



Научная статья

Геотехнология и инженерная геология

## Оценка экологического состояния водных экосистем по изучению донных отложений озер

М.А.Чукаева<sup>1</sup>✉, Т.В.Сапелко<sup>2</sup><sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия<sup>2</sup> Институт озероведения РАН – Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, Санкт-Петербург, Россия

**Как цитировать эту статью:** Чукаева М.А., Сапелко Т.В. Оценка экологического состояния водных экосистем по изучению донных отложений озер // Записки Горного института. 2025. Т. 271. № 16225. С. 53-62. EDN IXRSRC

### Аннотация

В статье представлены результаты сопряженных палинологических и геохимических исследований пяти озер различного генезиса, расположенных на пути следования экспедиции «По следам Александра фон Гумбольдта по Западной Сибири, Алтаю и Восточному Казахстану», приуроченной к двойному юбилею: 190-летию экспедиции по России знаменитого ученого и его 250-летию. Выполнен геохимический анализ воды и донных отложений озер Ик (Сибирь), Кольванское и Белое (Алтай), Безымянное (Казахстан) и Нагорного пруда (Алтай), дана оценка их экологического состояния на основе единичных и интегральных критериев. Высокий уровень загрязнения отмечен для Нагорного пруда и оз. Безымянное, что вызвано значительной техногенной нагрузкой от расположенных вблизи рудников. Это подтверждается результатами палинологических исследований. Удовлетворительной экологической обстановкой характеризуются водные экосистемы озер Кольванское и Белое, испытывающих повышенную рекреационную нагрузку. Результаты спорово-пыльцевого анализа и анализа непильцевых палиноморф показали низкую способность этих озер к самовосстановлению. Наиболее благоприятное экологическое состояние и высокая самоочищающая способность отмечены для оз. Ик, что согласуется с данными палинологических исследований. По результатам проведенных исследований сделан вывод о возможности проведения экспрессной оценки экологического состояния водных экосистем по изучению озер с помощью сопряженного палинологического и геохимического анализа.

### Ключевые слова

озера; донные отложения; поверхностные пробы; техногенное воздействие; геохимический анализ; спорово-пыльцевой анализ

### Финансирование

Исследования выполнены в рамках Государственного задания № FSRRW-2023-0002; FMNG-2019-0004.

Поступила: 13.04.2023

Принята: 25.10.2023

Онлайн: 23.01.2024

Опубликована: 25.02.2025

### Введение

В мае и июне 2019 г. в рамках совместного проекта Санкт-Петербургского горного университета, Фрайбергской горной академии и Санкт-Петербургского союза ученых состоялась российско-германская экспедиция «По следам Александра фон Гумбольдта по Западной Сибири, Алтаю и Восточному Казахстану», посвященная 250-летию со дня рождения выдающегося ученого и 190-летию его экспедиции по России. По пути следования экспедиции в числе разнообразных объектов (обнажения, горные породы, отвалы, почвы, ландшафты) были изучены озера.

Для комплексной оценки водной экосистемы необходимо знать показатели воды и ее биотической части [1]. Донные отложения также играют важную роль при оценке состояния водного объекта как депонирующая среда [2]. Они накапливают химические элементы и позволяют получить информацию об экологическом состоянии водосборной площади. Донные отложения – важный источник информации о прошлых климатических и геохимических условиях, позволяющий оценить экологическое состояние воздушной и водной сред [3, 4]. Они активно аккумулируют загрязняющие вещества и могут стать источником вторичного загрязнения водных объектов. Тяжелые металлы, интенсивно накапливающиеся в донных отложениях, относятся к наиболее опасным загрязнителям [5].



Для экспресс-оценки экологического состояния озер отбирались пробы воды и донных отложений с последующими химическим и спорово-пыльцевым анализами. Палинологические исследования озерных отложений дают дополнительную информацию для оценки регионального геохимического фона [6]. При сопоставлении результатов анализа поверхностных проб с современной растительностью нередко выявляются несоответствия, их анализ позволяет сделать выводы об изменениях растительного покрова под влиянием техногенеза [7, 8].

**Район исследования.** Авторами исследованы разнотипные (по генезису, размерам, водному балансу и химическому составу) озера на границе лесной и лесостепной зон Сибири, Рудного Алтая и Казахстана (рис.1).

Озеро Ик расположено в Крутинском районе Омской обл. на юге Западно-Сибирской равнины в междуречье Ишима и Иртыша. Оно входит в систему Больших Крутинских озер (Ик, Салтаим, Тенис), относящихся к Иртышской озерно-речной системе. Форма озера круглая, слегка вытянутая с юго-запада на северо-восток, длина 12 км, ширина 8 км, длина береговой линии 36,2 км. Происхождение котловины ледниковое. Площадь зеркала 71,4 км<sup>2</sup>, площадь водосбора 1190 км<sup>2</sup>. Дно ровное, глубина плавно увеличивается к середине, средняя глубина 2,7 м, максимальная 4,7 м. Берега обрывистые, сложены прибрежно-аллювиальными отложениями песков с прослоями глин с подстилающими их алеволитами и песчаниками [9]. На оз. Ик преобладают юго-западные ветры, поэтому северо-восточный и восточный берега подвержены абразии и служат источником поступления в воду Са, Mg, Fe и Al. Водная растительность зонально обрамляет озеро. У самого уреза воды встречаются различные виды осок, стрелолист, частуха, подорожник, гречиха земноводная, телорез. Далее идет зона рогозы, камыша и тростника. Водное питание озера поддерживается реками Яман и Крутиха, а также атмосферными осадками. Устье р. Крутиха сильно заилено, в маловодные годы сток воды бывает незначителен. Из озера вытекает р. Китерма, соединяющая оз. Ик с оз. Салтаим. В истоке реки имеется плотина, поддерживающая уровень воды в озере. Водосбор расположен в лесостепной зоне [9]. По периметру озера расположены населенные пункты Китерма, Усть-Китерма, Крутинка и Яман, где сосредоточены фермерские хозяйства, летние лагеря скота, возделываемые поля и несанкционированные свалки. Поверхностный сток с этих территорий служит источником загрязнения озера Al, Fe, Cu, Mn и биогенными элементами. Оно также испытывает рекреационную нагрузку. Здесь отобраны три поверхностных пробы донных отложений и в этих же точках – пробы воды.



Рис.1. Район исследования с точками отбора проб (составлено на основе Google карты)



Колыванское озеро находится у подножия северного склона Колыванского хребта в Змеиногорском районе Алтайского края. В результате многолетней активной добычи полиметаллических руд здесь повышен региональный фон по Zn, Cr и Cu. Озеро имеет неправильную форму и вытянуто с севера на юг. Его протяженность 4 км при ширине от 0,5 до 2,5 км, средняя глубина 1,8 м, максимальная 4,1 м [10]. Происхождение котловины предположительно тектоническое. Площадь водного зеркала 4,5 км<sup>2</sup>, площадь водосбора 55,7 км<sup>2</sup>. Берега пологие, низкие, местами заросли кустарником. С восточной стороны впадает р. Колыванка, с западной руч. Почтовый, на севере вытекает р. Усть-Колыванка [11]. Озеро Колыванское – геологический и ландшафтный памятник природы краевого значения, отличается богатой и разнообразной флорой и уникальной растительностью. В озере обитает редкий вид (третичный реликт) – водяной орех. На берегах преобладают ковыль перистый, волоснец, овсяница валлиская, мятлик степной, гониолимон. Встречаются густые заросли кустарников (черемуха обыкновенная, кизильник черноплодный, барбарис сибирский, жимолость татарская), растут береза повислая, сосна обыкновенная. Широко распространен клен ясенелистный, относящийся к адвентивным видам. Озеро испытывает высокую рекреационную нагрузку. В результате многолетнего неорганизованного отдыха и туризма ландшафты значительно нарушены. Приоритетные загрязнители, поступающие в озеро с поверхностным стоком, – Fe, Cu, Al, Zn, Pb, Cr и биогенные элементы. На озере отобраны три поверхностных пробы донных отложений и в одной точке – проба воды.

Нагорный пруд расположен в г. Змеиногорске Алтайского края у южного подножия Колыванского хребта. Он создан в пойме р. Змеевка в 1786 г. по проекту гидротехника К.Д.Фролова [12]. Устроенная на реке плотина подтопила более раннюю, лежавшую выше по течению, и образовала пруд, питаемый рекой, несколькими ключами, вешними и дождевыми водами. Площадь зеркала 7,5 км<sup>2</sup>. В настоящее время сохранились плотина и часть сооружений для подъема руды и откачки шахтных вод. Основной источник техногенного воздействия – работавший в XVIII-XX вв. и законсервированный Змеиногорский рудник, на котором велась добыча полиметаллических руд. Рекультивация отвалов и выработок не производилась, поэтому загрязнение пруда имеет аэрогенный (в результате пыления) и гидрогенный (в результате инфильтрации атмосферных осадков через толщу нарушенных пород) характер [13, 14]. Основные потенциальные загрязнители – Fe, Zn, Cu, Cr, Ni, Cd, Ti. Из Нагорного пруда отобраны поверхностная проба донных отложений и проба воды.

Озеро Белое расположено в широкой котловине Колыванского хребта в Курьинском районе Алтайского края, имеет овальную форму размером 2,4 на 1,2 км, среднюю глубину 4,5 м, максимальную 7,4 м [15]. Происхождение котловины тектоническое. Площадь зеркала 2,7 км<sup>2</sup>, площадь водосбора 14,2 км<sup>2</sup>. Озеро лежит в гранитных берегах с юга и в сланцевых с востока и севера, относится к бассейну р. Локтевка, левого притока р. Чарыш. Искусственным каналом соединяется с р. Белая. В устье канала есть бетонная плотина, регулирующая сток воды [16]. В озеро впадают руч. Озерный на юго-востоке и руч. Безымянный на северо-востоке. В окрестностях распространена горностепная растительность, с северо-запада подходит сосновый бор. По берегам растут: тростник южный, камыш озерный, горец земноводный, роголистник погруженный, рдест блестящий и курчавый. В рекреационной нагрузке на экосистему озера велика доля неорганизованного туризма, особенно в летние месяцы. Юго-восточная часть побережья используется под сенокосы. С 2010 г. озеро имеет статус памятника природы в границах береговой линии. С 2013 г. компания ООО «Эко-вектор» добывает на озере сапропель. Из озера отобраны две пробы донных отложений и проба воды.

Пробы донных отложений взяты также на оз. Безымянном, расположенном на Рудном Алтае в горной котловине у подножия Ивановского хребта в 30 км от г. Риддер (Казахстан). Озеро бессточное, не имеет притоков. С западной стороны его обрамляют обнажения известковых и кремнистых алевролитов и микрокварцитов предположительно крюковской свиты мощностью до 25-30 м. Вдоль разрывных нарушений горные породы локально изменены наложенными гидротермальными процессами. В Риддерском районе ими образованы богатые полиметаллические руды, обрабатываемые несколькими рудниками [17]. В изученном обнажении зафиксирована рассеянная вкрапленная минерализация сфалерита, галенита и халькопирита. В зоне окисления эти минералы активно разлагаются и в результате ветровой и водной эрозии могут служить источником загрязнения поверхностных вод Zn, Pb, Cu и Fe [18]. Озеро также может испытывать техногенную нагрузку от действующего горного предприятия в г. Риддер. Преобладающее направление ветра по данным многолетних метеорологических наблюдений западное (38 %), что способствует аэротехногенному



переносу загрязняющих веществ с территории рудников и отвалов [19]. Основные потенциальные загрязнители – Fe, Zn, Cu, Mn, Pb, Cr, Cd и Ni.

Скорость осадконакопления в изучаемых озерах составляет 0,3-0,35 см/год [9].

### Методы

Пробы воды были отобраны с лодки и с берегов небольших озер с глубины 10-30 см от поверхности в полиэтиленовые емкости. Сразу же на месте отбора проб при помощи мультиметра WTW MULTI 350I с комплектом электродов производилось определение нестойких показателей качества воды, таких как температура, минерализация и pH. В соответствии с ГОСТ Р 59024-2020 одну часть пробы подкисляли азотной кислотой до pH менее 2, а вторую оставляли в естественном состоянии. Затем пробы охлаждались до температуры +4 °С для транспортировки и дальнейшего анализа в лабораторных условиях.

Донные отложения были отобраны лотом Воронкова в полиэтиленовые емкости в тех же точках, что и пробы воды, после чего охлаждались до температуры +4 °С для дальнейшей транспортировки. Мощность слоя отобранных донных отложений составляла 2,5-3 см. В лабораторных условиях проводился палинологический анализ донных отложений для характеристики растительности озер и их водосборных бассейнов, а также определялся их химический состав: органический, неорганический и общий углерод C на TOC-V (Shimadzu), водорастворимые, подвижные и валовые формы тяжелых металлов согласно МВИ-80-2008. Для донных отложений определялись потери при прокаливании и pH водной вытяжки согласно ГОСТ 26423-85.

Количественный химический анализ воды выполнялся в аккредитованной лаборатории моделирования экологической обстановки Санкт-Петербургского горного университета. Концентрации металлов определялись методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой на ICPE-9000 (Shimadzu) согласно М-02-1109-09, анионов – хроматографическим методом на LC-20 Prominence (Shimadzu) методом ионной хроматографии согласно М-02-1805-09.

Спорово-пыльцевой анализ донных отложений выполнялся в Институте озероведения РАН. Образцы обрабатывались с применением тяжелой жидкости по методике В.П.Гричук<sup>1</sup> и проверялись на карбонатность с помощью соляной кислоты. Слабокарбонатным оказался только образец из Нагорного пруда. Идентификация пыльцы и спор выполнялась по определителям Л.А.Куприянова, Л.А.Алешина<sup>2</sup> и P.D.Moore, J.A.Webb, M.E.Collinson<sup>3</sup>, а также с помощью коллекций материала Института озероведения РАН. Для реконструкции состояния озерной экосистемы в каждом образце определялись непыльцевые палиноморфы [20], зеленые водоросли *Botryococcus braunii* и *Pediastrum*, споры грибов, устьица растений, остатки микрофауны, ризоподы, микрочастицы углей и т.д. [21].

Количественный химический анализ донных отложений выполнялся в лаборатории моделирования экологической обстановки Санкт-Петербургского горного университета. Пробы донных отложений высушивались при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния в хорошо проветриваемом месте при отсутствии прямых солнечных лучей, при этом минимизировалась возможность их вторичного загрязнения. После этого из воздушно-сухих проб при помощи пинцета удалялись посторонние частицы (камешки, обломки, водоросли и т.д.). Очищенная проба измельчалась в агатовой ступке. Влажность и потери при прокаливании определялись на термогравиманализаторе TGA 701 фирмы LECO согласно Р 52.24.763-2012.

В качестве приоритетных загрязнителей в донных отложениях рассматривались металлы [22, 23]. Разложение проб для определения их валового содержания выполнялось в микроволновой системе со смесью соляной, азотной, плавиковой и борной кислот. Подвижные формы извлекались ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH = 4,8. Для определения водорастворимых форм готовились водные вытяжки на основе бидистиллированной воды. Продукты кислотного разложения и вытяжки анализировались методами атомно-абсорбционной и атомно-эмиссионной спектроскопии согласно методике МВИ-80-2008. В водных вытяжках также определялось значение pH.

<sup>1</sup> Гричук В.П. Методика обработки осадочных пород, бедных органическими остатками, для целей пыльцевого анализа // Проблемы физической географии. 1940. № 8. С. 53-58.

<sup>2</sup> Куприянова Л.А., Алешина Л.А. Пыльца и споры растений флоры Европейской части СССР. Л.: Наука, 1972. 171 с.

<sup>3</sup> Moore P.D., Webb J.A., Collinson M.E. Pollen analysis. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1991. P. 216.



### Обсуждение результатов

Все рассматриваемые озера по степени минерализации пресные с нейтральной реакцией среды. Согласно классификации О.А.Алекина, по преобладающему аниону относятся к гидрокарбонатным, по преобладающему катиону – оз. Ик относится к натриевым, остальные – к кальциевым. Озера Ик и Колыванское относятся к высшей категории, оз. Белое – к первой категории рыбохозяйственного значения, Нагорный пруд и оз. Безымянное – водные объекты культурно-бытового значения. Сравнение результатов с ПДК для соответствующих категорий водопользования показало превышения по Fe ( $K_{\text{ПДКр.х}} = 3$ ), Mn (9), Al (3) и Cu (15) в оз. Колыванское; по Mn (3) и Cu (30) в оз. Белое; по Sr (1,5) и Cu (60) в оз. Ик. В Нагорном пруду и оз. Безымянное превышений зафиксировано не было, что связано с более «мягкими» нормативами для водных объектов культурно-бытового значения.

Относительно условно фоновых значений для озер лесостепной зоны Западной Сибири, полученных по результатам исследования химического состава 130 малых озер (не подверженных прямому антропогенному воздействию) [24, 25], – в оз. Ик повышенное содержание Cu ( $K_{\text{фон}} = 6,8$ ), Co (2) и Cr (1,2); в оз. Колыванское – Al (2,6), Zn (2,3), Cu (2), Cr (1,8) и Fe (1,5); в оз. Белое – Co (1,5), Cr (2), Cu (3,3) и Zn (1,8); в Нагорном пруду – Fe (4), Al (3,1), Cu (4,5), Cr (4,5), Zn (2,2) и Ni (1,8); в оз. Безымянное – Cu (7), Cr (4,2), Zn (3,1) и Ni (2,4).

Результаты спорово-пыльцевого анализа (среднеарифметические значения по трем пробам) представлены в табл.1, согласно которой озерные ландшафты Нагорного пруда и оз. Безымянное отнесены к лесным, а оз. Ик и Колыванское к лесостепным.

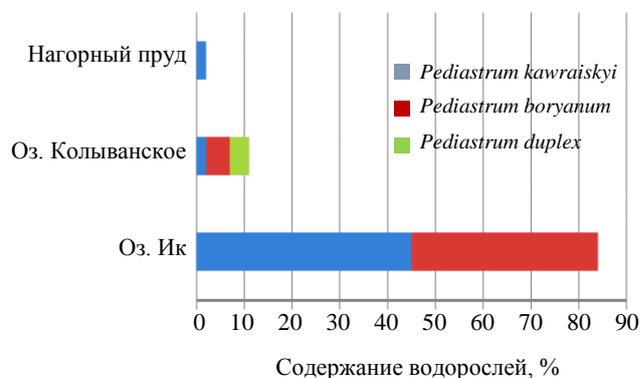
Таблица 1

Состав спорово-пыльцевых спектров поверхностных проб исследуемых водоемов

Водоем	Пыльца деревьев, %	Пыльца трав, %	Споры, %
Оз. Ик	61	38	1
Оз. Колыванское	43	53	4
Нагорный пруд	73	25	2
Оз. Безымянное	70	30	0

В спорово-пыльцевых спектрах оз. Ик и Колыванское среди древесных пород преобладает пыльца березы и сосны, в оз. Безымянное – пыльца пихты и сосны со значительной примесью березы и небольшой – ели. В Нагорном пруду абсолютно доминирует пыльца сосны, которая во всех случаях частично заносная, так как очень летуча и переносится на максимальное расстояние относительно всех других пыльцевых зерен. Пыльца трав оз. Ик и Колыванское представлена в основном злаками и полынями, оз. Безымянное и Нагорном пруду – злаками и осоковыми. Во всех пробах, кроме донных отложений оз. Ик, обнаружена пыльца рудеральных трав. Для оз. Колыванское выявлено максимальное содержание пыльцы водных и прибрежно-водных растений.

Непыльцевые палиноморфы во всех пробах донных отложений представлены зелеными водорослями *Pediastrum*, остатками микрофауны, спорами грибов и микрочастицами углей. В поверхностных пробах оз. Безымянное не было обнаружено ни одного вида водорослей *Pediastrum*. Максимальное их содержание установлено для оз. Ик, при этом наибольшее разнообразие видов отмечено для оз. Колыванское (рис.2). В оз. Колыванское зеленые водоросли представлены также *Botryococcus braunii* и диатомовыми, в Нагорном пруду – в основном диатомовыми. В оз. Ик и Нагорном пруду отмечены споры папоротников и хвощей. Небольшое количество панцирных амёб выявлено только в Нагорном пруду.

Рис.2. Различные виды водорослей *Pediastrum* в поверхностных пробах исследуемых водоемов



Максимальное содержание микрочастиц углей и минимальное микрофауны установлено для оз. Безымянное, там же выявлена пыльца *Elodea*. В донных отложениях оз. Ик в небольших количествах отмечены *Plantago* и *Cerealia*.

Результаты химического анализа донных отложений на содержание валовых, подвижных и водорастворимых форм металлов представлены в табл.2. Значения потерь при прокаливании и водородного показателя водной вытяжки представлены в табл.3.

Таблица 2

## Содержание валовых, подвижных и водорастворимых форм металлов в исследуемых образцах донных отложений

Элемент	ПДК (ОДК)* валовая / подвижная форма		Содержание металлов: валовая / подвижная / водорастворимая формы, ppm**											
			Оз. Ик			Оз. Кольванское			Нагорный пруд			Оз. Безымянное		
Al	н/н		22850	13,1	11,3	45057	81	5,6	19624	27	26	34184	28	13
Ba	н/н		175	6,8	0,95	325	10	1,7	1731	76	1,1	170	22	0,67
Cd	0,5	н/н	<b>1,4</b>	0,49	0,17	<b>2,4</b>	1,2	0,16	<b>3,8</b>	1,2	0,12	<b>4,4</b>	1,1	0,095
Co	н/н	5,0	3,1	0,87	0,39	16	1,8	0,51	14	3,0	0,20	27	<b>5,2</b>	0,28
Cr	0,05	н/н	<b>18</b>	0,13	0,058	<b>73</b>	0,53	0,0093	<b>46</b>	0,38	0,088	<b>49</b>	0,43	0,060
Cu	33	3	3,6	0,57	0,079	<b>42</b>	1,9	0,20	<b>34</b>	2,6	0,48	<b>83</b>	<b>11</b>	0,75
Fe	н/н	н/н	7017	75	15	52152	1983	0,89	27352	680	37	46897	280	11
Mn	1500	80	171	16	0,44	481	77	19	785	<b>523</b>	1,4	<b>1655</b>	<b>303</b>	0,78
Ni	н/н	4,0	15	0,28	0,072	51	3,1	0,18	25	1,4	0,18	38	1,3	0,15
Pb	32	6,0	8,0	0,27	< 0,25	8,4	0,88	< 0,25	4,3	0,33	< 0,25	4,1	0,28	< 0,25
Sr	н/н		85	12	3,7	131	20	4,6	336	183	13	114	35	2,6
Ti	н/н		2523	0,92	0,89	5387	0,99	0,18	3834	0,52	0,28	4754	0,57	0,30
Zn	55	23	6,7	1,7	0,058	<b>81</b>	6,8	1,0	<b>86</b>	7,1	0,25	<b>366</b>	<b>72</b>	0,24

\* Значения ПДК и ОДК приняты по СанПиН «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»; н/н – показатель не нормируется.

\*\* Среднеарифметические значения по трем пробам; полужирные цифры – значения, превышающие нормативы ПДК (ОДК).

Таблица 3

## Потери при прокаливании и рН водной вытяжки исследуемых образцов донных отложений

Показатель	Оз. Ик	Оз. Кольванское	Нагорный пруд	Оз. Безымянное
Потери при прокаливании, %	16,3	14,4	9,04	6,04
рН	6,66	6,36	7,17	6,88

Донные отложения, отобранные на оз. Белое, более чем на 90 % представлены песчаной фракцией ( $d > 0,05$  мм). Это связано с ведущейся на озере добычей сапропеля. Дальнейший химический и спорово-пыльцевой анализ донных отложений не проводился, так как доказано [26, 27], что для получения представительной информации о состоянии водных объектов необходимо анализировать тончайшие частицы ( $d < 0,01$  мм).

Оценка степени воздействия донных отложений на экологическое состояние водных объектов представляет определенные методологические трудности [28], это обусловлено отсутствием для них нормативов. Водный кодекс Российской Федерации определяет озера как совокупность поверхностных вод и покрытых ими земель в пределах береговой линии, в связи с чем сначала было проведено сравнение концентраций валовых форм металлов с ПДК (ОДК) для почв [29, 30]. Однако учет только валовых форм металлов не позволяет оценить их миграционную способность, а, следовательно, и потенциальный вклад донных отложений в загрязнение поверхностных вод. Достоверная интерпретация результатов анализа донных отложений должна строиться на информации о формах нахождения загрязняющих веществ [28]. По этой причине, а также из-за потенциально возможного вторичного загрязнения исследуемых водных объектов в результате ветрового взмучивания, изменения окислительно-восстановительных условий, повышенной активности микроорганизмов и т.д., особое внимание уделялось оценке подвижных и водорастворимых форм металлов [31, 32].



Озеро Безымянное – единственный из исследованных водных объектов, в котором зафиксировано превышение установленных нормативных значений для подвижных форм металлов (Co, Cu, Zn), однако в процентном соотношении относительно валовых форм их содержание незначительно. Высокий процент водорастворимых и подвижных форм тяжелых металлов относительно их валового содержания (см. табл.2) отмечается в донных отложениях оз. Ик (Cd, Co, Cr, Ni, Sr и Ti), оз. Колыванское (Co, Sr, Mn) и Нагорного пруда (Cr, Cu, Ti). Предположительно это связано с разным генезисом донных отложений: в первом случае превалирует доля продуктов выветривания горных пород, во втором – остатков растений, микроорганизмов и т.д. Так, для озер Ик, Крутинское и Нагорного пруда в донных отложениях отмечено большее содержание органической составляющей (табл.3), по сравнению с оз. Безымянное.

Для установления степени и характера загрязнения донных отложений был использован коэффициент донной аккумуляции, который рассчитывался по формуле согласно Р 52.24.763-2012:

$$КДА = \frac{C_{до}}{C_{вода}}, \quad (1)$$

где  $C_{до}$  – концентрация поллютантов в донных отложениях, мкг/г сухого остатка;  $C_{вода}$  – концентрация поллютантов в воде соответственно в тот же период времени, мг/дм<sup>3</sup>.

Коэффициенты донной аккумуляции, рассчитанные для исследуемых водных объектов, представлены на рис.3 в графической форме. На величину КДА будут влиять следующие факторы: природа поллютанта и его растворимость в воде, удельный вес, специфика протекающих процессов сорбции – десорбции в системе «вода – донные отложения», геоморфологические особенности водного объекта [26, 27].

Как видно из рис.3, наиболее низким уровнем хронического загрязнения из изученных водоемов характеризуется оз. Ик, для которого рассчитанные значения КДА не превышают  $n = 1-10$  для всех рассмотренных металлов, кроме Mn. Принимая во внимание низкие концентрации поллютантов в воде рассматриваемого озера, можно оценить обстановку в водном объекте как удовлетворительную.

По результатам спорово-пыльцевого анализа и анализа непыльцевых палиноморф для оз. Ик также установлены наиболее благоприятные условия. Соответствие состава палиноспектров зональному типу растительности свидетельствует о минимальном изменении растительного покрова в результате антропогенного воздействия. Распространение двух видов *Pediastrum* свидетельствуют о его олиготрофном состоянии, а видов *Plantago* и *Cerealia Plantago*, связанных с деятельностью человека по берегам озера, – о возрастающей антропогенной нагрузке.

О значительном антропогенном воздействии, оказываемом на оз. Колыванское, свидетельствуют значения КДА по Ni, Zn и Ba, лежащие в пределах  $10-10^2n$ . Повышенные концентрации Fe ( $K_{ПДКр.х} = 3$ ), Mn (9), Al (3) и Cu (15) в воде указывают на поступление в водный объект свежего загрязнения. Три выделенных вида водорослей *Pediastrum* в небольшом, по сравнению с оз. Ик, количестве свидетельствуют о ранее благоприятном, а в настоящее время ухудшающемся состоянии водного объекта.

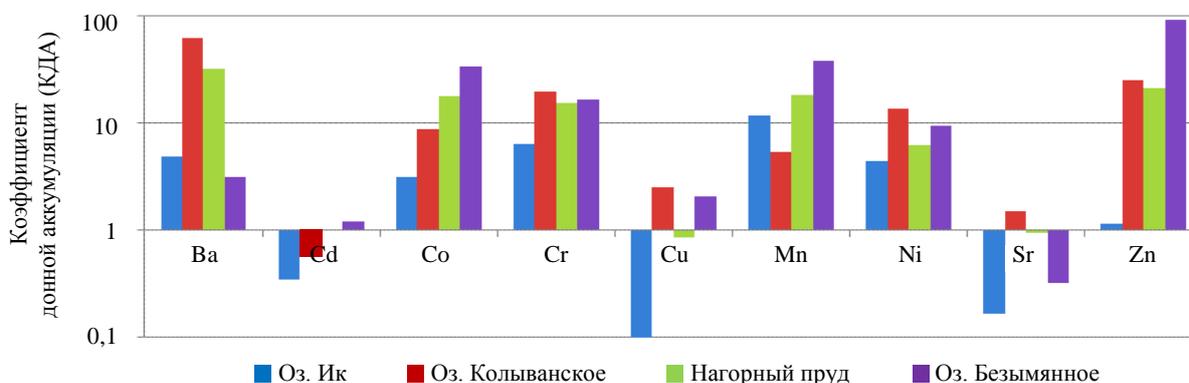


Рис.3. Коэффициенты донной аккумуляции, рассчитанные для исследуемых водных объектов



В Нагорном пруду и оз. Безымянное наблюдаются высокие значения КДА для Cr, Zn, Co и Mn, что связано с близким расположением месторождений полиметаллических руд. По показателю КДА эти водные объекты характеризуются как слабозагрязненные. Высокое содержание микрочастиц углей, обнаруженное в этих водных объектах, свидетельствует о произошедших в окружающих ландшафтах пожарах. По данным спорово-пыльцевого анализа и анализа непыльцевых палиноморф наиболее неблагоприятные условия развития озера и окружающих ландшафтов получены для оз. Безымянное. Несоответствие палиноспектров современной растительности и высокое содержание спор грибов в донных отложениях оз. Безымянное свидетельствует о техногенном воздействии на растительный покров. Панцирные амебы, обнаруженные в Нагорном пруду, указывают на периодическое обводнение территории, что вероятно связано с нарушением уровня грунтовых вод в результате ведущейся в окрестностях антропогенной деятельности, и с течением времени может привести к заболачиванию.

Одиночных оценок, таких как КДА, как правило, недостаточно для получения достоверной общей картины уровня загрязнения донных отложений, поэтому широко применяется интегральный критерий – суммарный показатель загрязнения  $Z_c$  [33]. Его расчет производился по всем анализируемым тяжелым металлам для всех исследуемых водных объектов, кроме оз. Белое, для которого донные отложения не анализировались:

$$Z_c = \sum_{i=1}^n K_i (n-1), \quad (2)$$

где  $n$  – количество учитываемых металлов;  $K$  – коэффициент контрастности.

Коэффициенты контрастности для каждого металла вычислялись как отношение его концентрации на исследуемом участке к соответствующей фоновой концентрации, причем в качестве фоновых концентраций были приняты значения ПДК (ОДК) для почв (см. табл.2).

Коэффициенты суммарного загрязнения  $Z_c$  валовыми и подвижными формами металлов, рассчитанные для донных отложений исследуемых водных объектов, представлены на рис.4.

На основании методики Ю.Е.Саета<sup>4</sup> рассчитанные значения коэффициентов суммарного загрязнения для подвижных и валовых форм (рис.4) и соотношения между ними позволяют оценить уровень загрязнения Нагорного пруда и оз. Безымянное как высокий, оз. Колыванское – средний, оз. Ик – низкий. Для Нагорного пруда и оз. Безымянное отмечены суммарные показатели загрязнения подвижными формами металлов, значительно превышающие суммарные показатели загрязнения валовыми формами, что характеризует донные отложения рассматриваемых водных объектов как опасный источник вторичного загрязнения и обуславливает их высокую опасность для гидробионтов.

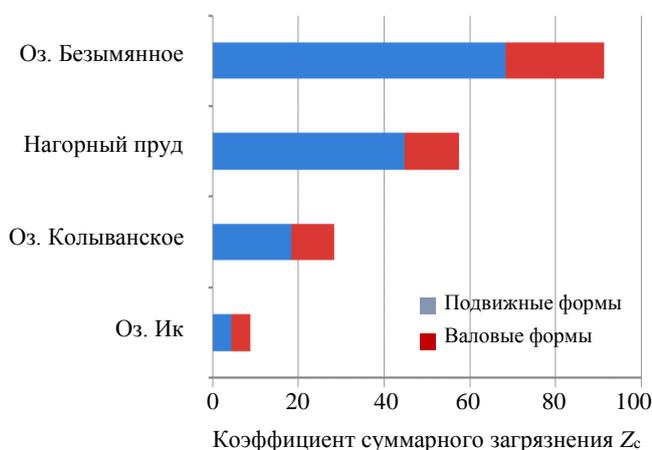


Рис.4. Значения суммарного показателя загрязнения донных отложений изученных озер валовыми и подвижными формами металлов

## Заключение

Проведенные геохимические исследования воды и донных отложений позволили оценить экологическое состояние водных объектов на юго-западе Сибири и Алтая и в восточной части Казахстана. Нагорный пруд и оз. Безымянное были отнесены к водоемам с высоким уровнем загрязнения, вызванным продолжительной техногенной нагрузкой от расположенных вблизи действующих или отработанных подземных и открытых горных выработок. Данные спорово-пыльцевого анализа и анализа непыльцевых палиноморф подтверждают эти результаты. Отмечены максимальные значения количества рудеральных трав, спор грибов и микрочастиц углей. Средним уровнем загрязнения охарактеризованы

<sup>4</sup> Саега Ю.Е. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 333 с.



озера Кольванское и Белое. Важно также отметить, что в донных отложениях оз. Кольванское были зафиксированы высокие значения показателей суммарного загрязнения подвижными формами тяжелых металлов относительно их валовых форм, что свидетельствует о низкой самоочищающейся способности водоема. С учетом быстрого темпа роста рекреационной нагрузки можно прогнозировать резкое ухудшение экологического состояния озера. Наиболее благоприятное экологическое состояние из всех изученных озер имеет оз. Ик. По результатам палинологического анализа здесь было отмечено самое высокое содержание водорослей *Pediastrum*, что позволяет сделать вывод о высокой самоочищающейся способности озера и о низкой антропогенной нагрузке.

Проведенные исследования свидетельствуют о возможности применения нового метода экспресс-оценки экологического состояния водных экосистем по изучению озер с помощью спорово-пыльцевого и геохимического анализов верхнего слоя донных отложений озер. Если геохимические показатели воды дают информацию об экологическом состоянии самих водоемов, результаты спорово-пыльцевого анализа и анализа непыльцевых палиноморф донных отложений озер, а также геохимический анализ озерных отложений показывают влияние антропогенного воздействия в более широком аспекте (озеро и его водосбор). Совместное использование методов позволяет давать оценку не только качества воды в озерах, но и озерных экосистем в целом а также проводить ретроспективный анализ источников воздействия. Глубокое исследование причин загрязнений и прогнозирования возможных последствий этот метод не предполагает, однако с его помощью можно получить быструю оценку для дальнейших масштабных исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тусупбеков Ж.А., Ряполова Н.Л. Оценка экологической устойчивости поверхностных вод Западной Сибири // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2019. № 3. С. 55-60. DOI: [10.17308/geo.2019.3/2324](https://doi.org/10.17308/geo.2019.3/2324)
2. Sabatier P., Moernaut J., Bertrand S. et al. A Review of Event Deposits in Lake Sediments // Quaternary. 2022. Vol. 5. Iss. 3. № 34. DOI: [10.3390/quat5030034](https://doi.org/10.3390/quat5030034)
3. Волкодаева М.В., Киселев А.В. О развитии системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха // Записки Горного института. 2017. Т. 227. С. 589-596. DOI: [10.25515/PMI.2017.5.589](https://doi.org/10.25515/PMI.2017.5.589)
4. Даувальтер В.А., Денисов Д.Б., Дину М.И., Слуковский З.И. Биогеохимические особенности функционирования малых арктических озер Хибинского горного массива в условиях изменения климата и окружающей среды // Геохимия. 2022. Т. 67. № 6. С. 559-575. DOI: [10.31857/S0016752522050053](https://doi.org/10.31857/S0016752522050053)
5. Slukovskii Z.I., Guzeva A.V., Dauvalter V.A. Rare earth elements in surface lake sediments of Russian arctic: Natural and potential anthropogenic impact to their accumulation // Applied Geochemistry. 2022. Vol. 142. № 105325. DOI: [10.1016/j.apgeochem.2022.105325](https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105325)
6. Sapelko T.V. Paleolimnological research: new possibilities and possible mistakes // Paleolimnology of Northern Eurasia: experience, methodology, current status and young scientists school in microscopy skills in paleolimnology, 1-4 October 2018, Kazan, Russia. Proceedings of the 3rd International Conference, 2018. P. 104-105.
7. Lukanina E., Blyakharchuk T. A comparison of spore-pollen spectra of forest, forest-steppe and steppe of Western Siberia // 12th International Meeting Pollen Monitoring Programme. Abstract book, 20-23 August 2019, Riga, Latvia, 2019. P. 21-24.
8. Поползин А.Г. Озера юга Обь-Иртышского бассейна. Новосибирск: Западно-Сибирское книжное изд-во, 1967. 350 с.
9. Страховенко В.Д., Кабанник В.Г., Маликова И.Н. Геохимические особенности экосистемы озера Кольванское (Алтайский край) и влияние на нее техногенного воздействия // Литология и полезные ископаемые. 2014. № 3. С. 220-234. DOI: [10.7868/S0024497X14030069](https://doi.org/10.7868/S0024497X14030069)
10. Позняков А.А. К истории Кольванского озера // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2015. Т. 38. № 3. С. 93-98.
11. Коротаева А.Е., Пашкевич М.А. Применение данных спектральной съемки для экологического мониторинга водной растительности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 5-2. P. 231-244. DOI: [10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_52\\_0\\_231](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_52_0_231)
12. Iakovleva E., Belova M., Popov A. Mining and Environmental Monitoring at Open-Pit Mineral Deposits // Journal of Ecological Engineering. 2019. Vol. 20. Iss. 5. P. 172-178. DOI: [10.12911/22998993/105438](https://doi.org/10.12911/22998993/105438)
13. Ponomarenko M.R., Kutepov Y.I. Complexity Assessment to Substantiate Deformation Monitoring at Open Pit Mines // Journal of Mining Science. 2021. Vol. 57. Iss. 6. P. 986-994. DOI: [10.1134/S1062739121060119](https://doi.org/10.1134/S1062739121060119)
14. Ягначкова Н.И. Памятники природы Горной Кольвани // Этим гордится Алтайский край: по материалам творческого конкурса. Барнаул: Азбука, 2008. С. 24-26
15. Кузменкин Д.В., Иванова Е.С. Количественная характеристика макрозообентоса литорали Кольванского и Белого озер (Северо-Западный Алтай) по исследованиям 2019 г. // Труды Тигирекского заповедника. 2020. Вып. 12. С. 100-104. DOI: [10.53005/20767390\\_2020\\_12\\_100](https://doi.org/10.53005/20767390_2020_12_100)



16. *Suiekpayev Y.S., Sapargaliyev Y.M., Dolgopolova A.V. et al.* Mineralogy, geochemistry and U-Pb zircon age of the Karaotkel Ti-Zr placer deposit, Eastern Kazakhstan and its genetic link to the Karaotkel-Preobrazhenka intrusion // *Ore Geology Reviews*. 2021. Vol. 131. № 104015. DOI: [10.1016/j.oregeorev.2021.104015](https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104015)
17. *Nigmatova S.A., Bayshashov B.U., Pirogova T.E. et al.* Geology, stratigraphy and palaeontology of the Eocene Shynzhyly locality (Eastern Kazakhstan) and comparison with the continental Eocene of Italy // *Gortania. Geologia, Paleontologia, Paleontologia*. 2020. Vol. 42. P. 37-53.
18. *Pashkevich M.A., Danilov A.S., Matveeva V.A.* Remote sensing of chemical anomalies in the atmosphere in influence zone of Korkino open pit coal mine // *Eurasian Mining*. 2021. № 1. P. 79-83. DOI: [10.17580/em.2021.01.16](https://doi.org/10.17580/em.2021.01.16)
19. *Шелехова Т.С., Лаврова Н.Б.* Палеографические реконструкции развития территории северо-западной Карелии в голоцене (по данным изучения донных отложений малых озер) // *Труды Карельского научного центра Российской академии наук*. 2020. № 9. С. 101-122. DOI: [10.17076/lim1268](https://doi.org/10.17076/lim1268)
20. *Сапелко Т.В., Цыганов А.Н., Мазей Ю.А. и др.* Новые подходы комплексных палеолимнологических исследований голоценовой истории озер // *Труды Палеонтологического общества*. 2018. Т. 1. С. 118-124.
21. *Бляхарчук Т.А., Митрофанова Е.Ю., Эйрих А.Н.* Комплексные палеоэкологические исследования донных отложений озера Манжерокское в предгорьях Алтая // *Труды Карельского научного центра Российской академии наук*. 2015. № 9. С. 81-99. DOI: [10.17076/lim166](https://doi.org/10.17076/lim166)
22. *Сарапулова Г.И.* Геохимический подход в оценке воздействия техногенных объектов на почвы // *Записки Горного института*. 2020. Т. 243. С. 388-395. DOI: [10.31897/PMI.2020.3.388](https://doi.org/10.31897/PMI.2020.3.388)
23. *Саламов А.М., Мамедов В.А., Халилова Х.Х.* Исследование влияния антропогенных факторов на изменение геоэкологического состояния оз. Ходжагасан Азербайджана // *Записки Горного института*. 2019. Т. 239. С. 603-610. DOI: [10.31897/PMI.2019.5.603](https://doi.org/10.31897/PMI.2019.5.603)
24. *Бородина Е.В., Бородина У.О.* Формирование химического состава озерных вод особо охраняемых территорий горного Алтая на примере бассейна р. Мульты // *Водные ресурсы*. 2019. Т. 46. № 4. С. 405-416. DOI: [10.31857/S0321-0596464405-416](https://doi.org/10.31857/S0321-0596464405-416)
25. *Кремлева Т.А., Моисеенко Т.И., Хорошавин В.Ю., Шавнин А.А.* Геохимические особенности природных вод Западной Сибири: микроэлементный состав // *Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование*. 2012. № 12. С. 80-89.
26. *Валиев В.С., Шамаев Д.Е., Хасанов Р.Р., Маланин В.В.* Подвижность тяжелых металлов в донных отложениях и особенности интерпретации ее изменчивости // *Российский журнал прикладной экологии*. 2022. № 2. С. 61-67. DOI: [10.24852/2411-7374.2022.2.61.67](https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.2.61.67)
27. *Мазур В.В., Доровских Г.Н.* Аккумуляция металлов донными отложениями // *Вестник Сыктывкарского университета. Серия 2: Биология. Геология. Химия. Экология*. 2013. № 3. С. 159-177.
28. *Легостаева Я.Б., Гололобова А.Г.* Донные отложения как индикатор геоэкологического состояния природных водотоков // *Экология и промышленность России*. 2022. Т. 26. № 11. С. 66-71. DOI: [10.18412/1816-0395-2022-11-66-71](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-11-66-71)
29. *Пашкевич М.А., Бек Дж., Матвеева В.А., Алексеенко А.В.* Биогеохимическая оценка состояния почвенно-растительного покрова в промышленных, селитебных и рекреационных зонах Санкт-Петербурга // *Записки Горного института*. 2020. Т. 241. С. 125-131. DOI: [10.31897/PMI.2020.1.125](https://doi.org/10.31897/PMI.2020.1.125)
30. *Kharko P.A., Matveeva V.A.* Bottom sediments in a river under acid and alkaline wastewater discharge // *Ecological Engineering and Environmental Technology*. 2021. Vol. 22. Iss. 3. P. 35-41. DOI: [10.12912/27197050/134870](https://doi.org/10.12912/27197050/134870)
31. *Пишайнен В.Ю., Михалков А.В., Баринкова А.А.* Современный взгляд на решение проблем экологии Уральского алюминиевого завода // *Цветные металлы*. 2022. № 7. С. 39-45. DOI: [10.17580/tsm.2022.07.04](https://doi.org/10.17580/tsm.2022.07.04)
32. *Пашкевич М.А., Быкова М.В.* Методология термодесорбционной очистки локальных загрязнений почв от нефтепродуктов на объектах минерально-сырьевого комплекса // *Записки Горного института*. 2022. Т. 253. С. 49-60. DOI: [10.31897/PMI.2022.6](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.6)
33. *Валиев В.С., Иванов Д.В., Шагидуллин Р.Р.* Метод комплексной оценки загрязненности донных отложений // *Труды Карельского научного центра Российской академии наук*. 2019. № 9. С. 51-59. DOI: [10.17076/lim1122](https://doi.org/10.17076/lim1122)

**Авторы:** М.А. Чукаева, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, [chukaeva.mariia@gmail.com](mailto:chukaeva.mariia@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-3643-6757> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), Т.В. Сапелко, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-0933-7091> (Институт озероведения РАН – Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.