space Agency (ESA). Copernicus Digital Elevation Model (DEM) – 30 m resolution. Available at: <https://dataspace.copernicus.eu>.
5. Haniya M. V., Assunção V. D., Vallejos B. A., Rodrigues Lado M. L., Jacob A. C. P., Santiago E. P., Oliveira A. K. B., Magalhães P. C., Sousa M. M. Diagnóstico de inundações no município de Petrópolis por simulação hidrodinâmica. III Encontro Nacional de Desastres, 2023.
6. Lindsay J. B. WhiteboxTools User Manual. University of Guelph, 2016.
7. MapBiomas project. Coleção 9 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra no Brasil. Available at: <https://brasil.mapbiomas.org>.
8. Miranda F. M. Índice de susceptibilidade do meio físico a inundações como ferramenta para o planejamento urbano. Master's Dissertation, Federal University of Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), Rio de Janeiro, 2016.
9. Schanze J. Flood Risk Management – A Basic Framework. In: Flood Risk Management: Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures / J. Schanze, E. Zeman, J. Marsalek (Eds). NATO Science Series, vol. 67. Dordrecht : Springer, 2006, 20 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4598-1_1

Именной указатель

Diallo A. I. P., [33](#), [60](#)

Keita I., [33](#), [60](#)

Lado M. L. R., [160](#)

Miranda F. M., [160](#)

Rezende O. M., [160](#)

de Sousa M. M., [160](#)

А

Абдулаев К. А., [43](#), [83](#)

Алексеев Я. И., [60](#)

Алиева Ж. М., [8](#)

Ануфриева Е. В., [16](#)

Атаев З. В., [19](#), [25](#), [43](#), [83](#), [137](#), [149](#)

Ахмедов А. С., [52](#), [129](#)

Ахмедов С. А., [98](#)

Б

Бекмурзаева Л. Р., [72](#)

Белакаев С. С., [31](#)

Братанов Н. С., [33](#), [60](#)

Братков В. В., [72](#)

В

Вышкваркова Е. В., [68](#), [112](#)

Г

Гайрабеков У. Т., [105](#), [108](#)

Гассиев Д. Д., [16](#)

Гелагаев А. Ш., [38](#)

Голубкина Н. А., [116](#)

Горбунов Р. В., [33](#), [60](#), [112](#)

Горбунова Т. Ю., [33](#), [60](#), [112](#)

Гусейнова А. Ш., [52](#), [129](#)

Гюльмагомедов А. М., [83](#), [137](#)

Д

Джамалудинов Д. Ш., [43](#)

Дидиев А. А., [105](#), [108](#)

Дрыгваль А. В., [112](#)

Дрыгваль П. В., [47](#)

З

Зангиева М. Р., [149](#)

И

Ибаев Ж. Г., [52](#), [98](#)

Игнатъева Д. А., [60](#)

Идрисов И. А., [65](#)

К

Каширина Е. С., [68](#)

Келип А. А., [112](#)

Керимов И. А., [72](#)

Керимова Э. Д., [83](#)

Керимова Э. И., [8](#)

Киселёва М. В., [33](#), [60](#)

Кнейб Е. Н., [76](#)

Кошеваров А. А., [116](#)

Курашева О. А., [81](#)

Курбанисмаилова А. С., [129](#)

Кучинская И. Я., [83](#)

Л

Линёва Н. П., [68](#)

М

Мамадиев Н. А., [89](#)

Мамаев А. С., [52](#), [98](#), [129](#)

Мамаев С. А., [52](#), [98](#)

Михайлычева М. В., [60](#)

Монахова Ю. А., [60](#)

Музаев И. Х., [105](#), [108](#)

Н

Никифорова А. А., [112](#)

Нуралиев М. Э., [137](#)

П

Плотникова У. Д., [116](#)

Р

Решетняк О. С., [120](#)

Ржечицкий Я. А., [16](#)

С

Скок Н. В., [125](#)

Сулейманов В. К., [52](#), [98](#), [129](#)

Сулейманова Ф. В., [129](#)

Т

Табунщик В. А., [112](#), [133](#)

Ф

Фаерман А. В., [33](#), [60](#)

Фам К. Н., [33](#), [112](#)

Фролов Д. А., [137](#)

Х

Хлебосолова О. А., [116](#)

Хусаинов И. М., [43](#)

Хусаинова А. У., [142](#)

Ч

Черкашина С. А., [16](#)

Чигирова Л. Б., [146](#)

Ш

Шадрин Н. В., [16](#)

Шварцев А. А., [60](#)

Шерифова З. Х., [149](#)

Широкова В. А., [153](#)

Широкова Ю. А., [16](#)

Шмаков А. С., [153](#)

Щ

Щапова Е. П., [16](#)

Ю

Юрова Ю. Д., [142](#), [153](#)

Юровских А. М., [125](#)

Я

Яковенко В. А., [16](#)

Яцук А. В., [76](#)

Научное издание

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

V Международная научная конференция

16–17 апреля 2026 г.
Севастополь, Россия

Вёрстка, макет: Сергеева А. В., Копытова О. Ю.

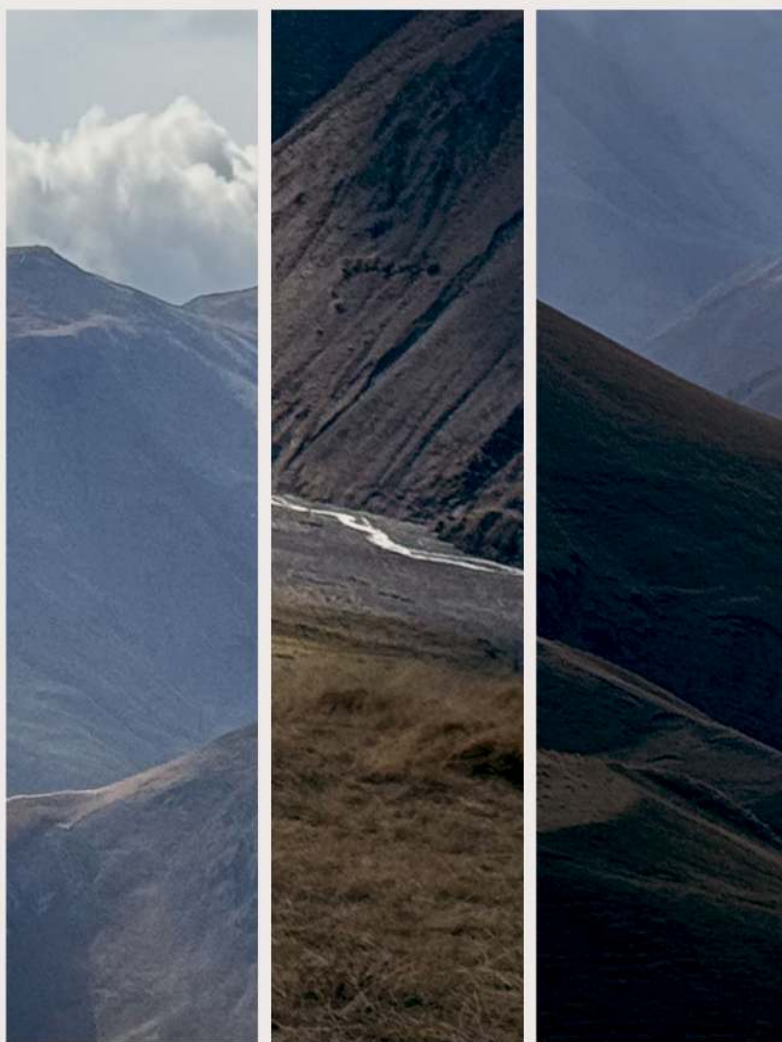
Корректурa: Копытова О. Ю.

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 978-5-6052832-6-3



9 785605 283263 >