

Е.П. ЧЕБЫКИН\*, \*\*, \*\*\*, Ю.А. ДАМБИНОВ\*, О.А. ХАХУРАЕВ\*, А.Н. СУТУРИН\*, \*\*\*

\*Лимнологический институт СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Россия, cheb@lin.irk.ru, dambinov19@mail.ru, mister.oleg1984@mail.ru, san@lin.irk.ru

\*\*Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия, cheb@lin.irk.ru

\*\*\*Иркутский научный центр СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134, Россия, cheb@lin.irk.ru, san@lin.irk.ru

### ИСТОЧНИКИ ПОСТУПЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ ПОСЕЛКА ЛИСТВЯНКА (ОЗЕРО БАЙКАЛ)

*Изучено распределение главных и следовых химических элементов в снеговой воде снежного покрова в прибрежной зоне пос. Листвянка (Южный Байкал) вдоль Байкальского тракта. Установлено, что элементный состав снега формируется за счет местных природных и антропогенных источников загрязнения, в разной степени влияющих на участки исследуемой территории. Выявлено, что влияние атмосферного переноса со стороны Иркутско-Черемховского промузла по индикаторным элементам не обнаруживается. Определены основные факторы загрязнения — дорожное полотно, выхлопы автомобилей, дымовые выбросы котельных и печного отопления частного сектора. Маркеры источников загрязнения условно разделены на восемь групп. По степени минерализации и элементному составу изученные пробы поделены на три типа: чистый снег (на берегу Байкала в начале и конце поселка на удалении более 10 м от дорожного полотна), умеренно загрязненный снег (на всем протяжении поселка в 10–40 м от дорожного полотна) и грязный снег в непосредственной близости от дорожного полотна (менее 10 м) и/или придорожного кафе. Рассчитан максимальный вклад химических элементов загрязненных талых вод в среднегодовой баланс поверхностного и подземного стока. Показано, что поступление токсичных элементов и элементов, способствующих эвтрофикации, с загрязненными талыми водами незначительно по сравнению с поверхностным и подземным стоком и не может быть определяющим фактором развития экологического кризиса на Байкале в данном районе.*

Ключевые слова: многоэлементный ИСП-МС анализ, снеговая вода, поверхностный сток, Южный Байкал, источники загрязнения, экологический стресс.

Е.Р. CHEBYKIN\*, \*\*, \*\*\*, YU.A. DAMBINOV\*, O.A. KHAKHURAEV\*, A.N. SUTURIN\*, \*\*\*

\*Limnological Institute, Siberian branch, Russian Academy of Sciences, 664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 3, Russia, cheb@lin.irk.ru, dambinov19@mail.ru, mister.oleg1984@mail.ru, san@lin.irk.ru

\*\*Institute of the earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 664033, Irkutsk, ul. Lermontova, 128, Russia, cheb@lin.irk.ru

\*\*\*Irkutsk Scientific center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 664033, Irkutsk, ul. Lermontova, 134, Russia, cheb@lin.irk.ru, san@lin.irk.ru

### SOURCES OF CHEMICAL ELEMENTS IN THE SNOW COVER IN THE SHORE ZONE OF THE SETTLEMENT OF LISTVYANKA (LAKE BAIKAL)

*The distribution of major and trace chemical elements in the snow water of the cover has been studied in the near-shore zone of the settlement of Listvyanka (South Baikal) along Baikal high road. It is established that the elemental composition of snow is governed by local natural and anthropogenic pollution sources influencing, to a different extent, the sites of the study area. The study did not reveal any influence of the pollutants air transport from the Irkutsk-Cheremkhovo industrial hub according to indicative elements is not detected. The main pollution factors are the roadbed, exhaust gases, smoke emissions from boilers and ovens in private houses. The markers of pollution sources can be arbitrarily divided into eight groups. According to the degree of mineralization and elemental composition, the samples used in the study are divided onto three types: clean snow (on the Lake Baikal shore at the beginning and at the end of the settlement more than 10 m from the roadbed), moderately polluted snow (along the entire length of the settlement 10–40 m from the roadbed) and dirty snow in the immediate vicinity of the roadbed (less than 10 m) and/or of the roadside cafe. The maximum contribution from chemical elements in the polluted melt waters to the mean annual balance of the surface subsurface flow is calculated. It is shown that the input of toxic elements*

*and of elements favoring eutrophication with polluted melt waters is present in insignificant amounts when compared with the surface and subsurface flow; hence, it cannot serve as the determining factor for the emergence of the ecological crisis at Baikal in this area.*

Keywords: multi-elemental ICP-MS analysis, snow water, surface drainage, South Baikal, pollution sources, ecological stress.

## ВВЕДЕНИЕ

На побережье Байкала в районе поселка Листвянка в последние годы активно проявляется экологический кризис: в литоральной зоне бурно развиваются нитчатые водоросли рода *Spirogira*, гибнут эндемичные байкальские губки, водные лишайники и другие гидробионты [1, 2]. Приуроченность интенсивных кризисных проявлений к местам хозяйственной деятельности человека и развития туристического бизнеса указывает на антропогенное влияние, которое может быть как непосредственной причиной кризиса, так и косвенно влиять на его развитие при неблагоприятных природно-климатических факторах. Однако причины кризиса до сих пор точно не установлены. В связи с этим чрезвычайно актуален расширенный и детальный поиск неблагоприятных факторов, влияющих на литоральную зону озера. Антропогенное загрязнение литорали оз. Байкал осуществляется посредством поступления веществ с поверхностным и подземным стоком. Первый сток усиливается в весеннее время в период таяния снега. Побережье в районе пос. Листвянка испытывает максимальную антропогенную нагрузку. Не случайно именно здесь фиксируются первые признаки экологического кризиса на Байкале.

Снежный покров широко используется для оценки чистоты атмосферы, выявления локальных и удаленных природных, техногенных и антропогенных источников загрязнения [3–23], позволяет определить интегральные и усредненные характеристики накопления твердых и растворимых загрязняющих веществ и получить картину распределения загрязнений с необходимой детализацией.

Байкальский тракт в пос. Листвянка проходит в непосредственной близости от оз. Байкал и представляет собой потенциально наиболее загрязненный участок, поскольку вдоль него расположены основные объекты туристического бизнеса (Байкальский музей, нерпинарий, кафе, рестораны, гостиницы, торговые точки и пр.) и муниципальные учреждения (администрация, детский сад, школа, ЗАГС, больница и пр.).

Камера наблюдения, установленная на въезде в поселок, фиксирует высокий трафик движения — 3200 транспортных единиц в сутки (среднее за 2015 г., по данным правоохранительных органов). При условной загрузке четыре человека на один автомобиль за год в поселок въезжает около 5 млн чел., в основном туристов и отдыхающих, прибывающих в Листвянку на короткий период (1–2 дня).

Высокий трафик и поток отдыхающих усиливают антропогенную нагрузку на побережье озера, поскольку быстро выросшая за последние годы туристическая инфраструктура не оборудована системами сбора и очистки хозяйственно-бытовых стоков. Последние попадают в грунтовые воды, а с ними в литоральную зону озера. Чтобы оценить влияние различных источников поступления загрязнений с поверхностными и подземными водами в оз. Байкал, необходимо их дифференцировать. В связи с этим представляется актуальной оценка поступления растворенных компонентов при таянии снежного покрова на потенциально наиболее загрязненных участках в пос. Листвянка.

Цель данной работы — выявить основные факторы, определяющие химический элементный состав снежного покрова вдоль Байкальского тракта на территории пос. Листвянка, оценить вклад растворимых компонентов снеговой воды в загрязнение вод, поступающих в оз. Байкал.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Поселок Листвянка расположен в истоке р. Ангары и вытянут вдоль оз. Байкал на 5 км между мысами Рогатка и Лиственничный (рис. 1). Образцы снега отбирали 16 марта 2016 г. в 15 точках на всей протяженности пос. Листвянка вдоль Байкальского тракта в непосредственной близости от проезжей части (в основном со стороны Байкала), а также за поселком на берегу озера, в районе, условно принятом за фоновый (см. рис. 1, точка 15). Местоположения точек отбора показаны на рис. 1.

Образцы снега (15 л) отбирали пластиковым совком в 19-литровые бутылки из полиэтилентерефталата. После оттаивания снега при комнатной температуре снеговую воду набирали полипропиленовыми медицинскими шприцами объемом 20 мл и в количестве 10 мл фильтровали через одноразовые полистирольные стерильные шприц-насадки Minisart 16555-K (0,45 мкм, ацетат целлюлозы, Sartorius Stedim Biotech GmbH, Германия) в предварительно взвешенные полипропиленовые пробирки с закручивающейся крышкой (15 мл, Greiner bio-one, Cat.-No. 188271, Германия), содержащие

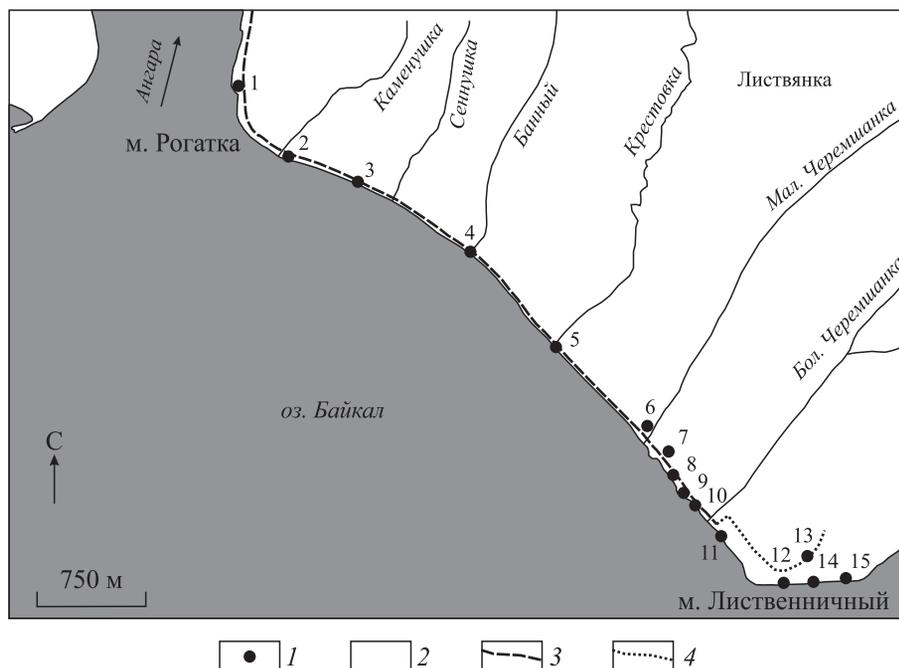


Рис. 1. Карта-схема отбора проб снега в пос. Листвянка 16.03.2016 г.

1 — места отбора проб; 2 — застроенные и огороженные территории; 3 — Байкальский тракт; 4 — дорога в продолжении Байкальского тракта.

консервант (70 %  $\text{HNO}_3$ , дважды очищенная с помощью суббуйлинговой системы перегонки кислот Savillex DST-1000 sub-boiling distillation system, Япония) и внутренний стандарт индия (концентрация In в азотной кислоте 387 млрд<sup>-1</sup>).

Пробирки с отобранными образцами фильтрованной снеговой воды взвешивали и рассчитывали точное содержание азотной кислоты (типично 2 %) и индия (типично 10 млрд<sup>-1</sup>). Все необходимые взвешивания проводились с помощью аналитических весов Mettler Toledo AG104 (погрешность взвешивания  $\pm 0,0003$  г).

Содержание химических элементов определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС). Подготовленные растворы измеряли на квадрупольном ИСП-МС масс-спектрометре Agilent 7500se в ОЦКП «Ультрамикрoанализ» при Лимнологическом институте СО РАН согласно методике, описанной в [24].

В зависимости от концентрации химических элементов типичные ошибки измерения находятся в следующих диапазонах:  $< 0,001$  мкг/дм<sup>3</sup> — RSD  $> 25$  %;  $0,001$ – $0,1$  мкг/дм<sup>3</sup> — RSD 25–10 %;  $0,1$ – $1$  мкг/дм<sup>3</sup> — RSD 10–5 %;  $> 1$  мкг/дм<sup>3</sup> — RSD 5 %.

Оценку минерализации (сумму главных ионов:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{SiO}_3^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) снеговой воды выполняли по результатам многоэлементного ИСП-МС анализа и с использованием баланса химических эквивалентов по недостающим ионам ( $\text{HCO}_3^-$  и потенциально возможного  $\text{NO}_3^-$ ). Для расчета концентраций ионов в снеговой воде мы исходили из представлений о типичных формах нахождения элементов в конкретных природных условиях (окислительная среда, слабокислая или слабощелочная реакции).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание растворенных химических элементов в снеговой воде изученных проб представлено на рис. 2.

**Факторный анализ полученных результатов.** Для анализа вариаций элементного состава снеговой воды вдоль Байкальского тракта на территории пос. Листвянка полученный массив данных был подвергнут факторному анализу.

С этой целью взяли 61 элемент (платиноиды, а также Te, Hf, Ta исключены из рассмотрения из-за очень низких содержаний). Факторный анализ выполнен с помощью программы Statistica 8.0. по

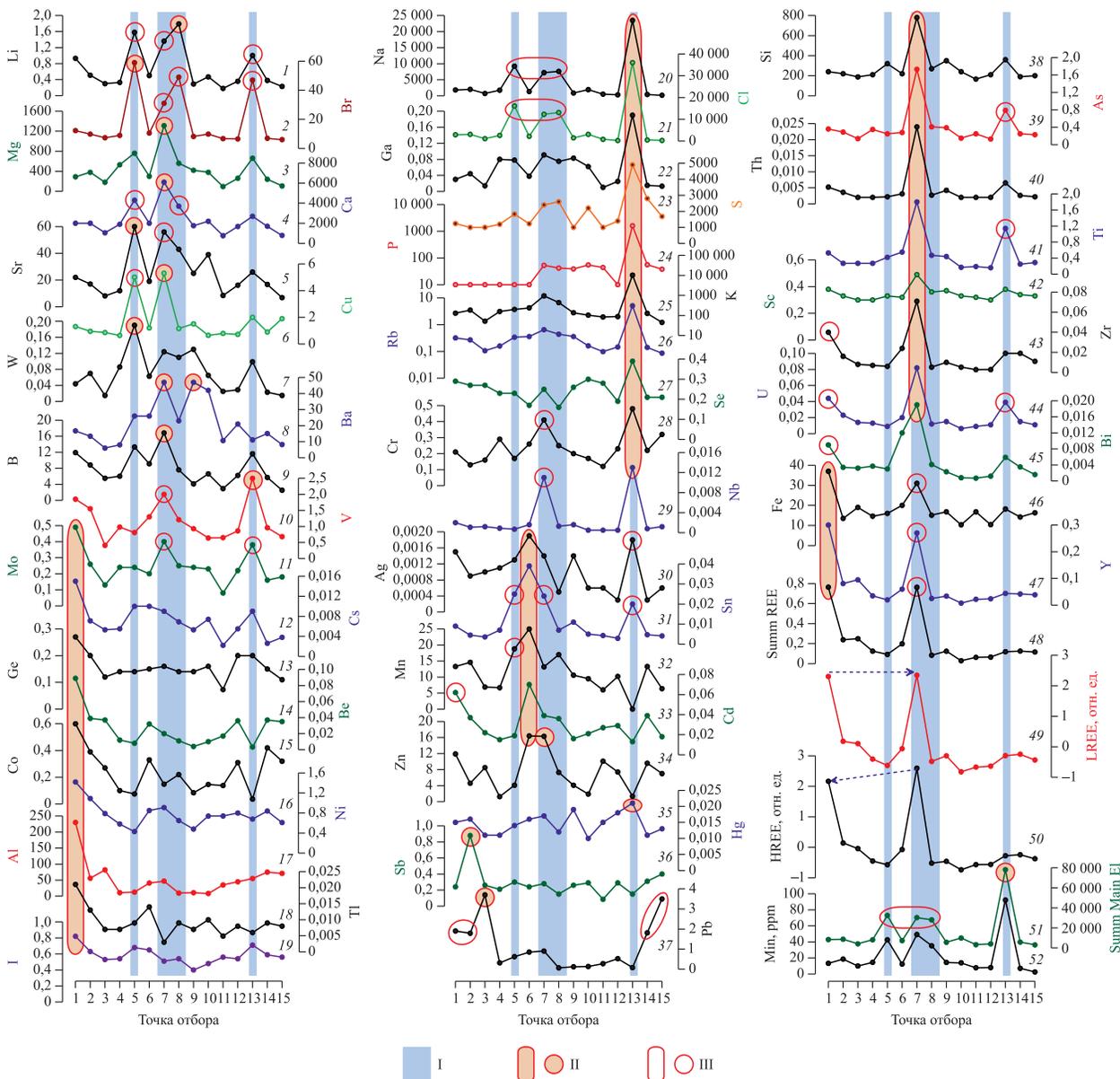


Рис. 2. Содержание химических элементов в растворимой фракции снега (мкг/дм<sup>3</sup>) в пос. Листвянка вдоль Байкальского тракта (март 2016 г.).

I — точки 5, 7, 8 и 13, подверженные повышенному антропогенному влиянию (обогащенные типичными техногенными элементами); II — точки с максимальным содержанием элементов; III — точки с высоким содержанием элементов. Редкоземельные элементы (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) показаны общей суммой (Summ REE). Профили легких (LREE, первые 7 членов ряда) и тяжелых (HREE, последние 7 членов ряда) редкоземельных элементов получены усреднением нормированных (методом стандартизации) профилей содержания соответствующих REE. Местоположение точек отбора — см. рис. 1. Панели: 1 — Li, 2 — Br, 3 — Mg, 4 — Ca, 5 — Sr, 6 — Cu, 7 — W, 8 — Ba, 9 — B, 10 — V, 11 — Mo, 12 — Cs, 13 — Ge, 14 — Be, 15 — Co, 16 — Ni, 17 — Al, 18 — Tl, 19 — I, 20 — Na, 21 — Ga, 22 — P, 23 — S, 24 — K, 25 — Rb, 26 — Se, 27 — Cr, 28 — Cr, 29 — Nb, 30 — Ag, 31 — Sn, 32 — Mn, 33 — Cd, 34 — Zn, 35 — Hg, 36 — Sb, 37 — Pb, 38 — Si, 39 — As, 40 — Th, 41 — Ti, 42 — Sc, 43 — Zr, 44 — U, 45 — Bi, 46 — Fe, 47 — Y, 48 — сумма редкоземельных элементов; 49 — легкие редкоземельные элементы; 50 — тяжелые редкоземельные элементы; 51 — сумма главных элементов (Na, Mg, S, Cl, K, Ca); 52 — минерализация, мг/кг.

методу «главных компонент» с вращением факторной структуры исходных переменных (61 элемент) методом «Varimax normalized» — максимизирующем дисперсию. Исходные переменные (профили содержаний элементов в ряду точек опробования) были предварительно стандартизованы согласно формуле

$$Z = (C_i - C_{aver})/\sigma,$$

где  $C_i$  — содержание элемента в  $i$ -й точке;  $C_{aver}$  — среднее арифметическое ряда  $C_i$ ;  $\sigma$  — стандартное отклонение ряда  $C_i$ ;  $Z$  — стандартизованный профиль ряда  $C_i$ .

С помощью критерия Кайзера («собственные значения»  $>1$ ) из 61 переменной выделено восемь факторов, из которых, согласно критерию Кеттеля (правило «каменной осыпи»), первые пять являются главными. Они составляют 45, 22, 10, 7 и 3,5 % от общей дисперсии соответственно. На три оставшихся фактора приходится 3, 2,4 и 2 % от общей дисперсии соответственно.

Фактор 1 имеет высокие факторные нагрузки ( $>0,7$ ) для Sc, Fe, As, Y, Zr, редкоземельных элементов (REE), Bi, Th, U, а также повышенные (0,6–0,7) для Al, Si, Ti, Ni, Zn и Mo. Максимальные и/или высокие содержания этих элементов характерны для точек 1 и/или 7 и некоторых из них — для точки 13 (см. рис. 2, панели 11, 16, 17, 34, 38–48). Большинство этих элементов (кроме As, Mo) — типично терригенные, плохо (Fe, Zn, Ni, Al, Ti, Y, REE) или практически нерастворимые (Sc, Zr, Bi, Th) в воде, и, вероятно, присутствуют в раствориной фракции снега в виде тонкодисперсной взвеси. Точка 1 приурочена к въезду в пос. Листвянка (см. рис. 1), расположена на склоне в 40 м от проезжей части. Источниками терригенного загрязнения снега здесь могут быть многочисленные участки открытого грунта, а также проезжая часть, которую периодически посыпают гравием. Точка 1 расположена на возвышенности и испытывает более сильное ветровое воздействие (исток р. Ангары), в этом месте также нет ограждающих бетонных блоков со стороны проезжей части, что способствует эоловому сносу терригенного материала с Байкальского тракта. Последний источник, вероятно, оказывает определяющее влияние на терригенное загрязнение снега, поскольку в других местах (на берегу озера, точки 2, 11, 14, 15) вблизи открытого грунта содержание большинства терригенных элементов небольшое (см. рис. 2). Снег в точке 7 отобран прямо на обочине грязной, активно тающей дороги в переулке, перпендикулярном Байкальскому тракту, и напротив (через тракт) причала Лимнологического института СО РАН. Видно, что по составу терригенных элементов факторной группы 1 точки 1 и 7 заметно различаются (см. рис. 2). В точке 1 максимальное содержание Al, Ni при их небольшом содержании в точке 7 и, наоборот, в точке 7 содержание Zn, Si, Th, Ti, Sc наибольшее при их малом содержании в точке 1. Содержание же остальных терригенных элементов (Zr, U, Bi, Fe, Y, REE) высокое и/или максимальное в обеих точках. Вероятно, это связано с тем, что на точку 7 помимо дороги влияет другой терригенный источник, отличный от открытого грунта в точке 1. Дифференцируя точки 1 и 7 и находя в них общие закономерности, можно полагать, что повышенное содержание Zr, U, Bi, Fe, Y, REE в снеге наследуется от посыпки дорожного полотна гравием. Интересно сравнить состав REE в точках 1 и 7. На рис. 2, панели 49 и 50 видно, что соотношение тяжелых (HREE) и легких REE (LREE) в точках 1 и 7 немного различается. В точке 7 доля HREE чуть выше, чем в точке 1, следовательно, в точке 7 идет более активная экстракция элементов из твердых фаз (тяжелые REE лучше растворимы в воде по сравнению с легкими). Ускорять этот процесс может более кислая среда. Другая возможная причина — разный состав REE терригенных источников, что маловероятно, если используют один и тот же гравий.

As и Mo могут присутствовать в природном топливе (часто сопутствуют сере, как и V, Se), сжигаемом котельными (уголь, сланцы, нефть, торф, мазут) и/или автомобилями. Высокое содержание этих элементов фиксируется в точках 7 и 13, недалеко от которых расположены котельные. Обе точки также находятся в непосредственной близости от дороги, поэтому могут испытывать двойное или смешанное влияние источников. Максимальное содержание Mo, сопоставимое с содержанием в точках 7 и 13, обнаружено в точке 1. Профиль Mo схож с профилем V (см. рис. 2, панели 10 и 11). Содержание последнего в точке 1 также повышено. Возможно, что на точку 1 оказывает влияние мазутная котельная, расположенная в 600 м, вблизи санатория «Байкал». Ванадий — типичный маркер при сжигании мазута, содержание его оксида ( $V_2O_5$ ) в золе топочного мазута марок 40 и 100 составляет 5–50 % и растет с повышением содержания в мазуте серы [25]. Источником ванадия могут быть выхлопы автомобильных двигателей [20]. Mo также может быть маркером интенсивного автомобильного движения, поскольку присутствует в качестве присадок к моторным маслам в форме  $MoS_2$  (масла марок Liqui Moly, Mannol Molibden, LUXE Molibden, SINTOL Molibden, Nordix, OilRight и др.).

В целом фактор 1 можно считать природным и отчасти техногенным, связанным с посыпкой дорожного полотна природным гравием и выбросами котельных и/или автотранспорта.

Фактор 2 имеет максимальные нагрузки (~1) для Р, К, Rb, высокие (>0,7) для Na, Cl, S, Cr, Ga, Nb, а также повышенные (0,6–0,7) для V и Se. Содержание этих элементов максимально в точке 13 (см. рис. 2, панели 10, 20–29), расположенной вблизи обочины дороги недалеко от гостиницы Gold Hotel с собственной котельной. Эта точка резко отличается от всех остальных очень высоким содержанием Р, К и Rb (см. рис. 2, панели 24–26), источник которых неясен. S и V — типичные загрязнители при сжигании мазута, и, очевидно, поступают от котельной. Se наряду с As и Mo, содержание которых повышено в точке 13, также могут поступать от котельной. S, Se, As, Mo и ряд других элементов могут быть антропогенными маркерами при глобальном атмосферном переносе. Их высокие факторы концентрирования (относительно земной коры) в снежном покрове Гренландии и Антарктики связывают, в первую очередь, со сжиганием ископаемого топлива (нефтепродукты, уголь) и, отчасти, с производством цветных металлов в промышленно развитых районах Европы, Азии и Южной Америки [21–23].

Источником Na и Cl, скорее всего, служат соли, которыми посыпают дорожное полотно против обледенения (в этом месте крутые наклоны дороги с поворотами), и/или обычная поваренная соль. В этом случае генетически связанными с NaCl элементами могут быть примеси Li и Br. Содержание последних в точке 13 также повышено (см. рис. 2, панели 1 и 2), что косвенно свидетельствует в пользу «солевых» источников. Источник остальных типично терригенных элементов (Cr, Ga, Nb, K) остается неясным. Возможно, они как примеси входят в состав топлива, сжигаемого в котельной.

Высокие содержания Na, Cl, а также Li и Br обнаружены и в других точках в непосредственной близости от дорожного полотна (точки 5 и 7) и на берегу рядом с кафе (точка 8), что свидетельствует в пользу их «солевого» источника. Во всех других точках, отстоящих от дорожного полотна далее 10 м, содержание галогенидов щелочных металлов близко к фоновому (точка 15) (см. рис. 2, панели 1, 2, 20, 21). Проба снега из точки 5 отобрана у бетонной стены, отделяющей Байкальский тракт от берега Байкала. Вероятно, соли, хорошо растворимые в воде, при таянии снега на полотне дороги просачиваются через трещины в стене и обогащают непосредственно к ней примыкающие места.

По сумме главных элементов (Na, K, Mg, Ca, S, Cl; см. рис. 2, панель 51) и минерализации (см. рис. 2, панель 52) точки 5, 7, 8 и 13 также являются самыми загрязненными участками. Профиль суммы главных элементов (см. рис. 2, панель 51) практически идентичен профилям Na и Cl (см. рис. 2, панели 20 и 21). Общая доля Na + Cl от этой суммы в «грязных» точках превышает 65 %, а в «фоновых» (точки 14, 15) — менее 15 %. Таким образом, наибольшее загрязнение снеговой воды на исследуемой территории обусловлено влиянием «солевого» источника.

Повышенного содержания типично терригенных элементов от посылки полотна гравием (Zr, U, Bi, Fe, Y, REE, см. выше) в точке 5 не обнаружено (см. рис. 2, панели 43–48). Скорее всего, бетонное ограждение механически препятствует поступлению труднорастворимых терригенных частиц в составе гравия.

Таким образом, фактор 2 по большинству элементов можно считать техногенным и антропогенным.

Фактор 3 также можно отнести к техногенным и антропогенным. Он имеет высокие нагрузки (>0,7) для Li, Br, Mg, Ca, Sr, W и повышенные факторные нагрузки (0,6–0,7) для B, Cu и Ba. Максимальные и/или высокие содержания этих элементов обнаружены в точках 5 и 7, дополнительно в 8 и/или 13 по некоторым элементам из этой группы (см. рис. 2, панели 1–9).

О возможной генетической связи LiBr и NaCl и их вероятных «солевых» источниках было упомянуто выше, содержание этих элементов повышено во всех «грязных» точках: 5, 7, 8 и 13.

Основным источником щелочноземельных элементов (Mg, Ca, Sr) и бора может быть печное отопление частного сектора, который использует в основном дрова. Он преимущественно сосредоточен по руслу р. Крестовки (см. рис. 1). Вероятно, точка 5, расположенная вблизи устья р. Крестовки, испытывает влияние этого источника. Точка 8 находится на берегу в непосредственной близости от кафе, которое может использовать дрова и/или древесный уголь для приготовления пищи (например, для изготовления шашлыков). Высокое содержание этих элементов в точке 7 (а по Mg, Ca, Sr, B — максимальное) и повышенное в точке 13 с этих позиций труднообъяснимо. Возможно, на точку 7 влияет угольная котельная, расположенная в 300 м, рядом со школой, однако отсутствие нагрузки по этим элементам на точки 9 и 10 на берегу Байкала в 100 м от котельной опровергает это предположение. По-видимому, тяжелый щелочноземельный элемент барий может быть маркером выбросов данной котельной, поскольку в точках 9 и 10 его содержание максимальное (см. рис. 2, панель 8). В этих же точках наблюдается повышенное содержание Sr (типичный маркер при сжигании угля [11]). Заметим, что содержание Ba также максимально в точке 7, но понижено в точке 8 (см. рис. 2, панель 8), поэтому влияние угольной котельной, а также генезис щелочноземельных элементов в точке 7 установить проблематично.

Источники Cu (высокие содержания в точках 5 и 7) и W (максимальное содержание в точке 5), возможно, связаны с автотранспортом.

Фактор 4 имеет высокие нагрузки ( $>0,7$ ) для Ge, I и Tl и повышенные (0,6–0,7) для Be, Al, Co, Cs и близкого к ним Ni (0,57).

Максимальные содержания всех этих элементов фиксируются в точке 1 (см. рис. 2, панели 12–19). Al входит также в состав фактора 1 (см. выше) и диагностируется как загрязнение снега природным терригенным источником от открытого грунта. Мы полагаем, что и остальные элементы также можно отнести к данному источнику, поскольку за исключением йода все они типично терригенные (Ge, Tl, Be, Al, Co, Cs).

Фактор 5 обладает высокими нагрузками ( $>0,7$ ) для Sn и повышенными (0,6–0,7) для Zn, Mn и Cd. Все эти элементы, а также Ag содержатся в максимальном количестве в точке 6 (см. рис. 2, панели 30–34), которая находится на берегу р. Малой Черемшанки между магазином и частными домами, в 20 м выше тракта. Источник данных химических элементов не ясен, скорее всего, он локальный техногенный.

Для фактора 6 характерна высокая положительная нагрузка (0,74) для Ba и отрицательная (–0,75) для Pb. Содержание свинца повышено в начале (точки 1–3) и в конце (точки 14 и 15) пос. Листвянка (1,8–3,7 мкг/дм<sup>3</sup>), а в самом поселке значительно ниже (0,008–0,02 мкг/дм<sup>3</sup>) (см. рис. 2, панель 37). Возможно, участки с повышенным содержанием свинца испытывают более сильное ветровое влияние (находятся на мысах) и обогащаются терригенной пылью из удаленных малоснежных районов (Бурятия, Монголия). Такая ситуация характерна для Иркутска в периоды теплых зим при восточных ветрах [11]. На картах, представленных в работе [26], видно, что коренные породы и почвы на территории Республики Бурятия имеют повышенный региональный фон по свинцу.

Фактор 7 имеет высокие нагрузки для Ag (0,8) и Sn (0,68). Последний также перекрывается с группой фактора 5. Профиль Ag похож на профиль Sn, который частично входит в группу элементов фактора 5. Содержание Ag и Sn также повышено в точке 13 и в двух других «грязных» точках — 5 и 7 (см. рис. 2, панели 30 и 31).

У фактора 8 высокая нагрузка только для Sb (0,95). Распределение сурьмы однородное, с резким выбросом в точке 2 (на берегу Байкала в 10 м от берегового склона, 110 м восточнее Байкальского музея; см. рис. 1), в которой концентрация Sb в четыре раза выше, чем в других точках (см. рис. 2, панель 36).

Ртуть не попадает в указанные выше факторные группы. Ее содержание очень низкое, варьирует в пределах 0,01–0,02 мкг/дм<sup>3</sup> и не имеет выраженных особенностей на профиле распределения (см. рис. 2, панель 35).

Таким образом, полученное «пятнистое» распределение элементов на исследуемой территории обусловлено влиянием местных источников загрязнения и, возможно, удаленных природных источников в отношении свинца. По полученным данным не удается обнаружить влияние атмосферного переноса со стороны Иркутско-Черемховского промузла, поскольку возможный перенос индикаторных элементов (B, Be, Al, Si, S, Hg, Co, As, Cd, Zn, Mo, U, Li, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Ag, Pb [5, 13]) в значительной степени замаскирован локальными источниками загрязнения. В работах И. А. Белозерцевой с соавт. [5, 16–18] отмечается, что воздушный перенос загрязнений из Иркутско-Черемховского промузла вносит очень незначительный вклад в общий объем загрязнения атмосферы над Байкалом из-за удаленности и наличия орографических препятствий, большого количества штилей и туманов. На картах, представленных в [5, 16], а также составленных ФГУП «Сосновгеология» [3, 4], отчетливо видно, что атмосферные загрязнения, поступающие в зону Байкала со стороны Иркутско-Черемховского промузла, не захватывают район пос. Листвянка. По сумме элементов-загрязнителей в снеге (как в твердой, так и в растворимой фракциях) Листвянка резко отличается от прилегающих территорий [3], т. е. преобладают локальные источники загрязнения, на фоне которых выделить удаленные источники проблематично, тем более по тяжелым металлам, чье фракционирование должно происходить быстрее, сокращая ареал рассеяния.

Если допустить возможность значимого поступления тяжелых металлов на территорию пос. Листвянка через атмосферу от Иркутско-Черемховского промузла, то такие элементы, как Be, Al, Co и Zn, скорее, свидетельствуют об отсутствии этого влияния, поскольку их содержание в снеге на относительно чистых участках (точки 3, 11, 12, 14, 15) в основном заметно выше (до 10 раз), чем на грязных и/или умеренно загрязненных (см. рис. 2). При повышенном общем фоне техногенного загрязнения этого быть не должно — на более грязных локальных участках содержание региональных элементов-

загрязнителей должно быть, как минимум, таким же, как и на чистых. Однако не исключено, что имеется некий локальный источник, например, «открытый грунт», который изменяет эту картину. Поэтому вопрос о влиянии Иркутско-Черемховского промузла остается открытым. Очевидно, что степень его влияния на загрязненность пос. Листвянка значительно меньше по сравнению с местными источниками.

**Типизация снега по минерализации и составу химических элементов снеговой воды.** Согласно полученным данным, наиболее загрязнены места, непосредственно примыкающие к дорожному полотну и/или кафе (точки 5, 7, 8 и 13). Рассчитанная минерализация снеговой воды для этих проб варьирует в интервале 35–93 мг/дм<sup>3</sup> (см. рис. 2, панель 52) и в среднем составляет 55 мг/дм<sup>3</sup>. Эта величина сопоставима с минерализацией снега на территориях вблизи крупных промышленных предприятий, например, Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (33 мг/дм<sup>3</sup> в среднем и 107 мг/дм<sup>3</sup> — максимум в бассейне р. Солзан [15]). Обозначим эту группу проб как грязный снег (ГС).

Места с наиболее чистым снегом (группа ЧС) из числа исследованных находится на берегу Байкала на въезде (точка 3) и в конце (точки 11, 12, 14) поселка на удалении более 10 м от дорожного полотна, а также условно фоновая точка 15 за поселком (см. рис. 1). Минерализация снеговой воды этих проб составляет 4–8 мг/дм<sup>3</sup> (см. рис. 2, панель 52), что характерно для большей части снега на территории юго-восточного побережья Байкала (4–6 мг/дм<sup>3</sup> [15]).

Минерализация остальных проб (точки 1, 2, 4, 6, 9, 10) в два раза выше, чем ЧС, и составляет 11–15 мг/дм<sup>3</sup>. Эти пробы взяты на удалении 10–40 м от проезжей части. Обозначим эту группу проб как умеренно загрязненный снег (УЗС). Средние содержания элементов в группах будут характеризовать элементный состав для каждого из выделенных типов снеговой воды.

Таким образом, по величине минерализации исследованные пробы снега можно условно разделить на три типа. Основной вклад в минерализацию ГС вносят Cl и Na, фоновых проб (точки 14, 15) — сульфаты и Ca. В остальных пробах доминируют все четыре иона, к которым эпизодически примешивается гидрокарбонат.

**Классификация химических элементов по вероятным источникам загрязнения. Сравнение составов химических элементов трех типов снега.** Согласно полученным данным о вероятных источниках загрязнения снежного покрова в придорожной зоне пос. Листвянка, химические элементы условно можно разделить на восемь групп: «соли» для посыпки дорожного полотна (Na, Cl, Li, Br), «грунт» — открытые участки природного грунта (Si, Al, Ni, I, Sc, Co, Ti, Ge, Be, Tl, Cs, Th), «гравий» для посыпки дорожного полотна (Fe, REE, Y, U, Zr, Bi), «авто» — автотранспорт (Cu, Mo, W), «котельные» (S, K, P, Ba, Sr, V, Se, Cr, As, Rb, Ga, Nb), «дрова» — отопление частного сектора (Ca, Mg, B), «техно» — неясного техногенного генезиса (Mn, Zn, Cd, Sn, Ag) и «???» — другого неясного генезиса (Pb, Sb, Hg).

Сравнение составов трех типов снеговой воды (ГС, ЧС, УЗС) в указанном выше порядке элементов показано на рис. 3. Видно, что различие между типами снеговой воды в наибольшей степени (как в отношениях, так и по абсолютной разнице) проявляется в содержании Cl и Na из группы «соли». Содержание Cl и Na в грязном снеге в 32 и 26 раз соответственно больше, чем в чистом (ГС/ЧС). Соотношение ГС/УЗС для этих элементов составляет 8 и 7 соответственно. Для большинства элементов наблюдается общая закономерность — увеличение содержаний в ряду ЧС–УЗС–ГС за исключением большей части группы «грунт» (Al, Ni, I, Sc, Co, Ge, Be, Tl), а также Fe из группы «гравий», Se из группы «котельные», Mn, Zn, Cd из группы «техно» и элементов не установленного генезиса (Pb, Sb, Hg). Содержание указанных элементов либо практически одинаково во всех типах снега, либо имеет инверсный характер изменения (Co, Be, Pb). Это свидетельствует в пользу их природного происхождения.

Содержание большинства элементов в УЗС не более чем в 2 раза превышает их содержание в ЧС, за исключением немного большей степени обогащения по Cl, Na (~4 раза, «соли»), Bi (2,5 раза, «гравий»), W (3,6 раза, «авто») и Sn (3 раза, «техно»). Это указывает на преимущественное влияние «дорожных» источников загрязнения, что не удивительно, поскольку пробы УЗС отобраны в 10–40 м от проезжей части.

При сравнении ГС и ЧС наряду с Cl и Na высокие (>10 раз) отношения ГС/ЧС характерны для K (38 раз), P (13 раз) и Rb (14 раз) в группе «котельные». Немного в меньшей степени (5–10 раз) наблюдается различие по Br (7 раз) и Li (5 раз) из группы «соли», Ga (7 раз) и Nb (8 раз) из группы «котельные», а также по W (6 раз, «авто»). Различие в 2–5 раз характерно для Si, Ti, Cs, Th («грунт»), всей группы «гравий» (Fe, REE, Y, U, Zr, Bi), Cu, Mo («авто»), оставшихся элементов (кроме Cr) из группы «котельные» (Ba, Sr, V, As), всей группы «дрова» (Ca, Mg, B), а также Sn и Ag из группы



Рис. 3. Сравнение химического элементного состава трех типов снеговой воды (март 2016 г.) и речных вод (октябрь 2015 г.) в пос. Листвянка.

Снег: 1 — чистый, 2 — умеренно загрязненный, 3 — грязный. 4 — реки выше поселка; 5 — устья рек.

«техно». Поскольку эти пробы отобраны в непосредственной близости (менее 10 м) от дорожного полотна и/или кафе, то они в наибольшей мере испытывают влияние как «дорожных», так и «топливных» источников загрязнения.

**Вклад загрязненных талых вод в поступление химических элементов в акваторию оз. Байкал в районе пос. Листвянка.** Чтобы оценить вклад загрязненных талых вод (ГС + УЗС) в поступление химических элементов в акваторию оз. Байкал в районе пос. Листвянка, необходимо знать объемы снеговой воды загрязненного участка, величину поверхностного и подземного стоков водосборного бассейна, а также характерные концентрации элементов в этих типах воды.

Наиболее грязный снег находится в пределах 10 м от дорожного полотна. Примем за наиболее загрязненный участок полосу шириной 20 м и длиной 5 км. При средней толщине снега 25 см и коэффициенте уменьшения объема снега при таянии 3, это даст ~8000 м<sup>3</sup> снеговой воды. Умеренно загрязненный снег находится в пределах 10–40 м от дорожного полотна, поэтому его участок примем равным шириной 30 · 2 = 60 м и длиной 5 км. При тех же параметрах расчета это даст 25 000 м<sup>3</sup> снеговой воды.

Среднегодовой объем поверхностного стока можно оценить по данным о модуле речного стока, который характеризует количество воды, стекающей с площади водосбора в единицу времени. Для бассейна рек пос. Листвянка данных о подземном стоке нет. В первом приближении можно принять, что его доля относительно речного такая же, как в среднем для Байкала. Согласно А.Н. Афанасьеву [27], в Байкал ежегодно поступает 58,75 км<sup>3</sup> речных и 2,3 км<sup>3</sup> подземных вод. По оценкам Б.И. Писарского [28], среднегодовое поступление подземных вод составляет 1,64 км<sup>3</sup>, из них 1,52 км<sup>3</sup> приходится на подрусловой сток, т. е. доля подземного стока в оз. Байкал составляет 2,8–3,6 % от поверхностного. Для наших оценок примем среднее значение в 3,2 %. Для исследуемой территории средний модуль речного стока оценивается в 6 дм<sup>3</sup>/(с · км<sup>2</sup>) [29]. Площадь водосборного бассейна рек, протекающих через пос. Листвянка, составляет 64 км<sup>2</sup>, что с учетом 3,2 % подземного стока дает среднегодовой общий объем стока 1,25 · 10<sup>7</sup> м<sup>3</sup>.

Средние концентрации элементов в группах ГС и УЗС нам известны. Необходимо определиться с характерными концентрациями элементов в поверхностной и подземной водах.

В октябре 2015 г. были отобраны и проанализированы пробы воды из рек в пос. Листвянка (Каменушка, Сеннушка, Банный, Крестовка, Малая Черемшанка, Большая Черемшанка) выше поселка (Р) и в устьях (РУ) [30]. Усредненные составы этих вод в сопоставлении с загрязненной снеговой водой (ГС и УЗС) показаны на рис. 3. Из полученных данных следует, что вода в устьях рек обогащена рядом элементов относительно речной воды выше поселка. При прохождении через Листвянку речная вода в наибольшей степени обогащается хлором: РУ/Р ~ 7 раз. По Na, Br, Ni, Sc, Ge, Tl, Cu, W, K, P, Ba, Sr, Cr, As, Rb, B, Zn, Sn, Pb, Sb обогащение составляет 1,5–2 раза, а по остальным элементам менее 1,5 раза, что свидетельствует о влиянии пос. Листвянка на загрязнение речных вод.

Поскольку данных о характерном составе чистых подземных вод пока нет (необходимо бурение скважин выше поселка), мы сделаем оценку максимального вклада загрязненных талых вод (ГС + УЗС) в общий среднегодовой сток, приняв, в первом приближении, концентрации элементов в подземной воде такими же, как и в чистой поверхностной воде (реки выше поселка). При этих условиях наибольшие вклады при таянии загрязненного снега будут вносить Pb (8,5 %) и Ge (8,1 %). Далее в порядке уменьшения: Sb (4 %), Cd (3,6), W (3,1), Ga (3,1), Tl (2,3), Cs (2,2), Cl (2,1), Zn (1,7), Al (1,6), Sn (1,6), Bi (1,3), Be (1,1), As (1,1) и P (1 %). Вклад других элементов составляет менее 1 %. Это незначительные величины и, очевидно, они завышены, поскольку концентрация многих химических элементов в грунтовых водах будет выше (из-за более интенсивного контакта с горными породами), а загрязненный участок снега в пос. Листвянка шириной 80 м и длиной 5 км, скорее всего, реально меньше.

Из полученных данных следует, что поступление токсичных элементов и элементов, способствующих эвтрофикации, с загрязненными талыми водами незначительно по сравнению с поверхностным и подземным стоком и не может быть определяющим фактором развития экологического кризиса на Байкале в данном районе.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного исследования установлено, что химический элементный состав снеговой воды в пос. Листвянка формируется под влиянием местных природных и антропогенных источников.

Основные факторы загрязнения — это дорожное полотно, выхлопы автомобилей, дымовые выбросы котельных и печного отопления частного сектора. Наиболее грязный снег (с содержанием растворенных солей 35–93 мг/дм<sup>3</sup>) формируется в непосредственной близости от дорожного полотна (менее 10 м) и/или придорожных кафе, умеренно загрязненный снег (с содержанием растворенных солей 11–15 мг/дм<sup>3</sup>) на удалении 10–40 м от проезжей части, а чистый снег — на берегу Байкала (в начале и конце поселка на удалении более 10 м от дорожного полотна), по содержанию растворенных солей он соответствует фону (4–8 мг/дм<sup>3</sup>).

Вклад загрязненной снеговой воды в годовое поступление химических элементов с поверхностным и подземным стоком небольшой и не может определять экологический кризис на Байкале в данном районе. В то же время отчетливо прослеживается загрязнение малых рек (берега которых плотно застроены объектами частного сектора и туристического бизнеса) по большинству химических элементов при прохождении по территории поселка и подземных вод, разгружающихся в литоральной зоне озера.

Резко возросшая антропогенная нагрузка на пос. Листвянку за последние десятилетие, активная застройка объектами туристического бизнеса при отсутствии природоохранной инфраструктуры могут быть главными причинами развития наблюдаемого экологического кризиса в литоральной зоне. Прежде всего, необходимо принять меры по предотвращению попадания хозяйственно-фекальных стоков в открытые водотоки и грунтовые воды, с которыми загрязнители попадают в Байкал.

Необходимо наладить химический и микробиологический мониторинг рек, подземных вод и снегового покрова для контроля экологической ситуации в пос. Листвянка, а также мониторинг состояния уже преобразованных биогеоценозов в литоральной зоне Байкала.

Что касается снегового покрова, то для получения более детальной картины распределения химических элементов целесообразно опробовать другие районы поселка (в средней и верхней части), а также горные районы за его пределами (для оценки степени воздействия удаленных источников). Для оценки степени влияния интенсивности трафика на загрязнение придорожного снега целесообразно провести аналогичное исследование вдоль Байкальского тракта на участке Иркутск–Листвянка.

*Работа выполнена в рамках тем госзаданий Лимнологического института СО РАН (0345–2016–0010), а также при финансовой поддержке Интеграционного проекта Иркутского научного центра СО РАН «Разработка единых методических подходов в определении антропогенного воздействия на поверхностный водоем в зоне субаквальной разгрузки загрязненными бытовыми стоками грунтовых вод (на примере района пос. Листвянка)».*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грачёв М.А. Что грозит Байкалу? // В мире науки. — 2015. — № 1. — С. 4–15.
2. Ханаев И.В., Дзюба Е.В., Кравцова Л.С., Грачёв М.А. Влияние массового развития зеленых нитчатых водорослей на воспроизводство желтокрылки *Cottocomephorus grewingkii* (Dybowski, 1874) (*Cottidae*) в условиях экологического кризиса озера Байкал // Докл. РАН. — 2016. — Т. 467, № 1. — С. 119–121.
3. Киселёв В.Я. Карты загрязнения снежного покрова в Иркутской области и на Южном Байкале, м-б 1:800 000 // Волна. — 1997. — № 2 (11). — С. 30.
4. Карта загрязнения снежного покрова, фтор, Иркутско-Черемховский ТПК. М-б 1:800 000 [Электронный ресурс]. — <http://maps.babr.ru/?fr=baikal&sr=aiftor&tp=f1> (дата обращения 16.02.2016).
5. Белозерцева И.А., Матушкина О.А. Загрязнение атмосферы // Экологически ориентированное планирование землепользования в Байкальском регионе. Байкальская природная территория. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2002. — С. 31–37.
6. Оболкин В.А., Кобелева Н.А., Ходжер Т.В., Колмогоров С.Ю. Элементный состав нерастворимой фракции зимних атмосферных выпадений в некоторых районах Южного Прибайкалья // Оптика атмосферы и океана. — 2004. — Т. 17, № 5–6. — С. 414–417.
7. Чипанина Е.В., Голобокова Л.П., Кучменко Е.В., Нецветаева О.Г., Ходжер Т.В. Условия формирования химического состава атмосферных аэрозолей и осадков над Байкальской природной территорией // Оптика атмосферы и океана. — 2007. — Т. 20, № 10. — С. 900–905.
8. Онищук Н.А., Ходжер Т.В., Чебыкин Е.П., Чипанина Е.В. Свинец и его изотопные отношения в атмосферных выпадениях отдельных районов Азиатской территории России // География и природ. ресурсы. — 2009. — № 4. — С. 39–44.
9. Онищук Н.А., Ходжер Т.В. Элементный состав атмосферных выпадений на Байкальской природной территории // Оптика атмосферы и океана. — 2009. — Т. 22, № 6. — С. 579–584.
10. Воробьева И.Б., Напрасникова Е.В., Власова Н.В. Исследование гидрогеогенных компонентов юго-западного побережья Байкала (эколого-геохимический аспект) // Лед и снег. — 2010. — № 2. — С. 56–60.
11. Онищук Н.А., Оболкин В.А., Ходжер Т.В. Химический состав снежного покрова в городах юга Иркутской области // Охрана атмосферного воздуха. Атмосфера. — 2012. — № 4. — С. 13–24.
12. Онищук Н.А., Ходжер Т.М. Атмосферные осадки и снежный покров в южной части Иркутской области. Химический состав и режим. — Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. — 141 с.
13. Гребенщикова В.И. Эколого-геохимические исследования окружающей среды байкальского региона // Современные проблемы геохимии: Материалы Всерос. совещ. с участием иностранных ученых, посвященного 95-летию со дня рождения академика Л. В. Таусона, 22–26 октября 2012 г. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2012. — Т. 1. — С. 145–149.
14. Янченко Н.И., Баранов А.Н., Чебыкин Е.П., Колесников С.С., Воднева Е.Н. Особенности и факторы, влияющие на распределение металлов, редкоземельных элементов, углерода и фтора в фильтрате и в твердом осадке снежного покрова города Братска // Вестн. Иркут. техн. ун-та. — 2013. — № 10. — С. 141–148.
15. Сороковикова Л.М., Синюкович В.Н., Нецветаева О.Г., Томберг И.В., Сезько Н.П., Лопатина И.Н. Химический состав снеговых и речных вод юго-восточного побережья озера Байкал // Метеорология и гидрология. — 2015. — № 5. — С. 17–83.
16. Белозерцева И.А., Воробьева И.Б., Власова Н.В., Лопатина Д.Н., Янчук М.С. Загрязнение атмосферы и содержание фтора в снеге на акватории оз. Байкал // Современные проблемы науки и образования. — 2015. — № 2, ч. 2. — С. 735.
17. Белозерцева И.А., Воробьева И.Б., Власова Н.В., Янчук М.С., Лопатина Д.Н. Загрязнение снега на акватории северной котловины озера Байкал и прилегающей территории // Успехи современного естествознания. — 2016. — № 9. — С. 97–103.
18. Белозерцева И.А., Воробьева И.Б., Власова Н.В., Янчук М.С., Лопатина Д.Н. Загрязнение снега на акватории средней котловины озера Байкал и прилегающей территории // Успехи современного естествознания. — 2016. — № 11. — С. 96–105.
19. Barbante C., Boutron C., Moreau A.-L., Ferrari C., Van de Velde K., Cozzi G., Turettab C., Cescona P. Seasonal variations in nickel and vanadium in Mont Blanc snow and ice dated from the 1960s and 1990s // Journ. Environ. Monit. — 2002. — Vol. 4. — P. 960–966.
20. Wang X., Pu W., Zhang X., Ren Y., Huang J. Water-soluble ions and trace elements in surface snow and their potential source regions across northeastern China // Atmospheric Environment. — 2015. — Vol. 114. — P. 57–65.

21. **Lee K., Hong S.-B., Lee J., Chung J., Hur S.-D., Hong S.** Seasonal variation in the input of atmospheric selenium to northwestern Greenland snow // *Science of the Total Environment*. — 2015. — Vol. 526. — P. 49–57.
22. **Hong S., Soyol-Erdene T.-O., Hwang H. J., Hong S. B., Do Hur S., Motoyama H.** Evidence of Global-Scale As, Mo, Sb, and Tl Atmospheric Pollution in the Antarctic Snow // *Environ. Sci. Technol.* — 2012. — Vol. 46, N 21. — P. 11550–11557.
23. **Wai K.-M., Wu S., Li X., Jaffe D.A., Perry K.D.** Global Atmospheric Transport and Source-Receptor Relationships for Arsenic // *Environ. Sci. Technol.* — 2016. — Vol. 50, N 7. — P. 3714–3720.
24. **Чебыкин Е.П., Сороковикова Л.М., Томберг И.В., Воднева Е.Н., Рассказов С.В., Ходжер Т.В., Грачев М.А.** Современное состояние вод реки Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам // *Химия в интересах устойчивого развития*. — 2012. — Т. 20, № 5. — С. 613–631.
25. **Тепловой** расчет котлов (Нормативный метод) / Техн. ред. Г.М. Каган. — СПб.: Изд-во ОАО НПО исследования и проектирования энергетич. оборудования, 1998. — 256 с.
26. **Гребенщикова В.И., Лустенберг Э.Е., Китаев Н.А., Ломоносов И.С.** Геохимия окружающей среды Прибайкалья (Байкальский геоэкологический полигон). — Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2008. — 236 с.
27. **Афанасьев А.Н.** Водные ресурсы и водный баланс бассейна озера Байкал. — Новосибирск: Наука, 1976. — 238 с.
28. **Писарский Б.И.** Региональные закономерности формирования подземного стока в Прибайкалье (вторая половина XX века) // *Водные ресурсы Байкальского региона: проблемы формирования и использования на рубеже тысячелетий: Материалы науч.-практ. конф. (Иркутск, 6–9 окт. 1998 г.)*. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, Ирк. техн. ун-та, Вост.-Сиб. отд-ния Акад. водохоз. наук, Ангаро-Байк. бассейн. водн. упр., 1998. — Т. 1. — С. 42–43.
29. **Атлас** расчетных гидрологических карт и номограмм (Приложение 1 к «Пособию по определению расчетных гидрологических характеристик») / Отв. ред. А. П. Копылов. — Л.: Гидрометеоздат, 1986. — 25 л.
30. **Сутурин А.Н., Чебыкин Е.П., Мальник В.В., Ханаев И.В., Минаев А.В., Минаев В.В.** Роль антропогенных факторов в развитии экологического стресса в литорали озера Байкал (акватория пос. Листвянка) // *География и природ. ресурсы*. — 2016. — № 6. — С. 43–54.

*Поступила в редакцию 6 марта 2017 г.*