

УДК 504.4.054

Индикация степени засоления аквальных ландшафтов

Е.С. Ушакова, А.А. Первощикова

Пермский государственный национальный исследовательский университет

614068 Пермь, ул. Букирева, 15. E-mail: ushakova.evgeniya@gmail.com

(Статья поступила в редакцию 29.09.2025 г.)

Засоление пресных вод представляет собой одну из наиболее серьезных угроз для глобальных водных экосистем и связанного с ними биоразнообразия. Особое внимание в контексте засоления аквальных ландшафтов уделяется донным отложениям, которые выступают не только как индикаторы, но и как активные участники-накопители солей. Понимание механизмов засоления донных отложений при естественном и техногенном воздействии, их последствий и возможностей восстановления критически важно для разработки эффективных стратегий управления и охраны водных ресурсов. В данном обзоре рассматривается проблема засоления аквальных ландшафтов таежной зоны на примере Верхнекамья (Пермский край, Россия) – территории с развитой горнодобывающей промышленностью, где одной из важнейших задач является восстановление посттехногенных территорий. Представлены следующие данные: (1) мировая статистика засоления пресных вод; (2) индикаторы засоления; (3) региональные характеристики солевой нагрузки; (4) комплексные методы исследования. Данное исследование показывает, что аквальные комплексы посттехногенных территорий представляют собой сложные динамические системы, требующие комплексных подходов к устранению солевого загрязнения и восстановления таких участков.

Ключевые слова: *водные экосистемы, индикаторы засоления, донные отложения, техногенные осадки, галогенез, Верхнекамье.*

DOI: 10.17072/psu.geol. 24.4.385

Введение

Засоление пресноводных экосистем, или «синдром засоления пресной воды (Freshwater Salinization Syndrome)», имеет общемировое распространение, ведущее к истощению мировых запасов пресных вод, которых на Земле только 2,5 % (Perera et al., 2024; Maas et al., 2023). Различают первичное и вторичное засоление. Первичное происходило на протяжении всей истории Земли в результате естественного накопления солей, в то время как вторичное засоление может протекать в масштабах десятилетий или даже быстрее в результате антропогенных процессов (Herbert et al., 2015). В данном обзоре анализируются процессы вторичного засоления отдельно и в сочетании с естественными процессами засоления в аквальных ландшафтах. Индикаторами засоления в аквальных ландшафтах обычно выступают изменения в соотношении основных ионов

(Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} и другие) в составе воды, которые происходят вследствие поступления неорганических солей различного происхождения (NaCl , Na_2SO_4 , NaHCO_3 , MgSO_4) (Chen et al., 2024).

Среди естественных процессов засоления пресных вод можно выделить несколько основных механизмов. К ним относятся химическое выветривание и эрозия почвы, которые включают в себя процессы испарения и выщелачивания соленых минералов в почвенном профиле. Значительную роль играет перенос солей в речных системах, осуществляемый посредством перемещения наносов, а также атмосферное осаждение, происходящее при выпадении осадков. Особую категорию составляют процессы миграции солей в атмосфере прибрежных морских районов и интрузия соленой воды (Moyano-Salcedo et al., 2025). Существенное влияние оказывают также геологические условия, среди которых можно отметить неглубокое залегание

© Ушакова Е.С., Первощикова А.А., 2025



Работа лицензирована в соответствии с CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ние соляных пластов и естественную родниковую разгрузку высокоминерализованных вод в речных бассейнах (Ушакова, 2024).

Наибольшее количество солей поступает в водоемы со сточными водами промышленных предприятий (по производству кожи, переработке рыбы, добыче полезных ископаемых, добычи нефти и газа при гидравлическом разрыве пласта, текстильной и бумажной промышленности, фармацевтической промышленности, и отраслях промышленности, основанных на применении рассолов) и сельского хозяйства (Singh et al., 2023; Alam et al., 2022). Средняя минерализация (г/л) сточных вод кожевенных заводов находится в диапазоне $37,8 \pm 32$, нефтехимического производства – $35 \pm 28,4$, фармацевтической промышленности – $35,5 \pm 17$, текстильной промышленности – $7,3 \pm 4,5$, сельского хозяйства – $5 \pm 5,8$ (Srivastava et al., 2021). Дополнительным фактором антропогенного засоления пресных вод служит применение противогололедных реагентов на основе хлоридов при обработке автомобильных дорог. В частности, используются такие соединения, как хлорид натрия (NaCl), хлорид кальция (CaCl_2), хлорид магния (MgCl_2) и хлорид калия (KCl), которые впоследствии могут попадать в водоемы и приводить к повышению их солености (Zhao et al., 2025).

Мировая статистика показывает, что общий объем сточных вод, сбрасываемых в поверхностные водные объекты, оценивается примерно в $3594 \times 10^8 \text{ м}^3$, из них только 41,4 % поступает на очистные сооружения (Сао et al., 2025). По данным Росводресурсов, на территории Российской Федерации в 2023 г. в водные объекты поступило 37468,7 млн м^3 сточных вод, а наибольший объем сброса вод был зафиксирован в бассейне Каспийского моря (12087,9 млн м^3 , из них 42 % – загрязненные, 36,7 % – нормативно-очищенные, 27 % – нормативно-чистые) (О состоянии ..., 2023), поэтому бассейны Волго-Камских водохранилищ характеризуются более высоким уровнем водной нагрузки (Georgiadi et al., 2025). Согласно докладу РФ (О состоянии ..., 2023), среди основных анионов сточных вод наибольший вклад вносят Cl^- – 5966,4 тыс. т, далее SO_4^{2-} – 1756,3 тыс. т, NO_3^- – 379,3 тыс. т, NO_2^- – 5421,2 т и F^- – 1239,2 т.

Исследования свидетельствуют о том, что засоление пресных вод не ограничено только полузасушливыми и средиземноморскими регионами, а также наблюдается в холодных и умеренных регионах (Canedo-Arguëlles et al., 2019; Jeppesen et al., 2023). В континентальной части на значительном удалении от морского побережья отмечается поступление высокого содержания хлорид-ионов, обусловленное неглубоким залеганием соляных пластов и естественной родниковой разгрузкой высокоминерализованных вод, в результате чего с XV в. зародился соляной промысел на территории Верхнекамья (Ушакова, Меньшикова, 2024). После открытия Верхнекамского месторождения солей в 1925 г. и организации на его территории горно-химического производства было зафиксировано поступление высоких концентраций хлорид-ионов (Cl^-) и катионов натрия (Na^+) как от точечных, так и от диффузных источников загрязнения, к которым относятся: поверхностный сток с промышленных территорий и зон транспортной инфраструктуры, естественная разгрузка высокоминерализованных подземных вод, фильтрационные разгрузки из действующих и законсервированных шламохранилищ и накопителей жидких и твердых отходов, а также поступление рассолов из рассолоподъемных скважин XVI–XIX вв. (Щербинина и др., 2023; Белкин, 2020; Ушакова и др., 2022). В результате природных и техногенных факторов на территории Верхнекамья развиты процессы галогенеза, которые нетипичны для таежных ландшафтов (Хайрулина, 2022).

Территория Верхнекамья относится к гумидному геохимическому ландшафту, где за год в среднем выпадает 665 мм атмосферных осадков, а среднегодовое значение температуры воздуха, по данным Пермского ЦГМС, находится на уровне $+1,7^\circ \text{C}$. Во влажном климате катионы и анионы, как правило, выщелачиваются из почвенного профиля и переносятся движением воды в низменные формы рельефа или водоносные горизонты подземных вод (Zinck et al., 2009). В пределах Верхнекамья промывной тип водного режима способствует накоплению легкорастворимых солей, основными макрокомпонентами которых являются хлорид-ионы (Cl^-), катионы натрия (Na^+) и калия (K^+)

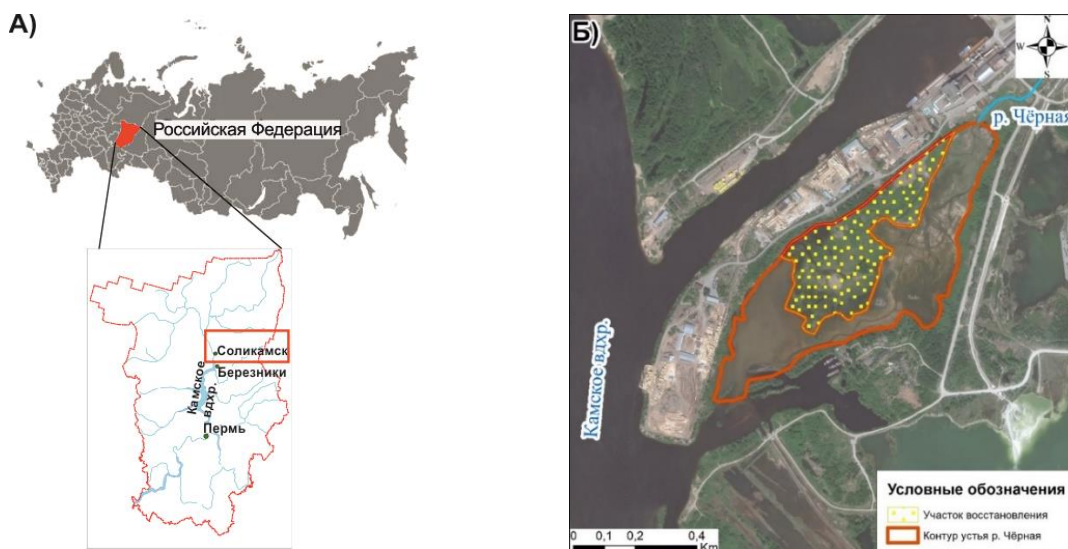


Рис. 1. А) Расположение модельного объекта исследования на карте, Б) Устьевая часть р. Чёрной

(Ушакова, 2024). Это проявляется в засолении ландшафтной среды, повышении щелочности водного компонента и увеличении минерализации вод, а также в росте суммы солей в водной вытяжке донных отложений. Данное исследование направлено на изучение индикации галогенных аквальных комплексов, формирующихся на техногенных осадках в условиях бореальной зоны.

Объект исследования

В качестве модельного объекта исследования рассмотрено устье старого русла р. Чёрная, находящееся в зоне выклинивания подпора Камского водохранилища (г. Соликамск, Пермский край) (рис. 1). С 2017 года в устьевую часть р. Чёрной прекращено поступление сбросов сточных вод химических предприятий в связи с реализацией природоохранных мероприятий по отводу сточных вод на механические очистные сооружения. Ранее на протяжении 70 лет осуществлялся активный сброс неочищенных сточных вод до 90-х гг. XX в. с минерализацией до 200 г/л, где сформирована толща тонкодисперсных техногенно-аллювиальных отложений с высоким содержанием Sr, Ni, Co, Mn, Mo, Se, V, Li и с щелочной средой, хлоридно-натриевым и калиевым составом водной вытяжки, которые перекрыты небольшим терригенным слоем (Ушакова, 2024). Площадь старого русла составляет 33,4 га (из них 21,4 га – техногенный осадок, 12,0 га – естественное восстановление участка старого русла).

Методы исследования

Методы исследования включали обобщение и анализ актуальной информации об индикации засоления аквальных ландшафтов, а также мониторинг участков рек с признаками вторичного засоления на начальной стадии или на посттехногенных участках. Для выявления посттехногенных участков рек, где сформировалась толща техногенно засоленного осадка, необходим комплексный подход, основанный на методах оценки засоления донных отложений и почвенно-растительных комплексов восстанавливаемых территорий в зависимости от уровня вод. В работе использованы результаты последних аналитических и экспериментальных исследований по оценке засоления природных вод, донных отложений, почв, а также растительного и животного мира, проведенных отечественными и зарубежными специалистами.

Обсуждение

Индикаторы засоления аквальных ландшафтов

Стандартными параметрами при геохимической оценке состояния воды, как и в случае засоления, являются три основных показателя: кислотно-щелочные условия (pH), окислительно-восстановительные условия (Eh) и сумма растворенного вещества. Комплексный анализ гидрохимических и изотопных показателей позволяет достоверно

определить источники формирования солевого состава речных вод (табл. 1), что имеет существенное значение для последующих научных работ, включая моделирование качества речных вод, разработку стратегий управления и планирование рационального использования водных ресурсов, обеспечивая тем самым получение объективных данных для принятия обоснованных управленческих решений в сфере водопользования (Zaeri et al., 2023).

На сегодняшний день существует более десятка классификаций природных вод по минерализации с использованием различных принципов. Наиболее распространенными являются классификации за авторством О.А. Алекина, М.Г. Валяшко, В.А. Сулина (Широкова, 2013; El-Manharawy et al., 2003). Согласно опубликованным данным, зарубежные авторы для определения уровня солености преимущественно используют три основных метода: измерение общего содержания растворенных твердых веществ, определение процентного состава солей и измерение электропроводности воды (Musie, Gonfa, 2023). В соответствии со стандартом Геологической службы США также используются следующие подходы для классифи-

кации вод по содержанию хлорида натрия в воде (табл. 2) (www.usgs.gov).

При метаморфизации вод используют коэффициенты для идентификации генезиса вод: rNa/rCl , Cl/Br , $rNa/(rCa+rMg)$, $(rNa+rMg)/rCa$, rCa/rMg , где форма записи «rX» указывает на то, что концентрация какого-либо компонента X выражена в мг-экв/л (Сесь, 2018). Для рассолов отношение rNa/rCl составляет около 0,9–1,0, а rCl/rBr больше 300 свидетельствует о морском генезисе (Никитенко, Ершов, 2021).

Мониторинг засоления аквальных ландшафтов может быть проведен на большей территории с помощью мультиспектральных каналов различных спутниковых снимков, таких как Landsat TM, ETM+, OLI, Sentinel 2 – MSI, MODIS, IRS – LISS 3, LISS 4 и ASTER, и расчета индексов засоления почвы, а полученный результат будет сопоставим с данными о засолении *in situ* (Mehla et al., 2024; Gao et al., 2025).

На современном этапе известно о 471 спектральном индексе для оценки и мониторинга компонентов окружающей среды (вода и почвенно-растительный покров), которые активно применяются при исследовании почв (Chen et al., 2025).

Таблица 1. Показатели оценки засоления объектов окружающей среды

Природные воды	Донные отложения	Растения
Физические параметры: pH, удельная электропроводность (УЭП) Макрокомпоненты: Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , Br^- Генетические соотношения: rNa/rCl , $(rCl - rNa)/rMg$, rCa/rMg Молярное соотношение: Na^+/Cl^- , Br^-/Cl^- Микрокомпоненты: В Стабильные изотопы: δ^2H , $\delta^{18}O$, $\delta^{37}Cl$, $\delta^{81}Br$ и соотношение изотопов $^{87}Sr/^{86}Sr$	Физические параметры: pH, УЭП Макрокомпоненты: Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- и CO_3^{2-} , а также расчет суммы токсичных солей Коэффициенты: коэффициент адсорбции натрия (SAR), процентное содержание обменного натрия (ESP), емкость катионного обмена (ЕКО) Стабильные изотопы: $\delta^{13}C_{org}$ and Sr/Ba,	Наличие галофитных видов Накопление в растительной наземной и корневой массе Na^+ , K^+ , Cl^- и Ca^{2+} Оценка соотношения K^+/Na^+ и Ca^{2+}/Na^+ Избирательное поглощение K^+ и Ca^{2+} Содержание пролина Общая редуцирующая активность (редокс-активность) Содержание низкомолекулярных протекторов в сухой массе растений (моносахара, сахароза, аскорбиновая кислота)
Спектральные индексы: NDAI, FUI, FAI, MRI, BOI и т.д.	Спектральные индексы: NDWI, MNDWI, EWI, NWI, WRI, ABWI, MuWI и т.д.	

Таблица 2. Классификация вод по степени минерализации (солености) по данным (www.usgs.gov)

Тип воды	NaCl (%)	NaCl (мг/л)	УЭП (дСм/м)
Пресная	<0,1	<1000	<0,7
Слабосоленовая	0,1–0,3	1000–3000	0,7–2–4
Умеренно солоноватая	0,3–1	3000–10000	2–10
Сильносоленоватая	1–3,5	10000–35000	10–25
Очень сильносоленая (вода морей и океанов)	>3,5	~35000	>25

Для оценки качества вод существует большое количество индексов в зависимости от условий проведения работ и поставленных задач при исследовании водного объекта: обширный растительный покров оценивается по NDVI, MNDWI, EWI, NWI, WRI, ABWI, MuWI; широко распространенные искусственные поверхности – TCW, AWEInsh, MBWI; широко распространенные тени – MNDWI, EWI, NWI, WRI, CDWI; обширный снежный покров – NDWI, MBWI; зеленая вода (высокое содержание хлорофилла) – MNDWI, TCW, AWEInsh, аномалии в качестве воды – NDAI, FUI, FAI, MRI, BOI (Zhao et al., 2025; Wei et al., 2024).

Для оценки засоления почв опробованы спектральные индексы: индекс интенсивности (Intensity index), индекс яркости (Brightness index), индекс засоления (Salinity index), вегетационный индекс (Vegetation index) (Панкова и др., 2017). Для степени засоления почв используют широко признанные спектральные показатели, включая 15 индексов засоления и 15 индексов вегетации (например, NDSI, NDSI-reg, NDVI, DVI, EVI, TVI, SAVI и т.д.) (Luo et al., 2025). Учитывая специфику объектов, расположенных в зонах со значительными продольными перепадами уровня воды, необходимо комплексировать спектральные индексы.

На сегодняшний день современные методы оценки засоления донных отложений не проработаны, при этом для определения их качественного состава часто применяются методические подходы, традиционно используемые для исследования почв (Косинова, Соколова, 2015). Методические рекомендации по оценке засоления почв отработаны для засушливых и полузасушливых регионов. При этом процессы засоления, солонце-

ватости и ощелачивания почв развиваются даже в условиях влажного климата тайги и смешанных лесов (Еремченко и др., 2019).

Для предотвращения и устранения деградации водных экосистем необходимо контролировать содержание солей (основных ионов) в донных отложениях, используя подходы для почв. Засоленные почвы визуально идентифицируются по белым солевым коркам на поверхности. Они могут формироваться как в дифференцированных почвах, так и в аллювии. Почвы, как и донные отложения, считаются засоленными, когда в них достигают высокого уровня растворимые ионы солей: катионы натрия (Na^+), магния (Mg^{2+}), кальция (Ca^{2+}), калия (K^+) и анионы хлорида (Cl^-), сульфата (SO_4^{2-}), бикарбоната (HCO_3^-) и карбоната (CO_3^{2-}).

В большинстве случаев засоление почв определяется при использовании химико-аналитических методов анализа состава водных вытяжек по соотношению анионов, катионов, зависимостью между щелочностью почв и их плодородию, по доле обменного натрия и суммы обменных оснований (Прокопьева, 2023). Соленость существенно влияет на гидравлические свойства почв, поэтому для понимания способности субстрата адсорбировать катионы необходимы результаты размерности частиц и ЕКО (Zhang et al., 2024).

На сегодняшний день существует 3–4 основных международно-признанных подхода по классификации степени засоления почв: Классификация USDA (США) / Ричардса (1954), Классификация ФАО-ЮНЕСКО, Российская (советская) школа и другие национальные системы разных стран (www.udel.edu). В настоящее время категорирование отечественными специалистами засоленных почв

осуществляется на основании классификации почв в зависимости от химизма засоления по соотношению ионов HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , разработанной Базилевич, Панковой, 1972 (табл. 3).

На основании классификации USDA (США) / Ричардса (1954) засоленность почв оценивается по следующим параметрам: УЭП, ESP, SAR и pH и распределяется по типу засоления (табл. 4) (Paz et al., 2020).

Токсичность соли отрицательно влияет на свойства почвы, включая высокий pH, высокий уровень коэффициента адсорбции натрия (SAR) и процентное содержание обменного натрия (ESP), плохую структуру почвы, а также низкую водопроницаемость.

В том числе важно определение ЕКО при оценке засоленности, поскольку корни растений взаимодействуют с поровой водой, а это влияет на их рост и развитие. SAR (отношение Na^+ к $\sqrt{((\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/2)}$ в почвенном растворе) – ключевой индикатор осолонцевания, вызванного натрием, одним из наиболее вредных ионов.

Таблица 3. Классификация почв по степени засоления в зависимости от химизма согласно Базилевич, Панковой, 1972

Степень засоления почв	Химизм засоления (по соотношению ионов, ммоль(экв)/100 г почвы)					
	Нейтральное засоление (pH<8,5)			Щелочное засоление (pH>8,5)		
	Хлоридный, сульфатно-хлоридный	Хлоридно-сульфатный	Сульфатный	Содовый и содово-хлоридный	Сульфатно-содовый и содово-сульфатный	Сульфатно-хлоридно-карбонатный
	$\text{HCO}_3 < \text{Ca} + \text{Mg}$	$\text{HCO}_3 < \text{Ca} + \text{Mg}$	$\text{HCO}_3 < \text{Ca} + \text{Mg}$	$\text{HCO}_3 > \text{Ca} + \text{Mg}$	$\text{HCO}_3 > \text{Ca} + \text{Mg}$	$\text{HCO}_3 < \text{Ca} + \text{Mg}$
Порог токсичности (незасоленные почвы)	$\leq 0,1$ $< 0,05$	$\leq 0,2$ $< 0,1$	$\leq 0,3(1,0)$ $< 0,15$	$\leq 0,1$ $< 0,1$	$\leq 0,15$ $< 0,15$	$\leq 0,2$ $< 0,15$
Слабая	$0,1-0,2$ $0,05-0,12$	$0,2-0,4(0,6)$ $0,1-0,25$	$0,3(1,0)-0,6(1,2)$ $0,15-0,3$	$0,1-0,2$ $0,1-0,15$	$0,15-0,25$ $0,15-0,25$	$0,2-0,4$ $0,15-0,3$
Средняя	$0,2-0,4$ $0,12-0,35$	$0,4(0,6)-0,6(0,9)$ $0,25-0,5$	$0,6(1,2) 0,8(1,5)$ $0,3-0,6$	$0,2-0,3$ $0,15-0,3$	$0,25-0,4$ $0,25-0,4$	$0,4-0,5$ $0,3-0,5$
Сильная	$0,4-0,8$ $0,35-0,7$	$0,6(0,9)-1,0(1,4)$ $0,5-1,0$	$0,8(1,5)-1,5(2,0)$ $0,6-1,5$	$0,3-0,5$ $0,3-0,5$	$0,4-0,6$ $0,4-0,6$	Не встречается
Очень сильная	$\geq 0,8$ $> 0,7$	$\geq 1,0(1,4)$ $> 1,0$	$\geq 1,5(2,0)$ $> 1,5$	$\geq 0,5$ $> 0,5$	$\geq 0,6$ $> 0,6$	“

Примечание: над чертой – общая сумма солей, под чертой – сумма токсичных солей, %; водная вытяжка 1:5. Цифры в скобках соответствуют степени засоления по сумме солей в гипсоносных почвах, содержащих более 1 % $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Показатель удельной электропроводности (УЭП) также является универсальным стандартом засоления, обеспечивающим сопоставимость данных. Высокий уровень УЭП вызывает осмотический стресс у растений, препятствуя водопоглощению.

Высокий SAR провоцирует диспергирование глинистых частиц, ухудшая структуру почвы (снижение водопроницаемости, аэрации, повышение плотности), что критично для растений. ESP – прямой индикатор осолонцевания (обычно >15 %).

Обменный натрий, адсорбированный на поверхности глинистых частиц, вызывает их диспергирование и разрушение агрегатов. В отличие от SAR, характеризующего потенциальную опасность натриевого засоления в растворе, ESP измеряет фактически адсорбированный натрий, напрямую отражая текущее состояние физических свойств почвы. SAR и ESP сильно коррелируют: высокий SAR со временем приводит к высокому ESP (Lin, 2014).

Таблица 4. Критерии классификации засоленных и солонцовых почв по ван Беку и Тому (2012), Ричардсу (1954)

Классификация почв	ЕС _e	SAR	ESP	pH
	дСм·м ⁻¹	(mmol _c ·L ⁻¹) ^{0.5}	%	
Незасоленная и несолонцовая	<4	<13	<15	<8,5
Засоленно-солонцовая	≥4	≥13	≥15	≤8,5
Засоленная	≥4	<13	<15	<8,5
Солонцовая	<4	≥13	≥15	>8,5

Для оценки засоления почв используют также и молодое активно развивающееся направление по математическому моделированию почвенных процессов с использованием таких моделей, как ROMUL, DAISY, RothC, BASFOE (Сайранова и др., 2023). Метод математического моделирования почвенных характеристик может служить индикатором засоленности и щелочности почв с помощью спектроскопии в различных спектральных диапазонах (средний ИК, vis-NIR) (Lotfollahi et al., 2023). С помощью нейронной сети, включая спутниковые снимки и геоморфометрические параметры, можно оценить пространственное засоление почв с использованием различий в землепользовании, градиенте уклона, а также режиме влажности и температуры (Marvi et al., 2025). Как правило, исследования почвенных профилей позволяют провести классификацию и маркировку почв с использованием геофизических методов (электромагнитные (индукционные) методы, метод вертикального электрического зондирования и метод электрической томографии (Daliakopoulos et al., 2016).

Для оценки палеосолености в донных отложениях используют соотношение Sr/Ba как индикатор солености, поскольку континентальные осадки обычно обогащены Ba и бедны Sr по сравнению с морскими осадками и наоборот, как стабильные изотопы углерода ($\delta^{13}\text{C}_{\text{орг.}}$) и соотношение C/N органического углерода для определения солености (Dashtgard et al., 2022). Стабильные изотопы $\delta^{35}\text{Cl}$ и $\delta^{37}\text{Cl}$ могут дать дополнительные факторы поступления хлорид-иона в окружающую среду, характеризуя океаническую кору, месторождения галита или поровые жидкости океанических осадков (Agrinier et al., 2023).

Наличие галофитных видов во флоре является маркером при запуске процессов засоления в растительных сообществах. Галофиты служат индикаторами степени засоленности среды обитания, что делает их ценными для мониторинга уровня засоленности (Inelova et al., 2024). Для оценки уровня засоленности в растениях также используют химико-аналитические методы исследования. В растительной массе методом пламенной фотометрии можно определять ионы Na^+ и K^+ , методом меркурометрии – Cl^- , по Bates et al. – пролин, по методу Пета (в модификации Прокошева) – аскорбиновую кислоту, по Бертрану – сахара (Боталова и др., 2015).

Результаты исследования (Боталова и др., 2015) показали различия в способности растений накапливать ионы Na^+ , K^+ , Cl^- в листьях и корнях. Триостренник как галофит накапливал максимум Na^+ и Cl^- в листьях, что связано с его способностью поддерживать водный потенциал. В исследовании (Еремченко, Четина, 2022) выявлено, что на кислых и щелочных почвах ухудшается рост злаков и уменьшается площадь листа. В засоленных условиях растения накапливают больше Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , при этом снижается соотношение K^+/Na^+ и $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$, а избирательное поглощение K^+ и Ca^{2+} – это адаптивная реакция на засоление.

В целом галофиты можно разделить на три типа: эугалофиты, псевдогалофиты, рекретогалофиты. Эугалофиты, такие как *Suaeda salsa* и *Kalidium foliatum*, могут растворять любую поглощенную соль в своих листьях, в то время как псевдогалофиты избегают поглощения соли или сбрасывают листья, которые содержат токсичные уровни соли. Рекретогалофиты, с другой стороны,

могут вытеснять избыток соли, поглощенной через солевые пузыри и солевые железы, например *Limonium bicolor* и *Reaumuria songarica* (Jin et al., 2024).

Растения, приспособленные к высокой солености, могут расти и в условиях высокой щелочности, при этом можно выделить две группы: «Группа солевых» (галофиты и галотолерантные виды) и «Группа содовых» (алкалофиты и алкалотолерантные виды). В щелочной среде разнообразие растений больше. Индикаторы щелочно-содовых местообитаний: астра трехтычинковая (*Aster tripolium*), пушица, или овсяница приморская (*Puccinellia limosa*), сведа паннонская (*Suaeda pannonica*). Индикаторы не щелочных соленых местообитаний: ситник приморский (*Juncus maritimus*), солерос распростёртый (*Salicornia prostrata*), сведа соленая (*Suaeda salsa*) (рис. 2) (Inelova et al., 2024).



Рис. 2. Схема представления различных химических стрессов (щелочности и солености) для сосудистых растений в засоленных экосистемах по (Inelova et al., 2024)

Осадконакопление в переходных зонах

Вопросы осадконакопления в переходных зонах при смешении пресных и минерализованных вод (река – море, река – стоки), где происходит выпадение новообразованных фаз (геохимический барьер), остаются актуальными во всем мире (Герасюк, Бердников, 2021). Смешивание солевого раствора и пресной воды является процессом рассеивания энергии, где аллювиальные устьевые зоны – это системы, которые могут свободно регулировать процессы рассеивания в соответствии с источниками энергии (Zhang, Savenije, 2018).

Модельный объект настоящего исследования – устьевая часть р. Чёрной, представляющая наибольший интерес как барьерная зона сток – река, поскольку выделяется три взаимосвязанных аспекта: геохимический (характеризуется процессами осаждения и трансформации вещества при смешивании пресных и соленых вод), гидродинамический (проявляется в снижении скорости течения при достижении дном уровня базиса эрозии) и биогеохимический аспект, что позволяет всесторонне оценить роль данной территории как переходного участка между речной и морской экосистемой (Лычагин и др., 2011). При смешивании соленых и пресных вод в устье рек необходимо оконтурить сильно стратифицированный соляной клин, сформированный во время низкого стока, который может выходить из устья реки (Arevalo et al., 2022).

Фактически устьевая часть р. Чёрной располагается в зоне выклинивания подпора, которая характеризуется значительными продольными перепадами уровней воды, особенно в период прохождения максимальных уровней при наполнении водохранилища. Вследствие этого данный участок имеет сходство с водно-болотными территориями, обладающими аккумулятивным типом миграции. Значительные перепады уровней приводят к сезонному перекрытию техногенных осадков терригенным материалом в устьевой части (рис. 3). Как следствие, гидродинамика оказывает влияние как на границу раздела осадков и воды, так и на гранулометрический состав поверхностных отложений (Du et al., 2022).



Рис. 3. Неоднородный осадок в устье р. Чёрной

Комплексные исследования донных отложений также включают анализ химического состава поровых вод как эффективный диагностический инструмент для интерпретации физико-химических процессов взаимодействия в системе вода-порода с использованием термодинамического моделирования, например с помощью ПК «Селектор» (Казак, Шиндина, 2025; Барановская и др., 2024). Современные исследования в геохимии рассматривают гранулометрический состав терригенного материала как фактор, определяющий поступление кислорода в верхние слои осадков, что влияет на характеристики поровых вод и донных отложений (Гуров и др., 2023). Минерализацию и химический состав поровых вод слабопроницаемых образцов определяют с использованием прямых или косвенных современных лабораторных методов извлечения поровых вод (центрифугирование, отсасывание (ризоны), опрессовывание (отжатие), водные вытяжки) (Казак, Шиндина, 2025).

Донные отложения

На территории Верхнекамья встречается природный и техногенный галогенез, который в природных условиях свойственен для аридных и субаридных территорий. В аквальных ландшафтах галогенез проявляется в местах разгрузки высокоминерализованных хлоридно-натриевых подземных вод, родников, вод из старых рассолоподъемных скважин или поступления дренажных стоков от объектов накопленного вреда, а также сбросов сточных вод. В аквальных ландшафтах имеется латеральная миграция (трансаквальный→аккумулятивный). В результате солевой нагрузки разного генезиса трансаквальные ландшафты характеризуются низкопродуктивными слабощелочными и щелочными сильносолончатыми кислородно-сероводородными хлоридно-натриевыми условиями, а в супераквальных зонах – солончачовыми условиями (Хайрулина, 2022).

При проникновении соленой воды в поровые пространства донных отложений происходит накопление солей, которые в течение длительного времени могут служить источниками повышенной минерализации водной системы (Tackley et al., 2025). В переходной

зоне донные отложения подобных систем способны выступать источником вторичного засоления при изменении физико-химических условий. Такие изменения обусловлены воздействием гидрологических, климатических и техногенных факторов, что, в свою очередь, приводит к трансформации геохимической подвижности всех элементов на исследуемом участке (Гордеев, 2009). Поровые воды донных отложений становятся высокоминерализованными, что влияет на геохимические циклы и биотические сообщества.

В технопедокомплексах Верхнекамья на древнеаллювиальных песках и супесях представлены серогумусовые почвы легкого и тяжелого состава (включая глееватые и остаточнокarbonатные), серогумусовые солончачовые почвы и солончаки вторичные хлоридно-натриево-калиевого и сульфатно-хлоридно-кальциево-натриевого состава (Еремченко и др., 2017). На аллювиальных породах под влиянием подотвальных и рассолоподъемных вод формируются гумусовые и перегнойно-глеевые почвы, глееземы, солончачоватые и солончачовые аналоги, а также солончаки вторичные хлоридно-кальциево-магниево-натриевого и сульфатно-хлоридно-натриево-кальциевого состава. Однако во всех типах технопедокомплексах наблюдается развитие засоления до уровня солончачовости, при этом преобладающий тип засоления характеризуется хлоридным и сульфатно-хлоридным составом по анионам, а по катионам – натриевым, калиево-натриевым и кальциево-магниево-натриевым составом (Еремченко и др., 2017).

Растительность

В настоящее время действие засоления проявляется в нехарактерных природных условиях, когда в окружающую среду под влиянием антропогенной деятельности в обилии поступают легкорастворимые минеральные вещества. Токсическое действие солей испытывают растения, не имеющие генетически детерминированных механизмов солеустойчивости. В таежно-лесной зоне Пермского края, на территории Верхнекамья, произошло масштабное накопление отходов, преимущественно содержащих хлориды натрия, калия и магния, обусловленное

разработкой месторождения. Это привело к развитию процесса техногенного засоления почв и водных объектов, что, в свою очередь, вызвало существенные изменения в структуре растительных сообществ. В результате произошло замещение исходных видов флоры солеустойчивыми адвентивными растениями (Боталова и др., 2015).

На загрязненных участках формируются специфические растительные группировки, в которых преобладают галофиты и рудеральные виды (Шишконокова, 2017). На территории Верхнекамья на участках почвенного засоления (пойма р. Лёнвы) встречаются луговые растительные сообщества с небольшой долей галофильных трав (*Calamagrostis epigejos*, *Festuca rubra*, *Typha latifolia* L.) и галофиты (*Atriplex prostrata*, *Puccinellia hauptiana*, *Spercularia salina*), а также среди солеустойчивой флоры были обнаружены *Puccinellia distans* (Jacq.) Parl., *Lactuca tatarica* (L.) C.A. Mey., *Chenopodium glaucum* L., *Atriplex patula* L., *Triglochin maritimum* L. (Ushakova et al., 2023).

Растения без генетической устойчивости к солям испытывают токсическое воздействие, однако многие виды адаптировались, накапливая низкомолекулярные соединения (углеводы, аскорбиновую кислоту, пролин), которые защищают их от обезвоживания при засолении (Боталова и др., 2015). Например, в растениях фасоли хлорид-ион избирательно накапливается в межклетниках и клетках ксилемы стебля и корня, губчатой паренхиме листьев (особенно в бесхлоропластных участках вокруг центральной жилки), при этом наибольшая концентрация элемента отмечается в верхних частях и по краям листьев, провоцируя развитие некрозов (Иванчев, 2019). Также результатом избыточного содержания ионов натрия и хлора в почвенном растворе является их успешная конкуренция при поступлении в клетки растения с ионами K^+ , Ca^{2+} и Mg^{2+} , что вызывает метаболический стресс и ведет к угнетению роста, нарушению работы устьичного аппарата и гибели растения (Seemann, Critchley, 1985).

Водное биологическое разнообразие

Засоление речных вод приводит к снижению видового разнообразия водных орга-

низмов по мере увеличения солености. При концентрации хлорид-ионов до 6 г/л происходит существенное негативное воздействие на водную фауну, что вызывает биологическую деградацию экосистемы (Ushakova et al., 2023). Экспериментальные исследования показали, что предельная толерантность сеголеток окуня к засолению составляет 8 г/л по общей минерализации. При повышении температуры воды этот порог снижается до 5,3 г/л, что свидетельствует об усилении негативного влияния засоления на молодь рыб в условиях теплового стресса (Михеев и др., 2023).

При этом в результате двухлетних наблюдений выявлено, что в весенне-летний период наблюдаются постоянные заходы некоторых видов рыб (елец и ерш обыкновенный) в поисках кормовых объектов на р. Волим (МО «Город Березники», Пермский край) с минерализацией воды свыше 10 г/л (Шадрин и др., 2024). Также в р. Лёнве и р. Толыч отсутствовали судак и чехонь, что может свидетельствовать об их низкой толерантности к анализируемым типам загрязнения (Мурзырев и др., 2024). При техногенном засолении наблюдается существенная трансформация сообществ макрозообентоса. В частности, в р. Толыч выявлено доминирование семейства Tubificidae, представители которого характеризуются высокой устойчивостью к загрязнению. При этом группы гидробионтов, чувствительных к качеству воды, в данном водоеме полностью отсутствуют (Ushakova et al., 2023). В водорослево-цианобактериальных сообществах р. Волим зафиксирован эффект временной задержки в реакции на повышение уровня минерализации воды. Установлена прямая зависимость биомассы альгоценозов от степени минерализации водных масс на исследуемом участке водоема (Мартыненко и др., 2017). По результатам исследования выявлено, что при оценке засоления бореальных пресноводных экосистем рекомендуется использовать комплексный подход (сравнение абиотических и биотических индексов) (Mikhееv et al., 2025).

Согласно современным исследованиям (Brettschneider et al., 2023), для эффективного противодействия процессам засоления необходимы масштабные восстановительные ме-

роприятия. В связи с этим для оценки степени засоления аквальных ландшафтов рекомендуется применять комплексные методики исследования с использованием нестандартных параметров оценки. Данные исследования должны проводиться в единой системе «вода – донные отложения – почвы – растительность» с обязательным учетом показателей видового разнообразия. Такой комплексный подход позволяет получить наиболее полную картину состояния экосистемы и разработать эффективные меры по ее восстановлению.

Заключение

В рамках проведенного исследования установлено, что для модельного объекта необходимо использовать комплексный подход по оценке степени засоления аквальных ландшафтов, принимая во внимание гидрологические условия. Также желательна применение методов ДЗЗ с помощью мультиспектральных каналов различных спутниковых снимков и расчетов таких индексов: индекс интенсивности (Intensity index), индекс яркости (Brightness index), индекс засоления (Salinity index), вегетационный индекс (Vegetation index), что позволит определить участки засоления. Для индикации степени засоления вод необходимо использовать физико-химические параметры на основании содержания основных ионов и изотопного состава, их коэффициентов соотношения для установления генезиса и типа вод, а также физико-химическое моделирование гидрохимических процессов в системе «донные отложения – вода» с учетом техногенного загрязнения.

Анализируя подходы оценки засоления вод, почв и растений можно выделить три метода идентификации: визуальная, химико-аналитическая, применение дистанционных методов, в том числе использование геофизических методов. Для идентификации засоления донных отложений часто реализуемым подходом для оценки их качества становятся почвы, поэтому засоленность донных отложений можно оценивать по следующим параметрам: рН, удельная электропроводность (УЭП), процентное содержание обменного натрия (ESP), коэффициент адсорбции

натрия (SAR), емкость катионного обмена (ЕКО).

Для идентификации запуска процессов засоления в растительных сообществах опираются на наличие галофитных видов. Они являются маркерными индикаторами степени засоленности среды обитания, что делает их ценными для мониторинга. Для оценки уровня засоленности в растениях также используют химико-аналитические методы исследования. Так, в растительной массе методом пламенной фотометрии можно определять ионы Na^+ и K^+ , методом меркурометрии – Cl^- .

Исследование выполнено при поддержке Пермского края, соглашение № С-26/1872.

Библиографический список

Барановская Н.В., Мазухина С.И., Паничев А.М. и др. Особенности миграции химических элементов в природных водах и их отложения в виде минеральных новообразований в живых организмах (физико-химическое моделирование с верификацией на животных) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335, № 2. С. 187–201. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4459 EDN: TBSHAL

Белкин П.А. Химический состав родникового стока в районе складирования отходов разработки и обогащения калийных солей // Вестник Пермского университета. Геология. Пермь, 2020. Т. 19, № 3. С. 232–240. DOI: 10.17072/psu.geol.19.3.232 EDN: DMUFJO

Боталова К.И., Еремченко О.З., Шестаков И.Е. Стратегии выживания растений в зоне воздействия солеотвалов г. Соликамска // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 3. EDN: TYSPIP

Герасюк В.С., Бердников С.В. Экспериментальная оценка скорости осаждения взвешенного вещества вод в устье Дона и Таганрогском заливе // Океанология. 2021. Т. 61, № 5. С. 780–790. DOI: 10.31857/S0030157421040055 EDN: GGHROS

Гордеев В.В. Система река-море и ее роль в геохимии океана: дисс. ... д-ра геол.-мин. наук. М.: ИО РАН, 2009. 36 с. EDN: QEHNIB

Еремченко О.З., Москвина Н.В., Митракова Н.В. и др. Оценка экологического состояния засоленных, кислых и щелочных почв методом фитотестирования // Вестник ПГУ. Биология. 2019. № 1. С. 63–71. DOI: 10.17072/1994-9952-2019-1-63-71 EDN: LXHXСJ

Еремченко О.З., Митракова Н.В., Шестаков И.Е. Природно-техногенная организация почвенного покрова территории воздействия солеотвалов и шламохранилищ в соликамско-березниковском экономическом районе // Вестник ПГУ. Биология. 2017. № 3. С. 311–320. EDN: ZTLSDD

Иваничев В.В. О механизмах солеустойчивости растений и специфике влияния засоления // Известия ТулГУ. Естественные науки. 2019. Вып. 4. С. 76–88. EDN: LKLHPQ

Казак Е.С., Шиндина Н.Е. Лабораторные методы определения состава поровых вод слабопроницаемых отложений // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2025. № 1. С. 30–40. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-1-30-40 EDN: OWRCKM

Косинова И.И., Соколова Т.В. Методологические особенности оценки экологического состояния донных отложений искусственно созданных водных объектов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия Геология. 2015. № 3. С. 113–121.

Лычагин М.Ю., Касимов Н.С., Курьякова А.Н. и др. Геохимические особенности аквальных ландшафтов дельты Волги // Известия РАН. Серия География. 2011. № 1. С. 100–113. EDN: NSYGCB

Мартыненко Н.А., Поздеев И.В., Бакланов М.А. Структура альгоценозов рек Пермского края в условиях антропогенного засоления отходами калийного производства // Вестник Пермского университета. Серия Биология. 2017. № 3. С. 347–354. EDN: ZTLSFB

Михеев П.Б., Мухина М.В., Костицына Н.В. и др. Экспериментальная оценка хронического влияния повышенной минерализации и температуры на соматические индексы, биохимические показатели крови и выживаемость сеголеток речного окуня *Perca fluviatilis* // Сибирский экологический журнал. 2023. Т. 30, № 1. С. 60–71. DOI: 10.15372/SEJ20230106 EDN: CHMLQX

Мурзырев А.Р., Казаринов С.Н., Комарова Л.В. и др. Влияние загрязнения рек города Березники на биологические характеристики рыб // Фундаментальные и прикладные исследования в биологии и экологии: сборник статей по материалам региональной научной конференции. Пермь: ПГНИУ, 2024. С. 234–241.

Никитенко О.А., Еришов В.В. Гидрогеохимические критерии поиска и разработки углеводородных месторождений: обзор, анализ и перспективы использования на острове Сахалин // Геосистемы переходных зон. 2021. Т. 5, № 4. С. 361–377.

О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году. Проект Гос-

ударственного доклада. М.: Минприроды России; ООО «Интеллектуальная аналитика»; ФГБУ «Дирекция НТП»; Фонд экологического мониторинга и международного технологического сотрудничества, 2024. 707 с. URL: <http://www.mnr.gov.ru> (дата обращения: 20.10.25)

Официальный сайт правительства США. Соленая вода и соленость. USGS. Saline Water and Salinity. 2018. URL: <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/saline-water-and-salinity>, (дата обращения: 13.10.2025)

Панкова Е.И., Конюшкова М.В., Горохова И.Н. О проблеме оценки засоленности почв и методике крупномасштабного цифрового картографирования засоленных почв // Экосистемы: экология и динамика. 2017. Т. 1, № 1. С. 26–54. EDN: YYVQGD

Прокопьева К.О., Конюшкова М.В. Гармонизация результатов химического исследования засоленности почв // Аридные экосистемы. 2023. Т. 29, № 3 (96). С. 24–35. DOI: 10.24412/1993-3916-2023-3-24-35 EDN: WCVAFO

Сайранова П.Ш., Хайрулина Е.А., Митракова Н.В. и др. Моделирование как прогноз трансформации почв при техногенном засолении // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 4. С. 52–60. DOI: 10.25750/1995-4301-2023-4-052-060 EDN: NVCJJB

Сесь К.В. Генетические типы подземных вод нефтегазоносных отложений Ямальской НГО // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2018. Т. 1. С. 3–9. DOI: 10.18303/2618-981X-2018-1-3-9 EDN: YNFZFI

Сельское хозяйство и природные ресурсы. Информационные бюллетени и публикации. Изменение содержания соли и классификация почв. Agriculture & Natural Resources. Fact Sheets and Publications. Salt Measurements and Soil Classifications. Written by: Jarrod Miller URL: <https://www.udel.edu/academics/colleges/canr/cooperative-extension/fact-sheets/salt-measurements-and-soil-classifications-swi-series-2/> (дата обращения: 14.10.2025)

Ушакова Е.С. Экогеохимия водных экосистем урбанизированных территорий Северного Прикамья: дис. ... канд. геол.-мин. наук. Пермь: ПГНИУ, 2024. 187 с.

Ушакова Е.С., Меньшикова Е.А. Геоэкологические аспекты влияния разгрузки высокоминерализованных хлоридно-натриевых вод на химизм поверхностных вод на территории калийного месторождения // Современные проблемы ландшафтоведения и геоэкологии: материалы VII Международной научной конференции, посвященной 90-летию кафедры географической экологии Белорусского государственного университета, Минск, 11–15 ноября 2024 года. Минск:

Белорусский государственный университет, 2024. С. 209–212.

Ушакова Е.С., Белкин П.А., Бакланов М.А. и др. Экогеохимическая и биоиндикационная оценка загрязнения малых рек города Березники // Вестник Пермского университета. Геология. Пермь, 2022. Т. 21, № 4. С. 384–393. DOI: 10.17072/psu.geol.21.4.375 EDN: FKNXMD

Хайрулина Е.А. Ландшафтообразование в условиях техногенного галогенеза: дис. ... д-ра геогр. наук. Томск, 2022. 285 с. EDN: SCHLCT

Четина О.А., Еремченко О.З. Влияние NaCl-засоления на содержание катионов Na⁺, K⁺, Ca²⁺ в листьях злаков при разной реакции почвенной среды // Электронный научно-производственный журнал «АгроЭкоИнфо». 2022. № 1 (49).

Шадрина И.А., Бакланов М.А., Михеев П.Б. Видовой состав ихтиофауны приустьевых участков реки Волим в условиях антропогенного засоления вод // Фундаментальные и прикладные исследования в биологии и экологии: сборник статей по материалам региональной научной конференции. Пермь: ПГНИУ, 2024. С. 278–281. EDN: OWBBZP

Широкова В.А. Классификации природных вод: прошлое, настоящее, будущее // Вестник ТГУ. 2013. Т. 18, Вып. 3. С. 1023–1027. EDN: PWMKND

Шишконова Е.А. Антропогенная растительность территорий предприятий ОАО «Уралкалий» (Пермская область) // Социально-экологические технологии. 2017. № 3. С. 65–79. EDN: ZXHVHT

Щербинина Г.П., Простолупов Г.В., Бычков С.Г. Реконструкция развития соляных структур Верхнекамского месторождения солей // Вестник Пермского университета. Геология. Пермь, 2023. Т. 22, № 1. С. 80–90. DOI: 10.17072/psu.geol.22.1.80 EDN: GZOALG

Agriener P., Gieskes J., Subbarao G. et al. Chloride exchanges between oceanic sediments and seawater: Constraints from chlorine isotopes // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2023. Vol. 361. P. 10–23. DOI: 10.1016/j.gca.2023.09.022 EDN: MOYBVA

Alam R., Khan S.U., Usman M. et al. A critical review on treatment of saline wastewater with emphasis on electrochemical based approaches // *Process Safety and Environmental Protection*. 2022. Vol. 158. P. 625–643. DOI: 10.1016/j.psep.2021.11.054 EDN: ZSMVVD

Arevalo F.M., Alvarez-Silva Ó., Caceres-Euse A. et al. Mixing mechanisms at the strongly-stratified Magdalena River's estuary and plume // *Estuarine,*

Coastal and Shelf Science. 2022. Vol. 277. DOI: 10.1016/j.ecss.2022.108077 EDN: QFCDNA

Brettschneider D.J., Spring T., Blumer M. et al. Much effort, little success: Causes for the low ecological efficacy of restoration measures in German surface waters // *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 35, No. 31. DOI: 10.1186/s12302-023-00736-1 EDN: EYSPHM

Canedo-Arguëlles M., Kefford B., Schäfer R. 2019 Salt in freshwaters: causes, effects and prospects – introduction to the theme issue // *Phil. Trans. R. Soc. B*. 2019. Vol. 374. DOI: 10.1098/rstb.2018.0002

Cao X., Chen S., Liu Y. et al. Domestic wastewater is an overlooked source and quantity in global river dissolved carbon // *Nat Commun*. 2025. Vol. 16, No. 7522. DOI: 10.1038/s41467-025-62920-6

Chen Q., Vaudour E., Richer-de-Forges A.C. et al. Spectral indices in remote sensing of soil: definition, popularity, and issues // *A critical overview. Remote Sensing of Environment*. 2025. Vol. 329. DOI: 10.1016/j.rse.2025.114918

Chen Y., Lou S., Chen X. et al. Effects of brackish water irrigation with different exogenous salt concentrations on the growth and rhizosphere salinity of *Lycium barbarum* // *Scientific reports*. 2024. Vol. 14, No. 21554. DOI: 10.1038/s41598-024-72498-6 EDN: JXNDSC

Dashtgard S.E., Wang A., Pospelova V. et al. Salinity indicators in sediment through the fluvial-to-marine transition (Fraser River, Canada) // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. DOI: 10.1038/s41598-022-18466-4

Du X., Liu J.T., Lee J. et al. Influence of sediment sources, water mass, and physical processes on the dynamics of flocs at a location between the mouth of a river and the head of a submarine canyon // *Marine Geology*. 2022. Vol. 445. DOI: 10.1016/j.margeo.2022.106736 EDN: BQKWXR

El-Manharawy S., Hafez A. A new chemical classification system of natural waters for desalination and other industrial uses // *Desalination*. 2003. Vol. 156. P. 163–180. DOI: 10.1016/S0011-9164(03)00339-4 EDN: KEIYGH

Gao Z., Li X., Zuo L. et al. Unveiling soil salinity patterns in soda saline-alkali regions using Sentinel-2 and SDGSAT-1 thermal infrared data // *Remote Sensing of Environment*. 2025. Vol. 322. DOI: 10.1016/j.rse.2025.114708 EDN: LYVWIR

Georgiadi A.G., Barabanova E.A., Milyukova I.P. et al. Changes in Water-Industry Load on River Water Resources in the Volga-Kama and Angara-Yenisei Reservoir Catchments Under Contemporary Global Warming // *Water*. 2025. Vol. 17, No. 16. P. 2486. DOI: 10.3390/w17162486

- Herbert E.R., Boon P., Burgin A.J. et al.* A global perspective on wetland salinization: ecological consequences of a growing threat to freshwater wetlands // *Ecosphere*. 2015. Vol. 6, Iss. 10. P. 1–43. DOI: 10.1890/ES14-00534.1 EDN: VFTNZV
- Hu J.-P., He Y.-Y., Li J.-H. et al.* Planting halophytes increases the rhizosphere ecosystem multifunctionality via reducing soil salinity // *Environmental Research*. 2024. Vol. 261. DOI: 10.1016/j.envres.2024.119707 EDN: HJGWZM
- Inelova Z., Zaparina Y., Mile O. et al.* Large-scale assessment of characteristic plant species on Eurasian saline and alkaline soda ecosystems // *Ecological Indicators*. 2024. Vol. 166. DOI: 10.1016/j.ecolind.2024.112431 EDN: BWXRCO
- Jeppesen E., Beklioglu M., Zadereev E.* The Effects of Global Climate Change on Water Level and Salinity: Causes and Effects // *Water*. 2023. Vol. 15, No. 2853. DOI: 10.3390/w15152853 EDN: LFBQBS
- Lin Z.Q., Bañuelos G.S.* Soil Salination Indicators // *Environmental Indicators*. Springer, Dordrecht. 2015. DOI: 10.1007/978-94-017-9499-2_20 EDN: VGKLN
- Lotfollahi L., Delavar M.A., Biswas A. et al.* Spectral prediction of soil salinity and alkalinity indicators using visible, near-, and mid-infrared spectroscopy // *Journal of Environmental Management*. 2023. Vol. 345. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118854 EDN: MYLGUW
- Luo Z., Deng M., Tang M. et al.* Estimating soil profile salinity under vegetation cover based on UAV multi-source remote sensing // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15, No. 1. DOI: 10.1038/s41598-024-82868-9 EDN: NSSPRQ
- Maas C.M., Kaushal S.S., Rippy M.A. et al.* Freshwater salinization syndrome limits management efforts to improve water quality // *Front. Environ. Sci.* 2023. DOI: 10.3389/fenvs.2023.1106581 EDN: IXBWTG
- Mehla M.K., Kumar A., Kumar S. et al.* Soil salinity assessment and mapping using spectral indices and geostatistical techniques-concepts and reviews. *Remote Sensing of Soils* // Elsevier. 2024. P. 429–437. DOI: 10.1016/B978-0-443-18773-5.00019-3
- Mikheev P.B., Pankov A.N., Ushakova E.S. et al.* On the Criteria for the Assessment of the State of Polluted Freshwater Ecosystems with an example of the Small River on the Eastern Edge of Europe (Perm Krai, Russia) // *Pollution*. 2025. Vol. 11, No. 1. P. 51–68. DOI: 10.22059/poll.2024.374565.231
- Moyano-Salcedo A.J., Piana T., Crabot J. et al.* GLOBal river SALinity and associated ions (GlobSalt) // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15, No. 18701. DOI: 10.1038/s41598-025-96222-0
- Musie W., Gonfa G.* Fresh water resource, scarcity, water salinity challenges and possible remedies: A review // *Heliyon*. 2023. Vol. 9, No. 8. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e18685 EDN: XHXEEQ
- No-Vidal C., Ehlert P., Hago A. et al.* Risk assessment methodologies of soil threats in Europe: status and options for harmonization for risks by erosion, compaction, salinization, organic matter decline and landslides. 2012. Risk Assessment Methodologies of Soil Threats in Europe, JRC Scientific and Policy Reports EUR. Office for Official Publication of the European Communities, Luxembourg. DOI: 10.2788/47096
- Paz A.M., Castanheira N., Farzamian M. et al.* Prediction of Soil Salinity and Sodicity using Electromagnetic Conductivity Imaging // *Geoderma*. 2020. Vol. 361. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.114086 EDN: EIRQIA
- Perera H., Jayawardana C., Chandrajith R.* Freshwater salinisation: unravelling causes, adaptive mechanisms, ecological impacts, and management strategies // *Environ. Monit. Assess.* 2024. Vol. 196, No. 1195. DOI: 10.1007/s10661-024-13388-2 EDN: GETVSK
- Richard L.A.* Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. US Department of Agriculture // *Agricultural Handbook*. 1954. No. 60. P. 7–53. DOI: 10.1097/00010694-195408000-00012
- Marvi M.S.P., Moharami S.* Evaluating soil salinity patterns in Tehran Province: An artificial neural network model incorporating satellite images and geomorphometric parameters // *Advances in Space Research*. 2025. Vol. 76, No. 8. P. 4235–4248. DOI: 10.1016/j.asr.2025.07.074
- Seemann J.R., Critchley C.* Effects of salt stress on the growth, ion content, stomatal behaviour and photosynthetic capacity of a salt-sensitive species, *Phaseolus vulgaris* L. // *Planta*. 1985. Vol. 164, No. 2. DOI: 10.1007/BF00396077 EDN: MZGNBZ
- Singh B.J., Chakraborty A., Sehgal R.* A systematic review of industrial wastewater management: Evaluating challenges and enablers // *Journal of environmental management*. 2023. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119230 EDN: ESZHSD
- Srivastava A., Parida V.K., Majumder A. et al.* Treatment of saline wastewater using physicochemical, biological, and hybrid processes: Insights into inhibition mechanisms, treatment efficiencies and performance enhancement // *J. Environ. Chem. Eng.* 2021. Vol. 9, Iss. 4. DOI: 10.1016/j.jece.2021.105775 EDN: FJOKZC
- Tackley H.A., Lake C.B., van Proosdij D. et al.* Saline sediment deposition in estuarine floodplains exacerbates vertical saltwater intrusion // *Journal of Hydrology*. 2025. Vol. 657. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2025.133116

Ushakova E., Drobinina E., Puzik P. et al. Impact of Wastewater on Water Quality and Fish Community in the Tolych River, Perm Krai, Russia. *Pollution*. 2023. Vol. 9, No. 2. P. 459–476. DOI: 10.22059/POLL.2022.345916.1556 EDN: CQZWQR

Ushakova E., Perevoshchikova A., Menshikova E. et al. Environmental Aspects of Potash Mining: A Case Study of the Verkhnekamskoe Potash Deposit. *Mining*. 2023. Vol. 3. P. 176–204. DOI: 10.3390/mining3020011 EDN: QCLJEJ

Wei H., Jia K., Wang Q. et al. A remote sensing index for the detection of multi-type water quality anomalies in complex geographical environments // *International Journal of Digital Earth*. 2024. Vol. 17, No. 1. DOI: 10.1080/17538947.2024.2313695 EDN: SNDYOU

Zaeri A., Mohammadi Z., Rezanezhad F. Determining the source and mechanism of river salinity: An integrated regional study // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2023. Vol. 47. DOI: 10.1016/j.ejrh.2023.101411 EDN: BNETCX

Zhao Z., Yang W., Hua P. et al. Deicing salt exacerbates freshwater salinization under climate

change and human activities. *The innovation*. 2025. Vol. 6, Iss. 6. DOI: 10.1016/j.xinn.2025.100862

Zhao C., Wei H., Feyisa G.L. et al. Evaluating spectral indices for water extraction: Limitations and contextual usage recommendations // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2025. Vol. 139. DOI: 10.1016/j.jag.2025.104510

Zhang X., Zuo Y., Wang T. et al. Salinity Effects on Soil Structure and Hydraulic Properties: Implications for Pedotransfer Functions in Coastal Areas // *Land*. 2024. Vol. 13. DOI: 10.3390/land13122077 EDN: RTZOUS

Zhang Z., Savenije H.H.G. Thermodynamics of saline and fresh water mixing in estuaries // *Earth System Dynamics*. 2018. Vol. 9. P. 241–247. DOI: 10.5194/esd-9-241-2018

Zinck J.A., Metternicht G. Soil Salinity and Salinization hazard. *Remote Sensing of Soil Salinization in Remote Sensing of Soil Salinization: Impact on Land Management* // CRC Press. 2009. P. 3–20. DOI: 10.1201/9781420065039.pt1

Indication of Aquatic Landscapes Salinization Rate

E.S. Ushakova, A.A. Perevoshchikova

Perm State University, 15 Bukireva Str., Perm 614068, Russia

E-mail: ushakova.evgeniya@gmail.com

The salinization of freshwater represents one of the most serious threats to global aquatic ecosystems and associated biodiversity. Particular attention in the context of aquatic landscape salinization was paid to bottom sediments, which act not only as indicators but also as active accumulators of salts. Understanding the mechanisms of bottom sediment salinization under natural and anthropogenic impacts, their consequences, and potential recovery strategies is critical for development of the effective water resource management and conservation strategies. This review examines the problem of aquatic landscape salinization in the taiga zone, using the Upper Kama region (Perm Krai, Russia) as a case study. This is an area with developed mining industry, where one of the most important challenges is the reclamation of post-technogenic territories. The following data are presented: (1) global statistics on freshwater salinization; (2) salinization indicators; (3) regional characteristics of salt load; (4) multidisciplinary approach to characterize the salinization processes. This study demonstrates that the aquatic complexes of post-technogenic territories are the integrated dynamic systems requiring the innovative approaches for mitigating salt pollution and rehabilitation of these areas.

Keywords: *aquatic ecosystems; salinization indicators; bottom sediments; technogenic sediments; halogenesis; Verkhnekamye (Upper Kama region).*

Reference

Agriener P., Gieskes J., Subbarao G. et al. 2023. Chloride exchanges between oceanic sediments and seawater: Constraints from chlorine isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 361:10-23. doi: 10.1016/j.gca.2023.09.022

Alam R., Khan S.U., Usman M. et al. 2022. A critical review on treatment of saline wastewater with emphasis on electrochemical based approaches. *Process Safety and Environmental Protection*. 158:625-643. doi: 10.1016/j.psep.2021.11.054

Arevalo F.M., Álvarez-Silva Ó., Cáceres-Euse A. et al. 2022. Mixing mechanisms at the strongly-stratified Magdalena River's estuary and plume. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 277. doi: 10.1016/j.ecss.2022.108077

Baranovskaya N.V., Mazukhina S.I., Panichev A.M., Vakh E.A., Tarasenko I.A., Seryodkin I.V., Ilenok S.S., Ivanov V.V., Ageeva E.V., Makarevich R.A., Strepetov D.A., Vetoshkina A.V. 2024. Osobennosti migratsii khimicheskikh elementov v prirodnykh vodakh i ikh otlozheniya v vide mineralnykh novoobrazovaniy v zhivnykh organizmakh (fiziko-khimicheskoe modelirovanie s verifikatsiyey

na zivotnykh) [Features of chemical elements migration in natural waters and their deposition in the form of neocrystallisations in living organisms (physico-chemical modeling with animal testing)]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov*, 335(2):187-201 (in Russian) doi: 10.18799/24131830/2024/2/4459

Belkin P.A. 2020. Khimicheskiy sostav rodnikovogo stoka v rayone skladirovaniya otkhodov razrabotki i obogashcheniya kaliynykh soley [Chemical composition of spring discharge in the area of mining waste storage and potassium salt enrichment]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*. 19(3):232-240 (in Russian) doi: 10.17072/psu.geol.19.3.232

Botalova K.I., Eremchenko O.Z., Shestakov I.E. 2015. Strategii vyzhivaniya rasteniy v zone vozdeystviya soleotvalov g. Solikamska [Plant Survival Strategies in the Impact Zone of Solikamsk's Salt Dumps]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. n. 3. (in Russian) URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=19780> (access date 30.10.2025).

Brettschneider D.J., Spring T., Blumer M. et al. 2023. Much effort, little success: Causes for the low ecological efficacy of restoration measures in German surface waters. *Environmental Science and Pollution Research*. 35(31). doi: 10.1186/s12302-023-00736-1

Cañedo-Argüelles M., Kefford B., Schäfer R. 2019. Salt in freshwaters: causes, effects and prospects - introduction to the theme issue. *Phil. Trans. R. Soc. B*. 374. doi: 10.1098/rstb.2018.0002

Cao X., Chen S., Liu Y. et al. 2025. Domestic wastewater is an overlooked source and quantity in global river dissolved carbon. *Nat Commun*. 16(7522). doi: 10.1038/s41467-025-62920-6

Chen Q., Vaudour E., Richer-de-Forges A.C. et al. 2025. Spectral indices in remote sensing of soil: definition, popularity, and issues. A critical overview. *Remote Sensing of Environment*. 329. doi: 10.1016/j.rse.2025.114918

Chen Y., Lou S., Chen X. et al. 2024. Effects of brackish water irrigation with different exogenous salt concentrations on the growth and rhizosphere salinity of *Lycium barbarum*. *Scientific reports*. 14(21554). doi: 10.1038/s41598-024-72498-6

Chetina O.A., Eremchenko O.Z. 2022. Vliyaniye NaCl-zasoleniya na sodержanie kationov Na⁺, K⁺, Ca²⁺ v listyakh zlakov pri raznoy reaktsii pochvennoy sredy [Influence of NaCl salinization on the content of Na⁺, K⁺, Ca²⁺ cations in grass leaves under different reaction of the soil environment]. *Elektronnyy nauchno-proizvodstvennyy zhurnal AgroEkoInfo*. 1(49) (in Russian) URL:[\[ecoinfo.ru/STATYI/2022/1/st_107.pdf\]\(http://ecoinfo.ru/STATYI/2022/1/st_107.pdf\) \(access date 30.10.2025\).](http://agro-</p>
</div>
<div data-bbox=)

Dashtgard S.E., Wang A., Pospelova V. et al. 2022. Salinity indicators in sediment through the fluvial-to-marine transition (Fraser River, Canada). *Scientific Reports*. 12 doi: 10.1038/s41598-022-18466-4

Du X., Liu J.T., Lee J. et al. 2022. Influence of sediment sources, water mass and physical processes on the dynamics of flocs at a location between the mouth of a river and the head of a submarine canyon. *Marine Geology*. 445(4–9):106736 doi: 10.1016/j.margeo.2022.106736

El-Manharawy S., Hafez A. 2003. A new chemical classification system of natural waters for desalination and other industrial uses. *Desalination*. 156:163-180.

Eremchenko O.Z., Mitrakova N.V., Shestakov I.E. 2017. Prirodno-tekhnogennaya organizatsiya pochvennogo pokrova territorii vozdeystviya soleotvalov i shlamokhranilishch v solikamsko-bereznikovskom ekonomicheskom rayone [Natural and technological organization of a soil cover of the area of influence of the salt dumps and sludge in Solikamsk-Berezniki economic area]. *Vestnik PGU. Biologiya*. (3):311-320 (in Russian)

Eremchenko O.Z., Moskvina N.V., Mitrakova N.V., et al. 2019. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya zasolennykh, kislykh i shchelochnykh pochv metodom fitotestirovaniya [Assesment of the ecological condition of salted, acid and alkaline soils by the phytotesting method]. *Vestnik PGU. Biologiya*. (1):63-71 (in Russian)

Gao Z., Li X., Zuo L. et al. 2025. Unveiling soil salinity patterns in soda saline-alkali regions using Sentinel-2 and SDGSAT-1 thermal infrared data. *Remote Sensing of Environment*. 322. doi: 10.1016/j.rse.2025.114708

Georgiadi A.G., Barabanova E.A., Milyukova I.P. et al. 2025. Changes in Water-Industry Load on River Water Resources in the Volga–Kama and Angara–Yenisei Reservoir Catchments under Contemporary Global Warming. *Water*. 17(16):2486. doi: 10.3390/w17162486.

Gerasuk V.S., Berdnikov S.V. 2021. Eksperimentalnaya otsenka skorosti osazhdeniya vzheshennogo veshchestva vod v ustye Dona i Taganrogskom zalive [Experimental estimation of the deposition rate of water suspended matter in the mouth of the Don River and in the Taganrog Bay]. *Okeanologiya*. 61(5):780-790 (in Russian)

Gordeev V.V. 2009. Sistema reka-more i eyo rol v geokhimii okeana [The river-sea system and its role in ocean geochemistry]. *Dis. Dr.geol.-min.nauk. Moskva, IO RAN* (in Russian)

- Herbert E.R., Boon P., Burgin A.J. et al. 2015. A global perspective on wetland salinization: ecological consequences of a growing threat to freshwater wetlands. *Ecosphere*. 6(10):1-43. doi: 10.1890/ES14-00534.1
- Hu J.-P., He Y.-Y., Li J.-H. et al. 2024. Planting halophytes increases the rhizosphere ecosystem multifunctionality via reducing soil salinity. *Environmental Research*. 261. doi: 10.1016/j.envres.2024.119707
- Inelova Z., Zaparina Y., Mile O. et al. 2024. Large-scale assessment of characteristic plant species on Eurasian saline and alkaline soda ecosystems. *Ecological Indicators*. 166. doi: 10.1016/j.ecolind.2024.112431
- Ivanichev V.V. 2019. O mekhanizmax soleustoychivosti rasteniy i spetsifike vliyaniya zasoleniya [About the mechanisms of plant resistance to salt and specificity of salinization influence]. *Izvestiya TulGU. Estestvennye nauki*. (4):76-88 (in Russian)
- Jeppesen E., Beklioglu M., Zadereev E. 2023. The Effects of Global Climate Change on Water Level and Salinity: Causes and Effects. *Water*. 15(2853). doi:10.3390/w15152853.
- Kazak E.S., Shindina N.E. 2025. Laboratornye metody opredeleniya sostava porovykh vod slabopronitsaemykh otlozheniy [Laboratory methods of pore water extraction from low permeability rocks to study its chemical composition]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4. Geologiya*. (1):30-40 (in Russian)
- Khayrulina E.A. 2022. Landshaftoobrazovanie v usloviyakh tekhnogenogo galogeneza [Landscape formation under technogenic halogenesis]. Dis. Dr. geogr. nauk. Tomsk, p. 285 (in Russian)
- Kosinova I.I., Sokolova T.V. 2015. Metodologicheskie osobennosti otsenki ekologicheskogo sostoyaniya donnykh otlozheniy iskusstvenno sozdannykh vodnykh obyektov [Methodological features of assessment of sediments ecological conditions in artificially created water bodies]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya*. (3):113-121 (in Russian)
- Lin Z.Q., Bañuelos G.S. 2015. Soil Salination Indicators. In: *Environmental Indicators*. Armon, R., Hänninen, O. (Eds) Dordrecht. Springer. doi: 10.1007/978-94-017-9499-2_20.
- Lotfollahi L., Delavar M.A., Biswas A. et al. 2023. Spectral prediction of soil salinity and alkalinity indicators using visible, near-, and mid-infrared spectroscopy. *Journal of Environmental Management*. 345. doi: 10.1016/j.jenvman.2023.118854
- Luo Z., Deng M., Tang M. et al. 2025. Estimating soil profile salinity under vegetation cover based on UAV multi-source remote sensing. *Scientific Reports*. 15(1). doi: 10.1038/s41598-024-82868-9
- Lychagin M.Yu., Kasimov N.S., Kuryakova A.N., et al. 2011. Geokhimicheskie osobennosti akvalnykh landshaftov delty Volgi [Geochemical features of the aquatic landscapes of the Volga Delta]. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*. (1):100-113 (in Russian)
- Maas C.M., Kaushal S.S., Rippey M.A. et al. 2023. Freshwater salinization syndrome limits management efforts to improve water quality. *Front. Environ. Sci*. doi: 10.3389/fenvs.2023.1106581.
- Martynenko N.A., Pozdeev I.V., Baklanov M.A. 2017. Struktura algotsenozov rek Permskogo kraja v usloviyakh antropogenogo zasoleniya otkhodami kaliynogo proizvodstva [Algaecenoses structure of the Permskiy Krai Rivers under anthropogenic salinization with potassium production wastes]. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Biologiya*. (3):347-354 (in Russian)
- Mehla M.K., Kumar A., Kumar S. et al. 2024. Soil salinity assessment and mapping using spectral indices and geostatistical techniques-concepts and reviews. In: *Remote Sensing of Soils*. Elsevier, pp. 429-437 doi: 10.1016/B978-0-443-18773-5.00019-3.
- Mikheev P.B., Mukhina M.V., Kostitsyna N.V., et al. 2023. Eksperimentalnaya otsenka khronicheskogo vliyaniya povyshennoy mineralizatsii i temperatury na somaticheskie indeksy, biokhimicheskie pokazateli krovi i vyzhivaemost segolotok rechnogo okunya Perca fluviatilis [Experimental assessment of the chronic effect of increased mineralization and temperature on somatic indices, biochemical blood parameters and survival of perch *Perca fluviatilis* juveniles]. *Sibirskiy ekologicheskii zhurnal*. 30(1):60-71 (in Russian)
- Mikheev P.B., Pankov A.N., Ushakova E.S. et al. 2025. On the Criteria for the Assessment of the State of Polluted Freshwater Ecosystems with an example of the Small River on the Eastern Edge of Europe (Perm Krai, Russia). *Pollution*. 11(1):51-68. doi: 10.22059/poll.2024.374565.231.
- Miller J. 2024. Salt Measurements and Soil Classifications. *Agriculture & Natural Resources. Fact Sheets and Publications*. URL: <https://www.udel.edu/academics/colleges/canr/cooperative-extension/fact-sheets/salt-measurements-and-soil-classifications-swi-series-2/> (access date 14.10.2025).
- Moyano-Salcedo A.J., Piana T., Crabot J. et al. 2025. GLOBAL river SALinity and associated ions (GlobSalt). *Sci Rep*, 15(18701). doi:10.1038/s41598-025-96222-0.
- Murzyev A.R., Kazarinov S.N., Komarova L.V. et al. 2024. Vliyanie zagryazneniya rek goroda Berezники na biologicheskie kharakteristiki ryb [The influence of river pollution in the city of Berezники on the biological fish characteristics]. In: *Fundamentalnye i prikladnye issledovaniya v biologii i ekologii*. Perm, PGU, pp. 234-241 (in Russian)

Musie W., Gonfa G. 2023. Fresh water resource, scarcity, water salinity challenges and possible remedies: A review. *Heliyon*, 9(8). doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e18685.

Nikitenko O.A., Ershov V.V. 2021. Gidrogeokhimicheskie kriterii poiska i razrabotki uglevodородных mestorozhdeniy: obzor, analiz i perspektivy ispolzovaniya na ostrove Sakhalin [Hydrogeochemical indicators for the exploration and development of hydrocarbon fields: review, analysis and prospects for use on Sakhalin Island]. *Geosistemy perekhodnykh zon*. 5(4):361-377 (in Russian)

No-Vidal C., Ehlert P., Hagyo A. et al. 2012. Risk assessment methodologies of soil threats in Europe: status and options for harmonization for risks by erosion, compaction, salinization, organic matter decline and landslides. *Risk Assessment Methodologies of Soil Threats in Europe*, JRC Scientific and Policy Reports EUR. Office for Official Publication of the European Communities, Luxembourg. doi: 10.2788/47096.

O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Rossiyskoy Federatsii v 2023 godu. Proekt Gosudarstvennogo doklada [On the State and Protection of the Environment of the Russian Federation in 2023. Draft State Report]. Moskva. Minprirody Rossii, OOO Intellektualnaya analitika, FGBU Direktsiya NTP», Fond ekologicheskogo monitoringa i mezhdunarodnogo tekhnologicheskogo sotrudnichestva, p. 707. (in Russian)
URL: <http://www.mnr.gov.ru> (access date 20.10.25).

Pankova E.I., Konyushkova M.V., Gorokhova I.N. 2017. O probleme otsenki zasolennosti pochv i metodike krupnomasshtabnogo tsifrovogo kartografirovaniya zasolennykh pochv [On the problem of soil salinity evaluation and method of large-scale digital mapping of saline soils]. *Ekosistemy: ekologiya i dinamika*. 1(1):26-54 (in Russian)

Paz A.M., Castanheira N., Farzhamian M. et al. 2020. Prediction of Soil Salinity and Sodicity using Electromagnetic Conductivity Imaging. *Geoderma*, 361. doi: 10.1016/j.geoderma.2019.114086.

Perera H., Jayawardana C., Chandrajith R. 2024. Freshwater salinisation: unravelling causes, adaptive mechanisms, ecological impacts, and management strategies. *Environ. Monit. Assess.*, 196(1195). doi: 10.1007/s10661-024-13388-2.

Prokopyeva K.O., Konyushkova M.V. 2023. Garmonizatsiya rezultatov khimicheskogo issledovaniya zasolennosti pochv [Harmonization of the results of soil salinity chemical study]. *Aridnye ekosistemy*. 29(3):24-35 (in Russian)

Richard L.A. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *US Department of Agriculture. Agricultural Handbook*, 60:7-53. doi: 10.1097/00010694-195408000-00012.

Sadeghi Pour Marvi M., Moharami S. 2025. Evaluating soil salinity patterns in Tehran Province: An artificial neural network model incorporating satellite images and geomorphometric parameters. *Advances in Space Research*, 76(8): 4235-4248. doi: 10.1016/j.asr.2025.07.074.

Sayranova P.Sh., Khayrulina E.A., Mitrakova N.V. et al. 2023. Modelirovanie kak prognoz transformatsii pochv pri tekhnogennom zasolenii [Modeling as a tool for soil transformation forecasting under technogenic salinization]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. (4):52-60 (in Russian)

Seemann J.R., Critchley C. 1985. Effects of salt stress on the growth, ion content, stomatal behaviour and photosynthetic capacity of a salt-sensitive species, *Phaseolus vulgaris* L. *Planta*, 164(2). doi: 10.1007/BF00396077.

Ses K.V. 2018. Geneticheskie tipy podzemnykh vod neftegazonosnykh otlozheniy Yamalskoy NGO [Genetic types of groundwater of Yamal petroleum region oil-and-gas bearing deposits]. *Interksp Geo-Sibir*. 1:3-9 (in Russian)

Shadrina I.A., Baklanov M.A., Mikheev P.B. 2024. Vidovoy sostav ikhtiofauny priustevogo uchastka reki Volim v usloviyakh antropogennogo zasoleniya vod [Ichthyofauna species composition in the mouth of the Volim River under anthropogenic salinization]. *In: Fundamentalnye i prikladnye issledovaniya v biologii i ekologii: sbornik statey po materialam regionalnoy nauchnoy konferentsii*. Perm, PGU, pp. 278-281 (in Russian)

Shcherbinina G.P., Proistolupov G.V., Bychkov S.G. 2023. Rekonstruktsiya razvitiya solyanykh struktur Verkhnekamskogo mestorozhdeniya soley [Reconstruction of the salt structures development on the Verkhnekamskoye Salt Deposit]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*. 22(1):80-90 (in Russian) doi: 10.17072/psu.geol.22.1.80

Shirokova V.A. 2013. Klassifikatsii prirodnykh vod: proshloe, nastoyashchee, budushchee [Classifications of natural waters: past, present, future]. *Vestnik TGU*. 18(3):1023-1027 (in Russian)

Shishkonakova E.A. 2017. Antropogennaya rasstitelnost territoriy predpriyatiy OAO «Uralkaliy» (Permskaya oblast) [Anthropogenic vegetation in the area of the enterprise Uralkaliy (Perm region, Russia)]. *Sotsialno-ekologicheskie tekhnologii*. (3):65-79 (in Russian)

Singh B.J., Chakraborty A., Sehgal R. 2023. A systematic review of industrial wastewater management: Evaluating challenges and enablers. *Journal of environmental management*. doi: 10.1016/j.jenvman.2023.119230.

Srivastava A., Parida V.K., Majumder A. et al. 2021. Treatment of saline wastewater using physicochemical, biological, and hybrid processes: In-

sights into inhibition mechanisms, treatment efficiencies and performance enhancement. *J. Environ. Chem. Eng.* 9(4). doi: 10.1016/j.jece.2021.105775.

Tackley H.A., Lake C.B., van Proosdij D. et al. 2025. Saline sediment deposition in estuarine floodplains exacerbates vertical saltwater intrusion. *Journal of Hydrology.* 657. doi: 10.1016/j.jhydrol.2025.133116.

Saline Water and Salinity. USGS. 2018. URL: <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/saline-water-and-salinity> (access date 13.10.2025).

Ushakova E., Drobinina E., Puzik P. et al. 2023. Impact of Wastewater on Water Quality and Fish Community in the Tolych River, Perm Krai, Russia. *Pollution.* 9(2):459-476. doi: 10.22059/POLL.2022.345916.1556.

Ushakova E., Perevoshchikova A., Menshikova E. et al. 2023. Environmental Aspects of Potash Mining: A Case Study of the Verkhnekamskoe Potash Deposit. *Mining.* 3:176-204. doi: 10.3390/mining3020011.

Ushakova E.S. 2024. Ekogeokhimiya vodnykh ekosistem urbanizirovannykh territoriy Severnogo Prikamya [Ecogeochemistry of aquatic ecosystems in urbanized territories of the Northern Prikamye Region]. Diss. Cand.Geol.-Min.Nauk. Perm, PGU, p. 187 (in Russian)

Ushakova E.S., Belkin P.A., Baklanov M.A. et al. 2022. Ekogeokhimicheskaya i bioindikatsionnaya otsenka zagryazneniya malykh rek goroda Berezniki [Ecological-geochemical and bioindication assessment of the small rivers pollution at the city of Berezniki]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya.* 21(4):384-393 (in Russian) doi: 10.17072/psu.geol.21.4.375

Ushakova E.S., Menshikova E.A. 2024. Geoekologicheskie aspekty vliyaniya razgruzki vysokomineralizovannykh khloridno-natrievykh vod na khimizm poverkhnostnykh vod na territorii

kaliynogo mestorozhdeniya [Geoecological aspects of the influence exerted by the discharge of highly mineralized sodium-chloride waters on surface water chemistry in a potash deposit area]. In: *Sovremennye problemy landshaftovedeniya i geoekologii.* Minsk, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet, pp. 209-212. (in Russian)

Wei H., Jia K., Wang Q. et al. 2024. A remote sensing index for the detection of multi-type water quality anomalies in complex geographical environments. *International Journal of Digital Earth.* 17(1). doi: 10.1080/17538947.2024.2313695.

Zaeri A., Mohammadi Z., Rezanezhad F. 2023. Determining the source and mechanism of river salinity: An integrated regional study. *Journal of Hydrology: Regional Studies.* 47. doi: 10.1016/j.ejrh.2023.101411.

Zhang X., Zuo Y., Wang T. et al. 2024. Salinity Effects on Soil Structure and Hydraulic Properties: Implications for Pedotransfer Functions in Coastal Areas. *Land.* 13. doi: 10.3390/land13122077.

Zhang Z., Savenije H.H.G. 2018. Thermodynamics of saline and fresh water mixing in estuaries. *Earth System Dynamics.* 9:241-247. doi: 10.5194/esd-9-241-2018.

Zhao C., Wei H., Feyisa G.L. et al. 2025. Evaluating spectral indices for water extraction: Limitations and contextual usage recommendations. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.* 139. doi: 10.1016/j.jag.2025.104510.

Zhao Z., Yang W., Hua P. et al. 2025. Deicing salt exacerbates freshwater salinization under climate change and human activities. *The innovation.* 6(6). doi: 10.1016/j.xinn.2025.100862.

Zinck J.A., Metternicht G. 2009. Soil Salinity and Salinization hazard. *Remote Sensing of Soil Salinization: Impact on Land Management.* CRC Press, pp. 3-20. doi: 10.1201/9781420065039.pt1.