



Серия «Науки о Земле»
2024. Т. 49. С. 118–129
Онлайн-доступ к журналу:
<http://izvestiageo.isu.ru>

ИЗВЕСТИЯ
Иркутского
государственного
университета

Научная статья

УДК 551.3+550.4.08

<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.49.118>

Оценка загрязнения отложений аккумулятивных берегов бара Ярки (северная часть озера Байкал)

В. А. Пеллинен*

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

А. И. Ковалевская

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрено современное эколого-геохимическое состояние отложений аккумулятивных берегов бара Ярки северной части оз. Байкал. На ключевых участках были взяты образцы отложений. В задачи исследования включены определение химического состава отложений островного бара Ярки с использованием метода рентгенофлуоресцентного анализа и оценка их загрязнения. Установлено, что в рассматриваемой береговой зоне бара Ярки отложения загрязнены такими тяжелыми металлами, как стронций, свинец, а в некоторых местах – мышьяк, имеющими вероятно антропогенный источник их поступления в отложения бара. Распределение химических элементов вдоль бара Ярки неравномерное. Зависимости между значениями показателей и расположением точек по отношению к протокам не наблюдается, что свидетельствует о минимальном влиянии протоков на состояние отложений бара Ярки. Вероятно, что повышенные содержания химических элементов в некоторых точках отбора образцов отложений связаны с расположением в данных районах рекреационных зон.

Ключевые слова: аккумулятивные процессы, химический состав отложений, тяжелые металлы, оценка загрязнения, Байкал, бар Ярки.

Благодарности. Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»). Авторы также выражают благодарность сотрудникам ИЗК СО РАН канд. геогр.-минерал. наук Т. Ю. Черкашиной, Ю. С. Тарасовой, А. А. Юрьеву за помощь в выполнении экспедиционных и лабораторных работ. В работе задействовались оборудование ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН.

Для цитирования: Пеллинен В. А., Ковалевская А. И. Оценка загрязнения отложений аккумулятивных берегов бара Ярки (северная часть озера Байкал) // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2024. Т. 49. С. 118–129. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.49.118>

Assessment of Pollution of Sediments of Accumulative Shores of the Yarki Island (the Northern Part of Lake Baikal)

V. A. Pellinen*

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

A. I. Kovalevskaia

M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Abstract. The article presents the current ecological and geochemical condition of sediments of accumulative shores of the Yarki Island in the northern part of Lake Baikal. Sediment samples were taken at key points. The tasks of this work also included the determination of the chemical composition of the deposits of the Yarki Island with using the XRF method and the assessment of their pollution. It has been established that in the considered coastal zone of the Yarki bar, the sediments are contaminated with heavy metals such as strontium, lead, and in some places arsenic, which probably have an anthropogenic source of their entry into the bar's sediments. It indicates the possibility of smaller particles to sorb some elements. The distribution of chemical elements along the Yarki Island is uneven. There is no dependence between the indicator values and the location of the points in relation to the channels. It indicates a minimal effect of the channels on the condition of the sediments of the Yarki Island. Probably the increased content of chemical elements in some sediment sampling points is associated with the location of recreational zones in these areas.

Keywords: accumulative processes, chemical composition of sediments, heavy metals, assessment of pollution, Lake Baikal, Island Yarki.

For citation: Pellinen V.A., Kovalevskaia A.I. Assessment of Pollution of Sediments of Accumulative Shores of the Yarki Island (the Northern Part of Lake Baikal). *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2024, vol. 49, pp. 118-129. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.49.118> (in Russian)

Введение

Исследование техногенного загрязнения окружающей среды является одним из основных направлений эколого-геохимических работ. Практически любой вид техногенеза связан с поступлением в геологическую среду разнообразных отходов, меняющих ее химические характеристики. Это проявляется на различных уровнях – от локального до глобального – и представляет опасность для живых организмов, включая человека.

Оценка устойчивости окружающей среды к техногенному загрязнению является актуальной, поскольку отражает степень влияния человека на окружающую среду, а изучение химического состава природных сред, таких как почвы, донные и береговые отложения, растения, подземные и поверхностные воды, имеет большое значение в разработке программ оптимизации природопользования.

Особое внимание ученых всего мира привлекают аккумулятивные побережья морей, которые наиболее чувствительны к техногенному влиянию [Carter, Woodroffe, 1997]. При этом берега внутриконтинентальных водоемов стоят на втором месте относительно интереса к их изучению. На территории России довольно большое количество уникальных водных объектов, исследования которых продолжаются более 100 лет. В данной работе в качестве

объекта выбран бар Ярки, являющийся одним из ключевых участков и представительным примером аккумулятивного берега оз. Байкал с довольно продолжительной историей изучения [Динамика берегов ... , 1976; Лут, 1964; Петров, Ярославцев, 2007; Потёмкина, 2012; Техногенез и переработка ... , 2008]. Так, Т. Г. Потёмкина, Н. А. Ярославцев, В. А. Петров рассматривали современные потоки наносов островного бара Ярки. Проведенные исследования свидетельствуют о волновом переносе наносов, направленном преимущественно с востока на запад, от устья р. Верхней Ангары. Авторы пришли к выводу, что наносы у бара Ярки, а также его размыв, связанный с поднятием уровня воды в результате строительства Иркутской ГЭС, – важные факторы, объясняющие эволюцию объекта [Потёмкина, Ярославцев, Петров, 2008]. Изучению также посвящены труды А. Л. Хомчановского. Он привел оценку особенностей развития гидродинамических, морфодинамических и литодинамических процессов в береговой зоне Ярки и путем математического моделирования проанализировал влияние литодинамического переноса материала на морфологию острова [Хомчановский, 2021].

Бар Ярки представляет собой природную аккумулятивную форму, наиболее чувствительную к антропогенному воздействию. Береговая зона активно осваивается человеком, поэтому оценка загрязнения является актуальной. Распределение химических элементов в отложениях зависит от ряда факторов: морфодинамических процессов, размера частиц отложений и расположения рекреационных зон.

Основной целью проведения научных работ является эколого-геохимическая оценка аккумулятивных отложений береговой зоны островного бара Ярки. Для реализации выполнено маршрутное обследование поверхности района с отбором образцов отложений для определения химических элементов в отложениях. В качестве индикаторов использовали микроэлементы, относящиеся к I–III классам опасности: мышьяк (As), свинец (Pb), цинк (Zn) (высоко опасные), кобальт (Co), никель (Ni), медь (Cu), хром (Cr), (умеренно опасные), ванадий (V) и стронций (Sr) (малоопасные). На основе полученных данных о содержании этих элементов выполнен расчет эколого-геохимических коэффициентов и индексов.

Объект исследования

Людей с древних времен привлекало освоение этой территории, однако сложные природные условия, особенно климат, не позволили развиться мощной инфраструктуре, способной повлиять на природные процессы, происходящие в береговой зоне. Точкой начала такого влияния стало создание на р. Ангаре каскада ГЭС. Изменения, вызванные подъемом и искусственным регулированием уровня воды в озере, активизировали многочисленные геологические и геохимические процессы, что послужило триггером к большому количеству исследований береговой зоны, особенно аккумулятивных ее частей. Подъем уровня способствовал перестройке течений, активному размыву берегов, особенно территорий, на которых велась хозяйственная деятельность человека.

Бар Ярки географически располагается в северной части озера и представляет собой песчаную островную форму берегового рельефа, состоящую из Нижнеангарской косы и острова Ярки, расположенного между устьями рек Кичеры и Верхней Ангары (рис. 1). Устья этих рек имеют различную форму: Кичера образует однорукавную дельту с заблокированным устьем в отличие от Верхней Ангары, которая впадает в оз. Байкал двумя рукавами (Верхняя Ангара и протока Власиха), между которыми расположен о. Миллионный. К устьям Кичеры и Верхней Ангары примыкают косы: на западе, в районе пос. Нижнеангарск – Нижнеангарская коса, на востоке – местность Дагары. Общая протяженность о. Ярки на сегодня составляет около 26,3 км. Ширина его в районе устья р. Кичера достигала 168 м. В своей корневой части Нижнеангарская коса сложена галькой, крупность которой постепенно уменьшается и в 1,5 км от основания переходит в гравий, а ее дистальный конец сложен средне- и мелкозернистым песком.

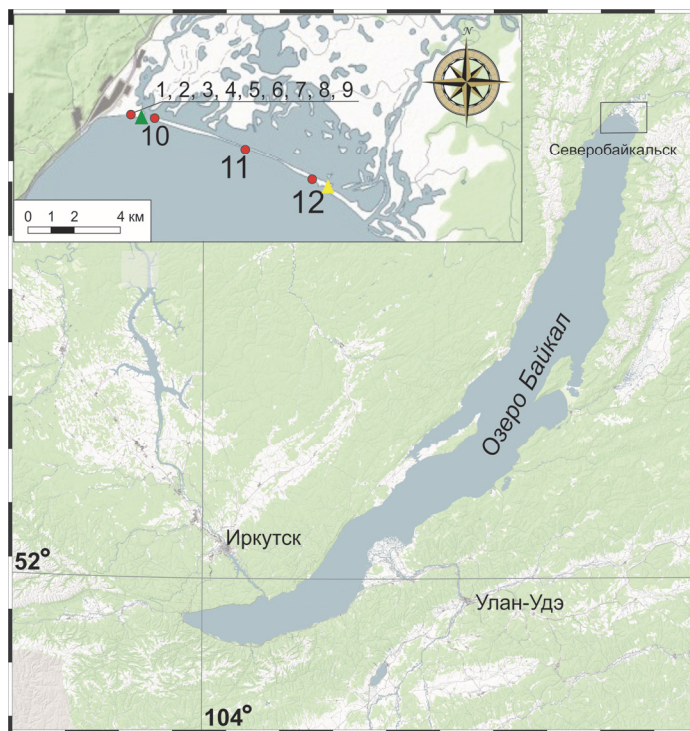


Рис. 1. Обзорная карта и район проведения работ в северной части оз. Байкал (зеленый треугольник – устье р. Кичеры, желтый треугольник – протока Власиха, красные точки – места отбора образцов)

Методы исследования

В ходе выполнения работ проведено опробование аккумулятивных отложений с дистальной части Нижнеангарской косы, характеризующейся высокой антропогенной нагрузкой, и острова Ярки с умеренной антропогенной

нагрузкой, связанной в первую очередь с рекреационным использованием этой территории. Для получения достаточного количества данных был выполнен отбор проб с 12 точек, где 1–9 – это точки отбора с Нижнеангарской косы, по которой проложена автодорога, 10–12 – с о. Ярки (см. рис. 1). Отбор проводился методом конверта: точки были равноудалены друг от друга (от устья р. Кичера через 100 м на материке и через 4,5 км на острове).

Собранные пробы высушивались на свежем воздухе при комнатной температуре в течение 72 ч, после чего помещались в печь, разогретую до 110 °С, до достижения состояния постоянного веса. Затем образцы почвы подвергались тщательному измельчению, их растирали в агатовой ступке и просеивали перед проведением анализа. Лазерный анализатор размера частиц Analysette 22 NanoТес (FRITSCH, Германия) подтвердил, что размер частиц истертого исследуемого образца составляет менее 63 мкм и приемлем для рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) [Improvement of suspension-assisted..., 2022].

Рентгенофлуоресцентный анализ. Для определения содержания V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Pb, As использовали метод РФА. Это экспрессный высокочувствительный неdestructивный способ, широко применяемый в геохимии и геологии для определения элементного состава вещества в широком диапазоне концентраций [Рентгенофлуоресцентное определение ... , 2015; Черкашина, Летникова, 2012]. Измерение образцов отложений выполнено при помощи современного рентгенофлуоресцентного волнодисперсионного спектрометра S8 TIGER (Bruker AXS, Германия) на базе Центра коллективного пользования (ЦКП) «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН (г. Иркутск). Технические параметры прибора, условия и параметры определения некоторых элементов изложены в [Рентгенофлуоресцентное определение ... , 2015]. Расчет концентраций изученных элементов проводили с применением программного обеспечения SPECTRA^{plus1}.

Приготовление проб к РФА выполняли двумя способами: для определения содержания Sr и Pb высушенный материал массой 5 г смешивали со связующим веществом (воск) в соотношении 5:1; для определения остальных компонентов брали навеску порошка пробы массой 1 г. Излучатели готовили путем прессования таблеток с подложкой из борной кислоты при помощи полуавтоматического пресса HERZOG НТР 40 (Германия) при усилии в 100 кН.

Обсуждение результатов исследования

Для оценки эколого-геохимического состояния береговых отложений в качестве индикаторов использовали микроэлементы, определенные методом РФА и представленные в таблице.

¹ SPECTRA^{plus}: Software Package for X-ray Spectrometers. Version 2.2.3.1. Karlsruhe, Bruker AXS GmbH Publ., 2010. 495 p.

Таблица

Содержание элементов в аккумулятивных отложениях бара Ярки, мг/кг

№ пробы	As	Pb	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Sr
1	2,5	24,3	57,6	38,1	6,3	12,5	11,1	33,9	692,4
2	4	22,7	64	43,7	6,7	13	11,4	31,8	708,2
3	5,1	22,1	58,4	39,7	6,5	12,4	10,3	30	695,1
4	5,9	23,1	55,1	42,6	6,2	12,3	10,6	27,7	602,3
5	4,1	22,3	62,8	44,6	7,5	14,1	11,6	28,5	673,6
6	2,4	21,4	75,1	56	9,6	17	12,1	32,8	652,4
7	0,3	17,1	141,4	102	15,8	32,4	15,8	45,8	714,5
8	2,4	23,3	62,6	44,2	7,1	13,5	10,8	27,2	651,7
9	3,7	19,8	88	65,2	10,3	20,1	13,3	33,5	685,1
10	0,3	25,5	31,2	18,6	6,1	5,9	8,3	32,7	914
11	0,3	29,3	16,7	12,2	2,6	4,4	7,6	17,2	951,7
12	4,1	31,6	25,2	20,3	3,4	5,9	8,7	19,5	971,6

Оценка загрязнения отложений проводилась с использованием коэффициента загрязнения (C_f^i) для каждого элемента [Heavy metal contamination ... , 2015; Hakanson, 1980]. Он был определен как отношение средних концентраций тяжелых металлов (C^i) в верхнем горизонте (глубина ~ 15 см) на всех точках относительно региональных фоновых значений (C_n^i):

$$C_f^i = C^i / C_n^i. \quad (1)$$

Коэффициент загрязнения (C_f^i) для каждого элемента [Hakanson, 1980] показывает уровень загрязнения металлом по отношению к фоновым концентрациям и подразделяется на четыре класса: $C_f^i < 1$ (низкий уровень загрязнения), $1 < C_f^i < 3$ (умеренный уровень загрязнения), $3 < C_f^i < 6$ (значительный уровень загрязнения), $6 < C_f^i$ (очень высокий уровень загрязнения).

Полученные средние значения C_f^i представлены следующим рядом: Sr (3,57) > Pb (2,35) > As (0,56) > V (0,54) > Cr (0,45) > Co (0,43) > Zn (0,33) > Ni (0,32) > Cu (0,24). Согласно [Hakanson, 1980], отметим, что для Sr значительное загрязнение отложений наблюдается во всех точках, для Pb в точке 11 – значительное загрязнение, во всех остальных точках – умеренное. Также выявлено умеренное загрязнение на материке другими металлами: в точке 4 – As, в точке 7 – V и Cr.

Для оценки общего уровня загрязнения территории рассчитан индекс нагрузки загрязнения (PLI) [Problems in..., 1980], который разделен также на четыре класса: $PLI < 1$ (отсутствие загрязнения), $1 < PLI < 2$ (умеренное загрязнение), $2 < PLI < 3$ (сильное загрязнение) и $PLI > 3$ (чрезвычайно сильное загрязнение). Этот индекс рассчитывается следующим образом:

$$PLI = (C_{f1}^i \times C_{f2}^i \times C_{f3}^i \times \dots \times C_{fn}^i)^{1/n}, \quad (2)$$

где C_{fi}^i – индекс загрязнения тяжелыми металлами, а n – количество видов, участвующих в оценке содержания тяжелых металлов.

Полученные значения PLI для проб Нижнеангарской косы (точки 1–9) выше, чем для островов (точки 10–12), однако находятся в диапазоне от 0,267 до 0,721, что указывает на отсутствие загрязнения изученной территории. Повышенные значения PLI в некоторых пробах, вероятно, связаны с расположением на участках пикниковых зон. Зависимости между значениями PLI и расположением точек опробования по отношению к протокам не наблюдается, что свидетельствует о минимальном влиянии протоков на химический состав отложений.

Метод расчета коэффициента обогащения (EF), основанный на [Simex, Helz, 1981], позволяет выявить уровень загрязнения отложений (почв, грунтов и т. д.) тяжелыми металлами, влияние возможных природных или антропогенных источников металлов на их концентрацию в почвах (воде, грунтах и т. д.) и возможные источники поступления металлов в окружающую среду. Для расчета используется формула:

$$EF = \frac{\left(\frac{C_{Metal}}{C_{Fe}} \right)_{Sample}}{\left(\frac{C_{Metal}}{C_{Fe}} \right)_{Background}}, \quad (3)$$

где $(C_{Metal}/C_{Fe})_{Sample}$ – это соотношение содержания металла и железа в пробе, а $(C_{Metal}/C_{Fe})_{Background}$ – это соотношение содержания металла и железа в региональном фоновом режиме, который был взят в [Геохимия окружающей среды ... , 2008]. Если значение $EF > 1,5$ [Zhang, Liu, 2002], то это указывает на возможные антропогенные источники поступления металла.

Рассчитанные согласно [Heavy metal concentrations ... , 1991] средние значения EF представлены следующим рядом: **Sr (6,06) > Pb (4,02) > As (0,87) > V (0,71) > Cr (0,590) > Co (0,585) > Zn (0,49) > Ni (0,42) > Cu (0,36)**. Высокие значения EF были получены для Sr и Pb, что указывает на возможное антропогенное происхождение источника этих элементов. Все остальные исследуемые элементы, вероятно, имеют природные источники происхождения, например, связанные с горными породами и отложениями, слагающими эту территорию. Отметим, что согласно классификации [Sutherland, 2000] и полученным нами значениям коэффициента EF для Sr, отложения, отобранные в точках 10–12, были классифицированы как значительно загрязненные (обогащенные) стронцием, а в точках 1–9 – как умеренно обогащенные. Для Pb отложения в точках 11 и 12 были классифицированы как значительно загрязненные (обогащенные) этим металлом, а на материке и в точке 9 – как умеренно обогащенные. Кроме того, значения EF для As в точках 3, 4 и 12 также указывают на возможное антропогенное происхождение источника мышьяка, причем в точке 12 значение EF позволяет рассматривать отложения как умеренно обогащенные. Результаты исследований представлены на рис. 2.



Рис. 2. Значения EF , красная область – это значение $EF > 1,5$ [Zhang, Liu, 2002], указывающее на возможные антропогенные источники поступления металла

Индекс геоаккумуляции (I_{geo}) [Muller, 1969; Heavy metal concentrations ... , 1991] применен для оценки интенсивности загрязнения тяжелыми металлами почв и отложений путем сравнения средних значений содержаний элементов в земной коре в настоящее время с доиндустриальными уровнями. Этот индекс также учитывает флуктуации природного содержания веществ в окружающей среде и отражает небольшие антропогенные влияния. Выделено семь классов [Spatial distribution ... , 2009]: $I_{geo} \leq 0$ (незагрязненные), $0 < I_{geo} < 1$ (от незагрязненных до умеренно загрязненных), $1 < I_{geo} < 2$ (умеренно загрязненные), $2 < I_{geo} < 3$ (от умеренно загрязненных до сильно загрязненных), $3 < I_{geo} < 4$ (сильно загрязненные), $4 < I_{geo} < 5$ (от сильно загрязненных до чрезвычайно загрязненных), $I_{geo} > 5$ (чрезвычайно загрязненные). Для расчета используется формула:

$$I_{geo} = \log_2(C_n / 1,5B_n), \quad (4)$$

где C_n – измеренная концентрация элемента n в образце отложений, B_n – региональное фоновое значение элемента n в исследуемом районе [Геохимия окружающей среды ... , 2008], а константа 1,5 позволяет анализировать естественные колебания содержания вещества в окружающей среде и выявлять незначительные антропогенные воздействия.

Средние значения I_{geo} представлены следующим рядом: Sr (1,23) > Pb (0,63) > V (-1,67) > Co (-1,94) > Cr (-1,95) > As (-2,00) > Zn (-2,23) > Ni (-2,44) > Cu (-2,68), причем высокие значения I_{geo} , полученные для Sr, указывают на умеренное загрязнение отложений этим металлом. В точке 12 отмечается умеренное загрязнение отложений Pb. Это также может указывать на антропогенное происхождение источников этих металлов, поскольку данные элементы имеют низкие значения концентрации регионального фона в коренных породах данной территории [Геохимия окружающей среды ... , 2008]. Для остальных металлов значения I_{geo} отрицательные (рис. 3).

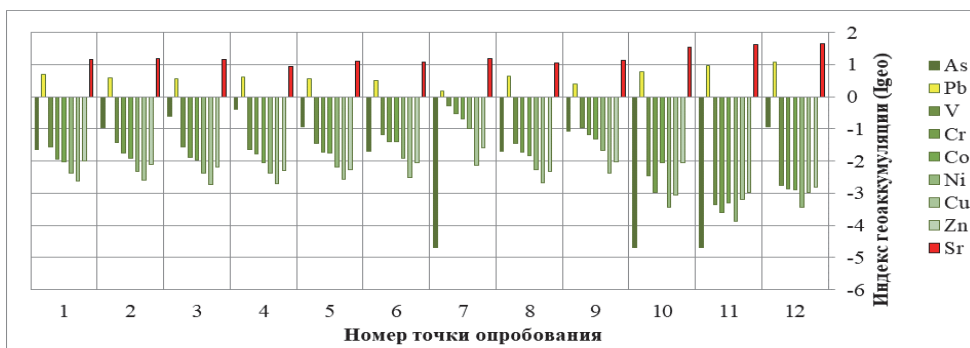


Рис. 3. Значения индекса геоаккумуляции: $I_{geo} \leq 0$ (зеленые) указывают на отсутствие загрязнения; $1 < I_{geo} < 2$ указывают на умеренно загрязненные (желтый и зеленый)

Выводы

Геохимический анализ состава аккумулятивных отложений северной части оз. Байкал показал умеренный и значительный уровни загрязнения отложений стронцием и свинцом, на некоторых участках – мышьяком, имеющими антропогенный источник поступления. Выявленное в пробах повышенное содержание кобальта, ванадия и хрома свидетельствует о способности более мелких частиц сорбировать эти элементы. Распределение химических элементов вдоль аккумулятивных форм имеет неравномерный характер. Повышение содержания химических элементов в точках, расположенных на Нижнеангарской косе, связано с рекреационной зоной активного отдыха местных жителей. Повышение содержания этих элементов на острове, скорее всего, связано с береговым течением вод Байкала с востока на запад [Петров, Ярославцев, 2007], которые приносят различные взвешенные вещества в береговую зону аккумулятивного острова Ярки. Таким источником с большой долей вероятности является судоходная трасса, расположенная в 300–500 м от островной части бара Ярки, идущая из Северобайкальска на восточный берег, где расположен круглогодичный курорт термальных вод «Хакусы» и зимняя дорога, проходящая по урезу островной части, идущая из Нижнеангарска.

Источниками повышенного содержания хрома, свинца могут быть электронные приборы, гальванические элементы, а мышьяка – пиротехника, для изготовления которой добавляются элементы, придающие фейерверку определенный цвет и зрелищность.

Дополнительно существует вероятность, что поступление свинца происходит гораздо активнее, поскольку современные быстроходные катера сжигают большие объемы дизельного топлива с добавкой тетраэтилсвинца, необходимого для увеличения октанового числа.

На повышение содержания стронция, вероятно, оказывает влияние аккумуляция продуктов горения каменного угля (печное отопление и котельные) из населенных пунктов Северобайкальска и Нижнеангарска. По данным ресурса Weather Spark это связано с преобладающими ветрами западного направления в холодное время года (с 23 сентября по 27 апреля), при этом

максимальная повторяемость составляет 31 % и приходится на 1 января – пик отопительного сезона².

Не стоит исключать поступления химических элементов и соединений от близко расположенного аэропорта и Байкало-Амурской магистрали к объекту исследования, однако установление этого влияния требует отдельного исследования.

Зависимости между значениями показателей содержания химических элементов и расположением точек по отношению к протокам не наблюдается, что свидетельствует о минимальном влиянии протоков на химический состав отложений аккумулятивных форм.

Данная работа является частью большого исследования по эколого-геохимической оценке Байкальской природной территории. Применение приведенных в статье коэффициентов и показателей дополняет используемые в России оценочные коэффициенты. Успешная апробация данных коэффициентов была выполнена на других береговых территориях Байкала.

Список литературы

- Геохимия окружающей среды Прибайкалья (Байкальский геоэкологический полигон) / В. И. Гребенщикова, Э. Е. Лустенберг, Н. А. Китаев, И. С. Ломоносов. Новосибирск : ГЕО, 2008. 234 с.
- Динамика берегов оз. Байкал при новом уровненом режиме / А. В. Пинегин, А. А. Рогозин, Ф. Н. Лещиков [и др.]. М. : Наука, 1976. 88 с.
- Лут Б. Ф. Геоморфология дна Байкала // Геоморфология дна Байкала и его берегов. М. : Наука, 1964. С. 5–123.
- Петров В. А., Ярославцев Н. А. Динамика бара Ярки на северном Байкале и проблемы его восстановления // Проблемы управления и устойчивого развития прибрежной зоны моря : материалы конф. Краснодар, 2007. С. 149–151.
- Потемкина Т. Г. Гидролого-морфологические особенности устьевой области р. Верхняя Ангара // Водные ресурсы. 2012. Т. 39, вып. 4. С. 367–376.
- Потемкина Т. Г., Ярославцев Н. А., Петров В. А. Современные потоки наносов у острова Ярки (северный Байкал) // Успехи современного естествознания, 2008. № 8. С. 113–114.
- Рентгенофлуоресцентное определение примесных элементов в карбонатных породах и флюоритовых рудах с использованием спектрометра S8 Tiger / С. И. Штельмах [и др.] // Аналитика и контроль. 2015. Т. 19, № 2. С. 121–129. <https://doi.org/10.15826/analitika.2015.19.2.001>
- Техногенез и переработка берегов Северного Байкала / Ю. Б. Тржцинский, Е. А. Козырева, Т. Щипек [и др.] // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2008. № 2. С. 158–167.
- Хомчановский А. Л. Моделирование литодинамических процессов на аккумулятивных берегах: на примере оз. Байкал, островной бар Ярки : дис. ... канд. геогр. наук. Петропавловск-Камчатский, 2021. 191 с.
- Черкашина Т. Ю., Летникова Е. Ф. Применение аналитических методов для геохимических исследований фосфоритов севера Монголии // Вестник ИрГТУ. 2012. № 6. С. 59–65.
- Carter R. W. G., Woodroffe C. D. Coastal evolution: late quaternary shoreline morphodynamics. London : Cambridge University Press, 1997. 540 p.
- Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach // Water Res. 1980. Vol. 14. P. 975–1001.
- Heavy metal concentrations in surface sediments from the two coastal inlets (Golden Horn Estuary and Izmit Bay) of the northeastern Sea of Marmara / M. Ergin, C. Saydam, O. Basturk [et al.] // Chem. Geol. 1991. Vol. 91. P. 269–285.

² Weather Spark. URL: <https://ru.weatherspark.com> (date of access: 15.06.2024)

Heavy metal contamination and ecological risk assessment in the surface sediments of the coastal area surrounding the industrial complex of Gabes city, Gulf of Gabes, SE Tunisia / R. El Zrelli, P. Courjault-Rade [et al.] // *Mar. Pollut. Bull.* 2015. Vol. 101. P. 922–929.

Improvement of suspension-assisted total reflection X-ray fluorescence analysis of ores using wet grinding and empirical calibrations / G. V. Pashkova, A. N. Zhilicheva, V. M. Chubarov [et al.] // *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 2022. Vol. 198. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2022.106549>

Muller G. Index of geo-accumulation in sediments of the Rhine River // *Geojournal* 2. 1969. P. 108–118.

Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index / D. L. Tomlinson, J. G. Wilson, C. R. Harris [et al.] // *Helgol. Mar. Res.* 1980. Vol. 33. P. 566–575.

Simex S. A., Helz G. R. Regional geochemistry of trace elements in Cheapeake Bay // *Environ. Geol.* 1981. Vol. 3, N 6. P. 315–323.

Sutherland R. A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii // *Environ. Geol.* 2000. Vol. 39, N 6. P. 611–627.

Spatial distribution and contamination assessment of heavy metals in urban road dusts from Urungi NW China / B. Wei, F. Jiang, X. Li, S. Mu // *Microchem. J.* 2009. Vol. 93. P. 147–152.

Zhang J., Liu C. L. Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China – weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes // *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2002. Vol. 54. P. 1051–1070.

References

Grebenshnikova V.I., Lustenberg Je.E, Kitaev N.A., Lomonosov I.S. *Geohimija okruzhajushhej sredy Pribajkal'ja (Bajkal'skij geojekologicheskij poligon)* [Geochemistry of the environment of the Baikal region (Baikal Geoecological polygon)]. Novosibirsk, GEO Publ., 2008, 234 p. (in Russian)

Pinegin A.V., Rogozin A.A., Leshnikov F.N. et al. *Dinamika beregov oz. Bajkal pri novom urovennom rezhime* [Dynamics of the shores of Lake Baikal in a new level mode]. Moscow, Nauka Publ., 1976, 88 p. (in Russian)

Lut B.F. *Geomorfologija dna Bajkala* [Geomorphology of the bottom of Lake Baikal]. *Geomorfologija dna Bajkala i ego beregov* [Geomorphology of the bottom of Lake Baikal and its shores] Moscow, Nauka Publ., 1964, pp. 5-23. (in Russian)

Petrov V.A., Jaroslavec N.A. *Dinamika bara Jarki na severnom Bajkale i problemy ego voss-tanovlenija* [The dynamics of the bar are bright on northern Baikal and the problems of its restoration]. *Problemy upravlenija i ustojchivogo razvitija pribrezhnoj zony morja* [Problems of management and sustainable development of the coastal zone of the sea]. Proc. of conf. Krasnodar, 2007, pp. 149-151. (in Russian)

Potemkina T.G. *Gidrologo-morfologicheskie osobennosti ust'evoj oblasti r. Verhnjaja Angara* [Hydrological and morphological features of the estuarine region of the river. Upper Hangar]. *Vodnye resursy* [Water resources], 2012, vol. 39, no. 4, pp. 367-376. (in Russian)

Potemkina T.G., Jaroslavec N.A., Petrov V.A. *Sovremennye Potoki Nanosov U Ostrova Jarki (Severnyj Bajkal). Uspехi sovremennogo estestvoznanija* [Achievements of modern natural science], 2008, no. 8, pp. 113-114. (in Russian)

Shtelmah I. et al. *Rentgenofluorescentnoe opredelenie primesnyh jelementov v karbonatnyh porodah i fljuoritovyh rudah s ispolzovaniem spektrometra S8 Tiger* [X-ray fluorescence determination of impurity elements in carbonate rocks and fluorite ores using the S8 Tiger spectrometer]. *Analitika i kontrol* [Analytics and control], 2015, vol. 19, no. 2, pp. 121-129. <https://doi.org/10.15826/analitika.2015.19.2.001> (in Russian)

Trzhcinskij Ju.B., Kozyreva E.A., Shhipek T. et al. *Tehnogenez i pererabotka beregov Severnogo Bajkala* [Technogenesis and processing of the shores of Northern Baikal]. *Geoecology, engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 2008, no. 2, pp. 158-167. (in Russian)

Homchanovskij A.L. *Modelirovanie litodinamicheskikh processov na akkumuljativnyh beregah: na primere oz. Bajkal, ostrovnoj bar Jarki* [Modeling of lithodynamic processes on accumulative shores: on the example of Lake Baikal, Yarki island bar]. Cand. sci. diss. abstr. Petropavlovsk-Kamchatskij, 2021, 191 p. (in Russian)

Cherkashina T.Ju., Letnikova E.F. *Primenenie analiticheskikh metodov dlja geohimicheskikh isledovanij fosforitov severa Mongolii* [Application of analytical methods for geochemical studies of

phosphorites in the north of Mongolia]. *Vestnik IrGTU* [Irkutsk State Technical University Bulletin], 2012, no. 6, pp. 59–65. (in Russian)

Carter R.W.G., Woodroffe C.D. *Costal evolution: lete quaternary shoreline morphodinamics*. London, Cambridge University Press, 1997, 540 p.

Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Res*, 1980, no. 14, pp. 975–1001.

Ergin M., Saydam C., Basturk O. et al. Heavy metal concentrations in surface sediments from the two coastal inlets (Golden Horn Estuary and Izmit Bay) of the northeastern Sea of Marmara. *Chem. Geol.*, 1991, vol. 91, pp. 269-285.

El Zrelli R., Courjault-Rade P. et al. Heavy metal contamination and ecological risk assessment in the surface sediments of the coastal area surrounding the industrial complex of Gabes city, Gulf of Gabes, SE Tunisia. *Mar. Pollut. Bull.*, 2015, no. 101, pp. 922-929.

Pashkova G.V., Zhilicheva A.N., Chubarov V.M. et al. Improvement of suspension-assisted total reflection X-ray fluorescence analysis of ores using wet grinding and empirical calibrations. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2022, vol. 198. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2022.106549>

Muller G. Index of geo-accumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal* 2, 1969, pp. 108-118.

Tomlinson D.L., Wilson J.G., Harris C.R. et al. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgol. Mar. Res.*, 1980, no. 33, pp. 566-575.

Simex S.A., Helz G.R. Regional geochemistry of trace elements in Cheapeake Bay. *Environ. Geol.*, 1981, vol. 3, no. 6, pp. 315-323.

Sutherland R.A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environ. Geol.*, 2000, vol. 39, no. 6, pp. 611-627.

Wei B., Jiang F., Li X., Mu S. Spatial distribution and contamination assessment of heavy metals in urban road dusts from Urungi, NW China. *Microchem. J.*, 2009, no. 93, pp. 147-152.

Zhang J., Liu C.L. Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China – weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 2002, no. 54, pp. 1051-1070.

Сведения об авторах

Пеллинен Вадим Александрович

кандидат геолого-минералогических наук,
научный сотрудник, лаборатория
гидрогеологии
Институт земной коры СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 128
e-mail: vadim.a.pellinen@ya.ru

Ковалевская Александра Игоревна

магистрант, кафедра инженерной
и экологической геологии
Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова
Россия, 119991, г. Москва,
ул. Ленинские горы, 1
e-mail: alexa.kovalevskaya@mail.ru

Information about the authors

Pellinen Vadim Alexandrovich

Candidat of Sciences (Geology and Mineralogy),
Research Scientist, Laboratory of Hydrogeology
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: vadim.a.pellinen@ya.ru

Kovalevskaiia Alexandra Igorevna

Undergraduate, Department of Engineering
and Environmental Geology
M. V. Lomonosov Moscow State University
1, Leninskie gory, Moscow, 119991,
Russian Federation
e-mail: alexa.kovalevskaya@mail.ru

Код научной специальности: 1.6.21

Статья поступила в редакцию 17.01.2024; одобрена после рецензирования 11.09.2024; принята к публикации 11.09.2024

The article was submitted January, 17, 2024; approved after reviewing September, 11, 2024; accepted for publication September, 11, 2024