
Приоритетное направление 7.12. ЭВОЛЮЦИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И КЛИМАТА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ. НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРАДИЦИОННЫХ И НОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ.

Программа VII.65.2. ГЕОХИМИЯ И БИОХИМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ СИБИРИ.

Проект VII.65.2.3 БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ЛАНДШАФТАХ БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.

(Рег. № 01201055601)

(научный руководитель проекта д.г.-м.н. В.И. Гребенщикова)

Блок 1. Изучение особенностей распределения, форм нахождения и миграции химических элементов в абиотических и биотических компонентах окружающей среды Байкало-Ангарской водной системы.

• **Мониторинговые исследования химического состава воды истока р. Ангары** позволили получить временные тренды распределения концентраций макро- (за 60 лет с учетом литературных данных) и микроэлементов (за 7 лет – авторские данные) в воде истока.

Проведено сопоставление полученных средних значений концентраций элементов в воде с данными других исследователей [Вотинцев, 1963; Глазунов, 1963; Николаева, 1964; Грачев, 2002; Ветров, Кузнецова, 1997; Склярова, 2011]. В течение всего периода исследования в воде истока р. Ангары содержания всех макро- и микроэлементов во много раз ниже ПДКрбх и ПДКпв.

По концентрации ионов водорода (рН) вода истока р. Ангары изменяется от нейтральной (6,2) до слабо щелочной (8,5). Согласно данным всех исследователей, вода истока р. Ангары низкоминерализованная, гидрокарбонатно-кальциевого состава. Сумма растворенных солей в течение года варьирует в незначительных пределах. В последние годы наблюдается некоторое снижение годовой амплитуды колебаний значений минерализации (Рис. 37), о чем свидетельствует уменьшение коэффициентов вариации. Максимальный интервал изменения минерализации воды (89,8-102,4 мг/л) за 13-летний период исследований был отмечен в 1998 г. Средняя минерализация за изученный период составляет 95,46 мг/л. Относительно

пониженная минерализация чаще всего отмечается в январе-феврале. Сезонные

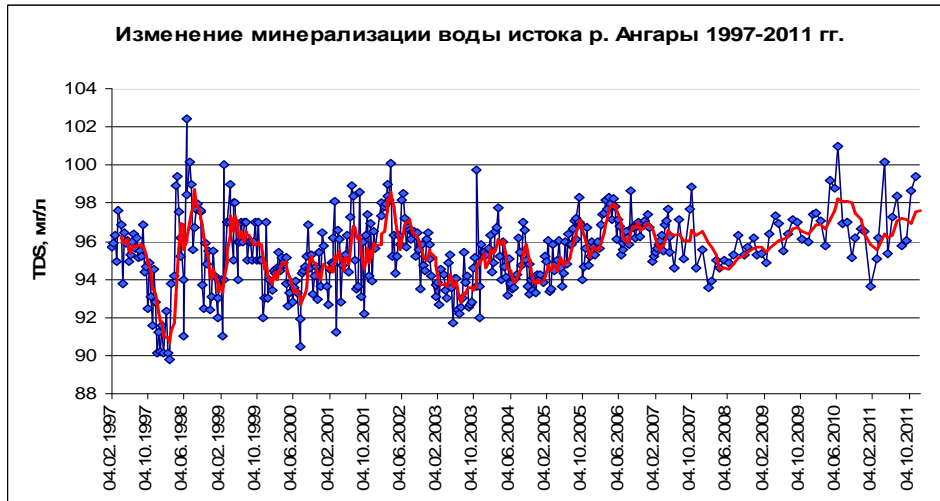


Рис. 37. Межгодоевое и помесячное изменение минерализации воды истока р. Ангары.

изменения состава воды происходят на фоне межгодоевых, циклических изменений минерализации, обусловленных, преимущественно, гидрокарбонат-ионом. Статистический анализ показал наличие отчетливой корреляции между гидрокарбонат-ионом и минерализацией ($R=0,82$), а также между калием и натрием ($R=0,74$), более слабо выражена корреляция минерализации и содержания сульфат-иона ($R=0,47$). Отмеченные последние годы флуктуации в изменении содержания гидрокарбонатов, хлоридов, общей суммы ионов и кислорода отражают 3-5-летние природные циклы изменений, когда максимумы сменяются минимумами или наоборот. В летнее время при повышении температуры воды содержание кислорода уменьшается, т.к. активизируется процесс фотосинтеза у планктонных водорослей. При понижении температуры наблюдается обратный процесс – рост содержания кислорода (Рис. 38).

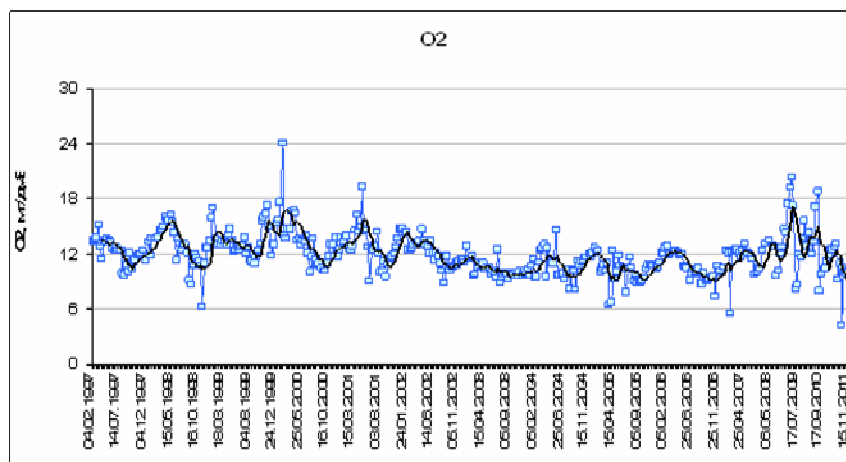


Рис. 38. Межгодоевое изменение содержаний кислорода в воде истока р. Ангары.

Средние уровни концентраций элементов в воде истока Ангары хорошо сопоставимы с химическим составом воды самого озера Байкал. Полученные данные показывают, что вода стока озера Байкал относится к наиболее чистым водам мира в отношении загрязнения тяжелыми металлами и другими элементами.

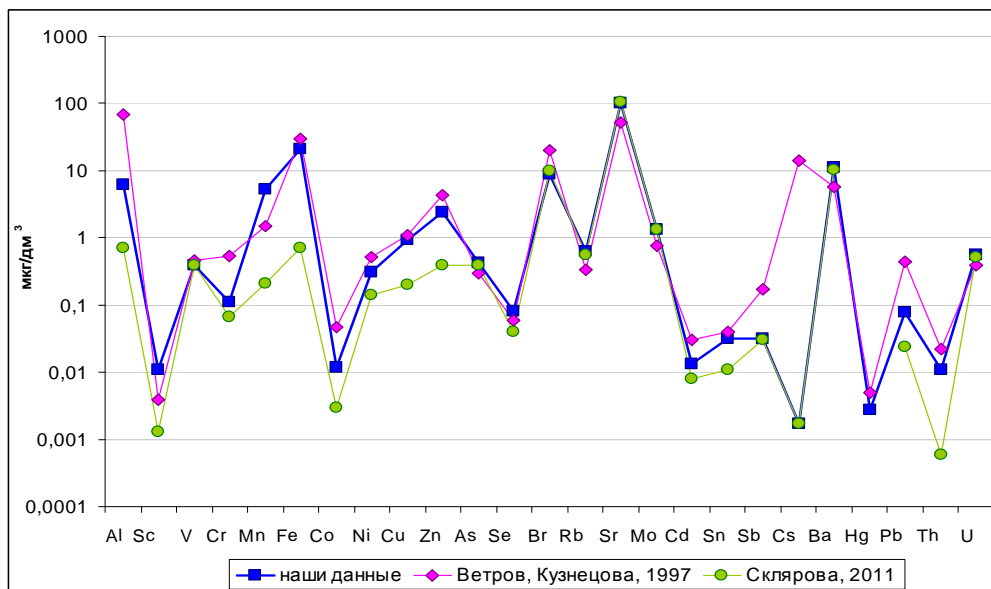


Рис. 39. Средние концентрации микроэлементов в воде истока реки Ангары, Среднего Байкала [Склярова, 2011¹¹] и озера Байкал в целом [Ветров, Кузнецова, 1997¹²].

Сравнительный анализ показал хорошую сопоставимость средних значений содержаний микроэлементов в воде истока Ангары с данными по химическому составу воды озера Байкал (Рис. 39). Концентрации большинства рассматриваемых элементов не превышают их базовых уровней для байкальской воды, а для таких элементов, как V, Fe, Cu, As, Se, Hg, U очень близки к ним. Исключение составляют Sc и Mn, концентрации которых заметно выше приводимых в опубликованных ранее работах (Ветров, Кузнецова, 1997¹²; Склярова, 2011¹¹). Содержания ряда элементов (V, As, Br, Rb, Sr, Mo, Sb, Cs, Ba, U) практически полностью совпадают с данными по Среднему Байкалу [Склярова, 2011¹¹]. Концентрации остальных элементов занимают промежуточное положение между значениями, приведенными в рассматриваемых литературных источниках.

¹¹ Склярова О.А. Распределение микроэлементов в водной толще Среднего Байкала // География и природные ресурсы, 2011, № 1, с. 53-59.

¹² Ветров В.А., Кузнецова А.И. Микроэлементы в природных средах региона озера Байкал. – Новосибирск: Изд-во СО РАН НИЦ ОИГТМ, 1999. – 234 с.

В то же время выявлен сложный, не регулярный характер изменения концентраций микроэлементов во времени. На временных трендах содержаний большинства элементов выделяются экстремумы, не приуроченные к сезонам года.

- Проведена обработка мониторинговых данных по основному ионному составу вод р. Крестовка (приток Байкала, поселок Листвянка Иркутской области). Станция мониторинга расположена выше заселенной территории долины реки. Кроме того, с 2008 по 2010 гг. пробы воды отбирались также в устье реки. До 2007 г. отбор проб проводился подекадно, далее – ежемесячно.

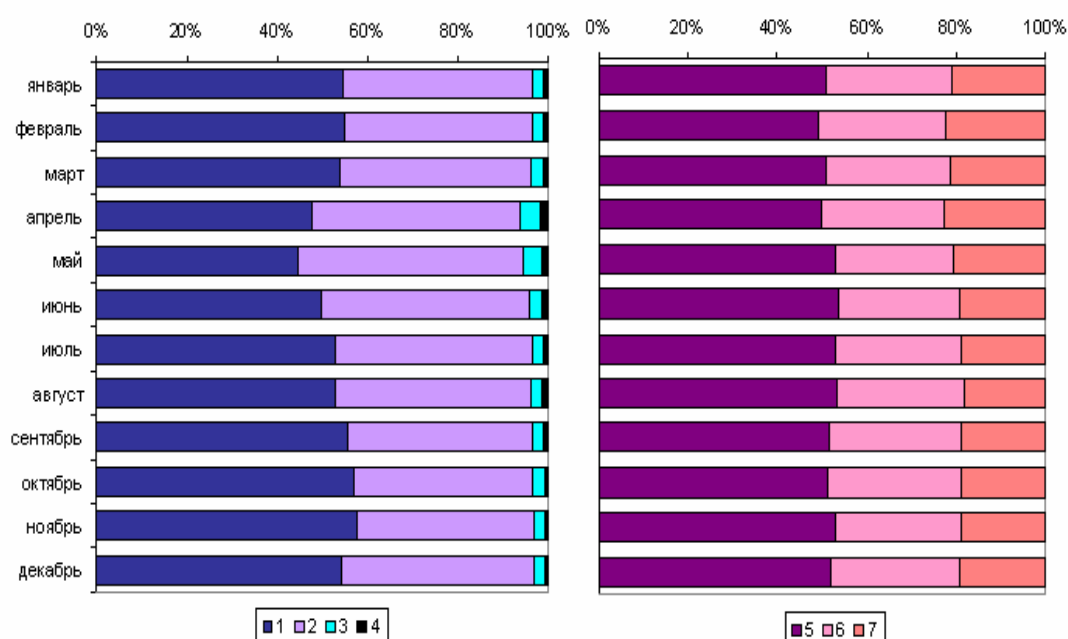


Рис. 40. Сезонные изменения соотношения анионов и катионов в воде р. Крестовка (в % экв. ионов): 1 – HCO₃⁻; 2 – SO₄²⁻; 3 – Cl⁻; 4 – F⁻; 5 – Ca²⁺; 6 – Mg²⁺; 7 – Na⁺+K⁺.

В результате систематических многолетних наблюдений был изучен характер сезонных изменений основного ионного состава вод Крестовки (Рис. 40). Большую часть года среди анионов преобладают гидрокарбонат-ионы – 50-58% экв. анионов. Лишь в период весеннего половодья их доля снижается до 38-47% экв., а на доминирующие позиции выходят сульфат-ионы. В апреле-мае их доля в отдельные годы достигает 55-57% экв. анионов. В остальные гидрологические фазы сульфаты составляют 38-43% экв. Роль хлорид- и фторид-ионов в общей сумме анионов незначительна. Как правило, они не превышают 4,5 и 1,7 % экв., соответственно, достигая максимальных значений в апреле.

Среди катионов в течение всего года доминирует кальций. На его долю приходится 49-54% экв. Далее следует магний с 26-29% экв. и сумма щелочных ионов – 18-23% экв. Сезонная динамика в соотношении катионов выражена в меньшей степени, чем для анионов. Тем не менее, в летний период можно отметить некоторое увеличение доли кальция, а в зимний – доли щелочных ионов. Наиболее стабильно в течение года содержание магния.

Из вышесказанного следует, что в настоящее время воды р. Крестовка относятся к сульфатно-гидрокарбонатному магниевому-кальциевому типу. В период весеннего половодья (апрель-май) они часто переходят в гидрокарбонатно-сульфатный класс. Отметим, что К.К. Вотинцев и др. (1965) определяли воды этой речки как гидрокарбонатные кальциевые.

• **Иркутская область представляет собой одну из слабо изученных йоддефицитных биогеохимических провинций России.** В связи с этим с 2009 г. в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН были начаты исследования по распределению йода в различных водоисточниках Прибайкалья. Объектами исследования являются поверхностные (реки, озера) и подземные (родники, колодцы, скважины) воды питьевого и сельскохозяйственного назначения.

Для работы использованы данные, полученные в результате мониторинговых работ по изучению химического состава вод Братского водохранилища, проведенных Институтом геохимии СО РАН в 2009-2011 гг.

Точки отбора проб расположены на речном участке р. Ангары (г. Иркутск – г. Усолье-Сибирское, протяженностью 90 км) и Братском водохранилище (по р. Ангаре – около 500 км, по р. Ока – около 135 км, по р. Ия – около 90 км) (Рис. 41). Пробы воды отбирали фторопластовым батометром: поверхностную – с глубины до 0,6 м, придонную – в метровом слое.

Воды речного участка р. Ангары характеризуются небольшими (до 3,2 мкг/дм³) содержаниями йода (Рис. 41). В районах основных промышленных центров Приангарья – г. Иркутск и г. Ангарск – среднее за период опробования содержание йода в воде составило 1,5 и 1,0 мкг/дм³, соответственно.

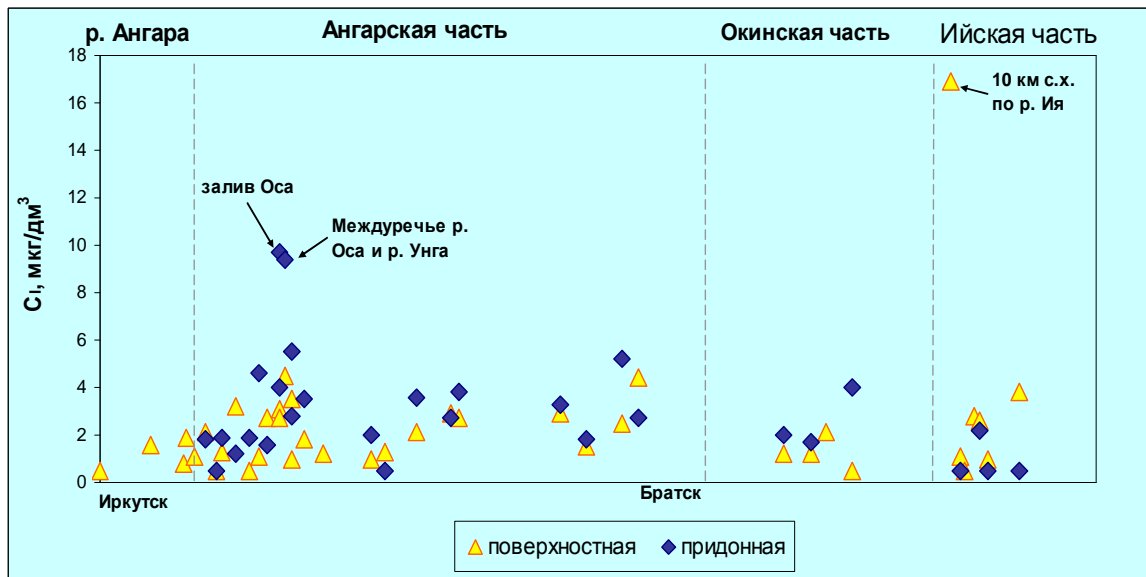


Рис. 41. Распределение йода в поверхностной и придонной воде р. Ангары и Братского водохранилища.

Несмотря на достаточно широкий размах колебаний концентраций микроэлемента (от <1 до $9,7$ мкг/дм³) по Ангарской ветви водохранилища в целом, его средние значения находятся на низком уровне (2 мкг/дм³), что хорошо согласуется с данными по пресным и речным водам. Обращает на себя внимание участок, расположенный между заливами Оса и Унга. Здесь концентрации йода в придонной воде значительно превышают его значения в поверхностном слое, а в заливе Оса достигает своих максимальных значений по Ангарской части ($9,7$ мкг/дм³). Предположительно, это может быть связано с подпиткой вод водохранилища сильноминерализованными подземными водами, источники которых расположены в бортах долины реки. По данным Е. В. Пиннекера (1966) на этом участке водохранилища находятся соленые и рассольные источники с высокими солевыми расходами (53 г/сек. и 71 г/сек.), содержание йода в которых достигает 500 мкг/дм³. По мере удаления от этих источников концентрация микроэлемента снижается за счет разбавления подземных вод речными и миграционных свойств элемента.

Для вод Окинской части Братского водохранилища характерны невысокие концентрации йода. За период работ не выявлено значительных вариаций его содержаний, как по глубине, так и по профилю водоема.

Наибольшими содержаниями йода характеризуется вода Ийской части Братского водохранилища. Максимальная концентрация йода за весь период опробования

зафиксирована в точке наблюдения, расположенной в 10 км судового хода по р. Ия. Для большинства проб воды отмечаются концентрации йода, превышающие средние значения для речных вод. Они приурочены к выделенным ранее А.А. Дзюба (1984) очагам скрытой разгрузки рассолов, за счет которых, вероятно, может осуществляться привнос микроэлемента в водную систему Братского водохранилища.

- **Геохимический мониторинг влажных атмосферных выпадений** проводится на опорных станциях и профилях, включая города Приангарья, и фоновых территориях с целью определения путей миграции химических элементов и уровней их накопления в компонентах окружающей среды (почвах и природных водах).

Промышленные зоны гг. Иркутск, Шелехов, Усолье-Сибирское, Свирск выделяются повышенными содержаниями алюминия, фтора, мышьяка, бериллия и ртути, что ведет к интенсивному загрязнению почв, грунтовых вод и вод основных рек Приангарья: Ангара, Олха (г. Шелехов), Ока (гг. Саянск, Зима). Вследствие расположения основных градообразующих предприятий в черте городов, жилые массивы также подвержены техногенному загрязнению.

На примере города Шелехово (Рис. 42) демонстрируется поведение микроэлементов, в том числе токсикантов, в снеговой воде за последние 4 года. Отчетливо видно, что в снеговой воде города более, чем в 100 раз, стабильно

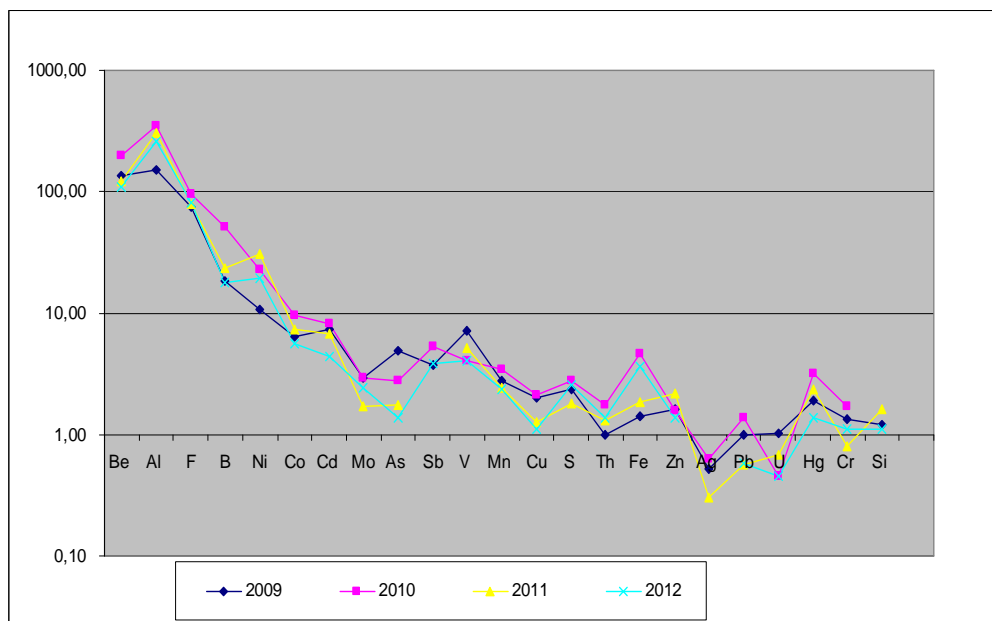


Рис. 42. Превышение содержаний элементов-токсикантов в снеговой воде г. Шелехово относительно снеговой воды фоновых участков (бухта Мандархан, Байкал).

повышены содержания Be, Al, F, а также более, чем в 10 раз, других токсичных элементов – B, Ni, Co, Cd. Это объясняется наличием в центре города предприятия по производству алюминия, а также кабельного завода и др. Исходя из полученных данных отчетливо видно, что, несмотря на природоохранные мероприятия, которые проводят промышленные предприятия, ситуация с загрязнением снегового покрова фактически остается на прежнем уровне.

• **Формы нахождения металлов в пылевой составляющей снегового покрова на территории Южного Прибайкалья.**

В режиме растрового электронного микроскопа во вторичных и в обратно рассеянных электронах изучены поверхность, размеры, форма твердых частиц снегового покрова, а также фазовое распределение материала по матрице образцов.

Результаты исследований показали, что твердый осадок снега представляет собой смесь частиц и их конгломератов различной формы и размеров (Рис. 43).

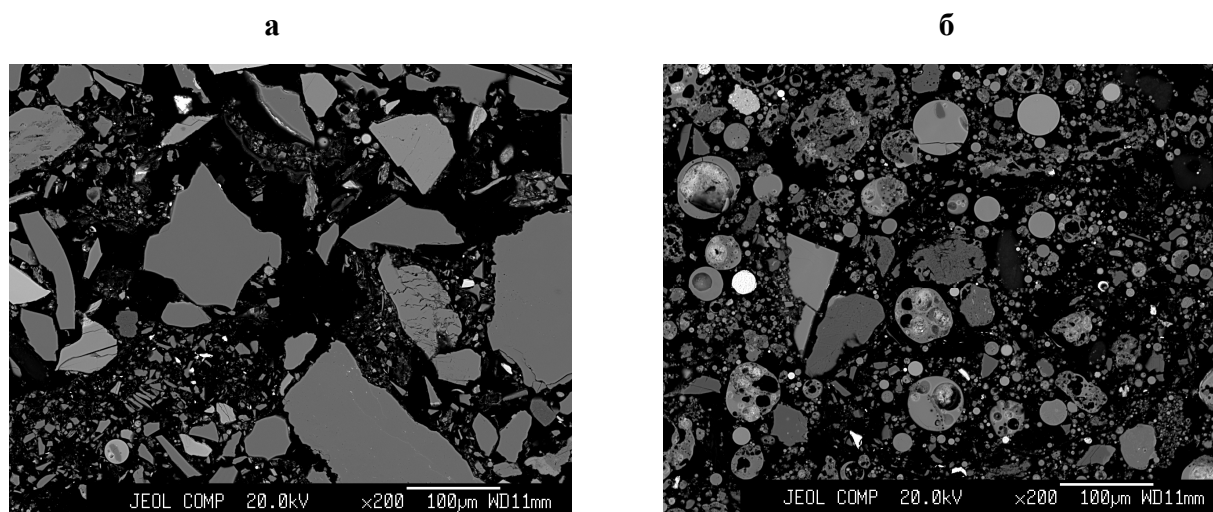


Рис. 43. Изображения твердых частиц снегового покрова, полученные в режиме растрового электронного микроскопа в обратно рассеянных электронах: а – бухта Мандархан (оз. Байкал); б – ОАО «Саянскхимпласт» (г. Саянск). Увеличение – 200 крат.

По химическому составу исследуемые образцы снега разных районов крайне неоднородны. Необходимо отметить, что по матрице всех образцов наблюдаются тёмные (чёрные), тёмно-серые, серые, светло-серые, светлые и яркие частицы и их конгломераты оgranённой, овальной, сферической и неправильной

хлопьевидной формы. Размер частиц по образцам изменяется от 1 до 200 микрон. Основной элементный состав частиц снегового покрова представлен силикатной составляющей с содержанием Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, присутствующих в различных соотношениях массовых содержаний и выражен такими минералами, как корунд, кварц, альбит, плагиоклаз, полевой шпат, апатит, пироксен. Это тёмно-серые, серые, светло-серые, светлые огранённые частицы.

Исследования методом РСМА позволили выделить природную и техногенную компоненты в пылевой составляющей снегового покрова и установить их различное соотношение по районам с разной степенью техногенной нагрузки (городам и фоновым станциям). Критерием для их разделения послужили разные формы выделения фаз и элементный состав. Природная компонента преимущественно состоит из частиц терригенного и биогенного происхождения, она хорошо выражена силикатной минеральной составляющей: полевыми шпатами, пироксенами, кварцем, алюмосиликатами, кальцитами, амфиболами, гранатами. Частицы сажи с соединениями углерода, карбонаты, карбиды и сульфиды металлов, обусловленные техногенными потоками, преобладают в городах и районах с высокой техногенной нагрузкой. В фоновых районах (Тибельти, Жемчуг, Б. Коты, Мандархан и др.) природная компонента твердого осадка снега составляет 65-100 %, техногенная – 30-35 %. В Иркутске и Саянске природная компонента составляет 60-62 %, в то время, как в городах Шелехов, Ангарск, Усолъе – Сибирское, Черемхово она значительно меньше – 20-22 % . Здесь преобладает техногенная компонента – до 58-80 %. Фазовый и химический состав твердого осадка снегового покрова отражают минеральную и геохимическую специфику действующих промышленных комплексов, что позволяет оценить уровень их техногенного воздействия.

Таким образом, комплексное исследование пылевой составляющей снегового покрова позволило оценить растворимые и труднорастворимые формы нахождения в ней металлов – экотоксикантов, минеральный и химический состав, поступление и накопление их в подстилающих почвах.

• **Исследование состава вод нижней части Братского водохранилища.**

Изучено распределение O_2 , CO_2 , $C_{орг}$, NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , PO_4^{-3} , SiO_2 в водах нижней части Братского водохранилища. В условиях современной техногенной нагрузки водные массы Братского водохранилища как русловых частей, так и заливов не содержат количеств биогенных элементов, превышающих уровни ПДК. Однако, повышенное содержание соединений азота, фосфора и кремния в заливах, по сравнению с русловыми частями, является показателем происходящих в них более интенсивных процессов разложения органических остатков. Выявлено, что в придонных водах заливов концентрации биогенных элементов, а также фенолов преобладают над поверхностными. По содержанию органического вещества и биогенных элементов в воде можно выстроить следующий ряд по увеличению: Ангарская часть → Окинская часть → Ийская часть водохранилища, что связано как с уровнем техногенной нагрузки, так и с особенностями их гидрологического режима (Рис. 44).

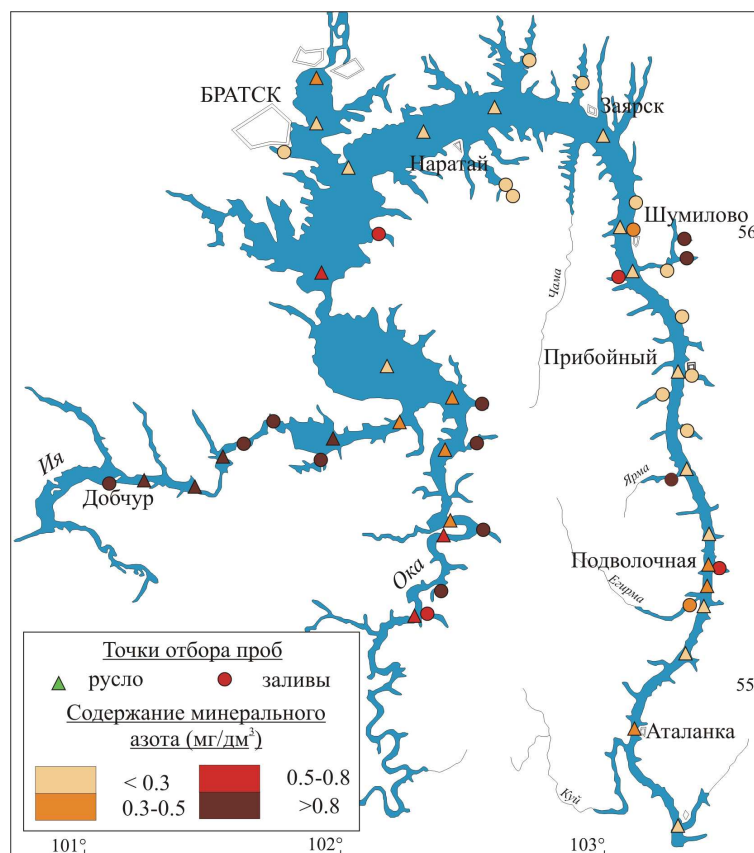


Рис. 44. Содержание минерального азота в придонных водах нижней части Братского водохранилища.

• **Пространственная динамика состава вод бассейна р. Ангары, расположенного в зоне влияния агломерации г. Иркутска.**

Установлено, что гидрохимический режим исследуемых водотоков зависит как от природных (сезонные изменения концентраций химических компонентов, изменение состава вод под действием притоков, выходы подземных вод в долине реки), так и антропогенных факторов (сбросы сточных вод, сток с сельхозугодий, влияние загрязненных притоков (р. Иркут – рр. Олха и Кая)) (Рис. 45, 46). Максимальную техногенную нагрузку принимает на себя небольшой водоток – р. Кая.



Рис. 45. Карта-схема отбора проб воды р. Ангары и ее притоков в зоне влияния агломерации г. Иркутска

Наибольший вклад природной составляющей определен для р. Олхи, доля которой отчетливо проявляется в период зимней межени. Далее следует р. Ангара, изменение химического состава вод которой прослеживается в месте впадения в нее р. Иркут.

Воды р. Ангары, вследствие своей высокой самоочищающей способности, хотя и принимают на себя значительную техногенную нагрузку, в меньшей степени подвержены существенным изменениям гидрохимического состава.

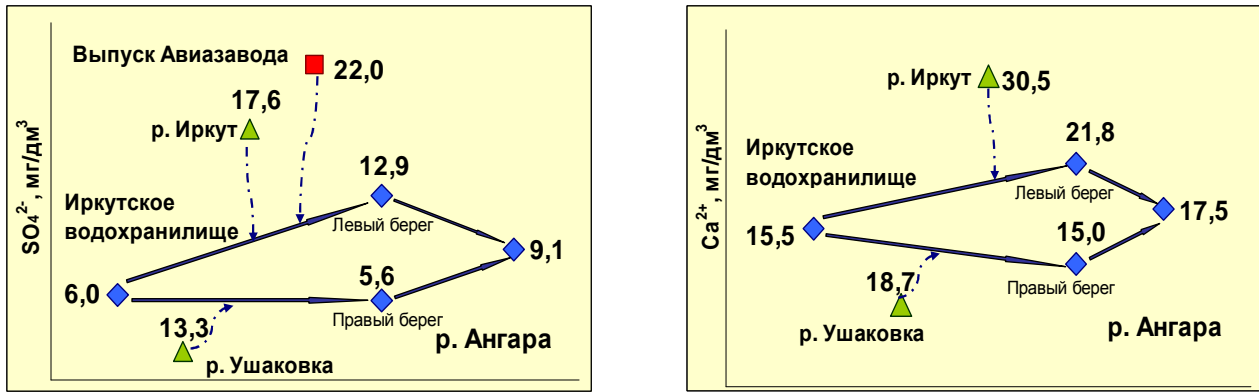


Рис. 46. Изменение концентраций SO_4^{2-} и Ca^{2+} в воде р. Ангары под воздействием природной и техногенной нагрузки.

- **Аккумуляции токсичных элементов водными растениями Братского водохранилища.**

Проведены исследования аккумуляции металлов-экоотоксикантов (Pb, Zn, Hg) в органах водных растений нижней части Ангарской ветви Братского водохранилища. На примере урути колосистой (*Myriophyllum spicatum* L.) показано, что наибольшие уровни накопления цинка и ртути наблюдаются в корнях растений (Рис. 47). С одной стороны это указывает на основное поступление этих элементов из донных осадков, с другой – свидетельствует о мобильности форм Zn и Hg в поровых водах. Листья урути, благодаря своей расчлененности на узкие линейные доли, имеют более значительную площадь соприкосновения с водой, чем стебли. Поэтому на них больше осаждаются различного рода взвесей, и в отличие от других морфологических частей растения они обладают большей способностью поглощать из водной среды растворенные формы цинка и ртути. Накопление свинца органами водных растений происходит иначе – в корни поступление этого элемента идет пассивно, вследствие чего уровень накопления в них несколько ниже, чем в стеблях и листьях, аккумулирующих Pb, как из донных осадков, так и из воды. В связи с низкой мобильностью форм свинца, значительная его часть накапливается в стеблях растений, тем самым, уменьшая его поступление в листья.

В плодах водных растений аккумулируется наименьшее количество неэссенциальных токсичных элементов (Hg, Pb) по сравнению с другими органами (Рис. 47). Это, главным образом, связано с барьерной функцией

околоплодных структур, препятствующих проникновению токсичных металлов в тело плода. Напротив, цинк, являясь эссенциальным элементом, необходимым в определенных количествах для жизнедеятельности растений, интенсивнее аккумулируется в плодах урути по сравнению со стеблями и в соизмеримых концентрациях по сравнению с листьями.

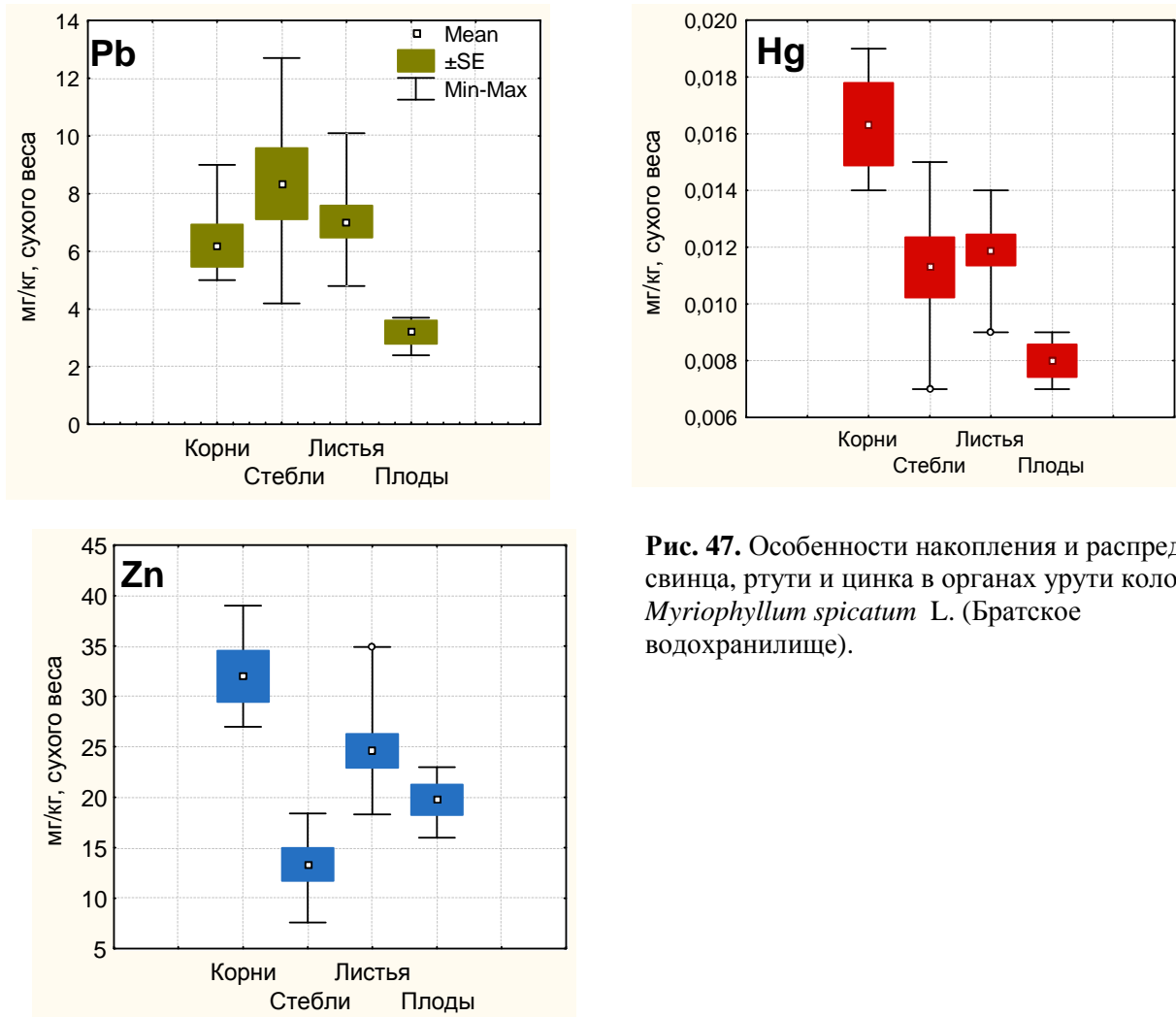


Рис. 47. Особенности накопления и распределения свинца, ртути и цинка в органах урути колосистой *Myriophyllum spicatum* L. (Братское водохранилище).

Таким образом, установлено, что аккумуляция тяжелых металлов органами растений зависит как от источников поступления, форм нахождения и их концентраций в окружающей среде, так и от функциональных потребностей растений в том или ином элементе и физиологических особенностей морфологических структур.

- **Исследование изотопного состава ртути для выявления ее источников поступления и биоаккумуляции в пищевых цепях оз. Байкал.**

Впервые проведены исследования изотопного состава ртути в гидробионтах озера Байкал. Обнаружены существенные отличия в значениях масс-независимого (МНФ) и масс-зависимого (МЗФ) фракционирования ртути в гидробионтах прибрежной и пелагической пищевых цепях (Рис. 48). Значительные отличия изотопного состава ртути в 2-х пищевых цепях оз. Байкал главным образом связаны с разными источниками ее поступления.

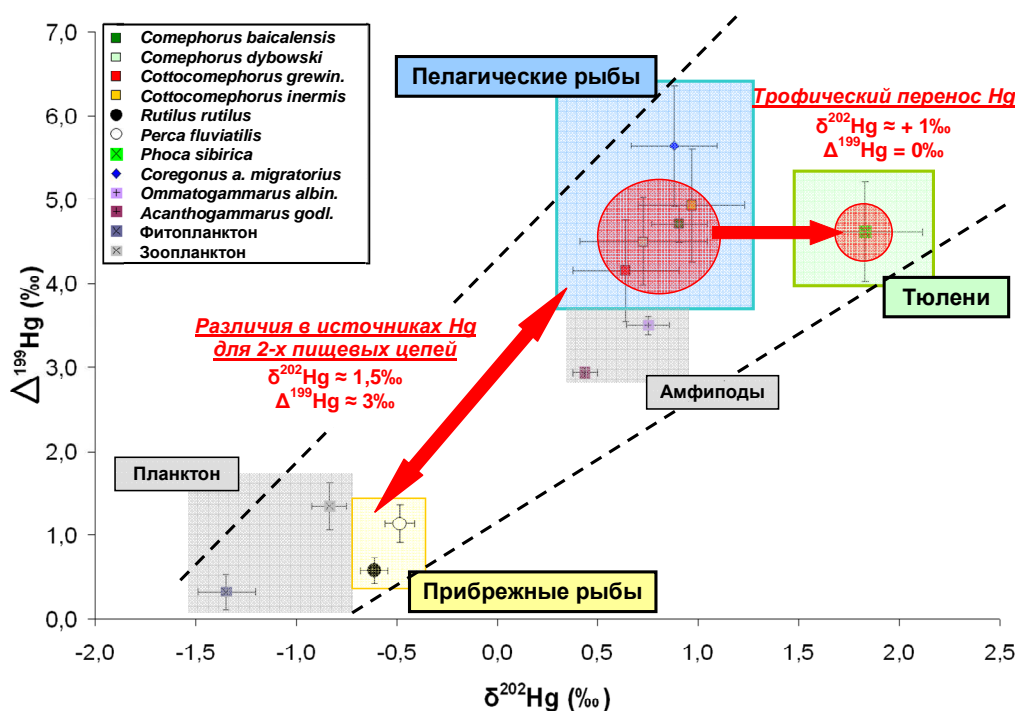


Рис. 48. Соотношение $\Delta^{199}\text{Hg}$ и $\delta^{202}\text{Hg}$ как показатель источника и биоаккумуляции ртути в пелагических и прибрежных пищевых цепях оз. Байкал.

Высокий уровень МНФ в пелагической пищевой цепи является результатом сильной фотодеметилиции метилртути (MeHg) в открытой водной толще под воздействием солнечного света. Кроме того, фотодеметилиция MeHg вызывает МЗФ, которое ведет к обогащению остаточной MeHg тяжелыми изотопами [Bergquist, Blum, 2007¹³] может служить объяснением высоких значений $\Delta^{199}\text{Hg}$ и $\delta^{202}\text{Hg}$ в пелагической цепи по сравнению с прибрежной. Воздействие фотодеметилиции на изотопный состав ртути в прибрежных рыбах ограничено, так как на небольших глубинах они аккумулируют ртуть, главным образом, поступающую непосредственно из осадочного слоя. Биотическая метилиция в

¹³ Bergquist B.A., Blum J.D. Mass-dependent and -independent fractionation of Hg isotopes by photoreduction in aquatic systems // Science, 2007, V.318, P. 417-420.

донных осадках приводит к образованию MeHg, обогащенной более легкими изотопами, чем остаточная неорганическая ртуть (IHg) [Rodriguez-Gonzales et al., 2009¹⁴], и отрицательным значениям $\delta^{202}\text{Hg}$ в поверхностном слое донных отложений оз. Байкал ($\approx -2\text{‰}$). Следовательно, прибрежные рыбы аккумулируют изначальную ртуть с отрицательным $\delta^{202}\text{Hg}$ из осадков, а вследствие трофического переноса величина $\delta^{202}\text{Hg}$ несколько повышается. В противоположность этому, пелагические рыбы оз. Байкал, с большой долей вероятности, аккумулируют ртуть атмосферного происхождения, а не из глубоководных, либо прибрежных донных осадков. На их изотопные характеристики (МНФ и МЗФ) главным образом оказывает влияние сильная фотодеметилиция в водном столбе, что ведет к высоким положительным значениям $\Delta^{199}\text{Hg}$ и $\delta^{202}\text{Hg}$ остаточной MeHg, аккумулированной рыбой. Трофический перенос ртути проявляется для МЗФ изотопов (например, значение $\delta^{202}\text{Hg}$ выше в хищниках, чем в жертве) и не влияет на значение МНФ, так как МНФ $\Delta^{199}\text{Hg}$ лишь незначительно отличалось для тюленей и их объектов питания – пелагических рыб ($4,59 \pm 0,55\text{‰}$ и $4,62 \pm 0,60\text{‰}$, соответственно). Предполагается, что степень МНФ зависит в основном от особых физических и биогеохимических характеристик водной толщи и процентного количества метилированных форм ртути в организмах гидробионтов.

Установлено, что повышенные значения $\Delta^{199}\text{Hg}$ при МНФ и положительные $\delta^{202}\text{Hg}$ при МЗФ в пелагических рыбах связаны с аккумуляцией остаточной метилртути, прошедшей фотодеметилицию в толще воды, при которой происходит обогащение ртути нечетными и тяжелыми изотопами. Пониженные значения МНФ и отрицательные в прибрежных рыбах обусловлены преимущественным накоплением метилртути, обогащенной легкими изотопами после биотической метилиции в донных осадках. Изучение изотопного фракционирования ртути может способствовать более глубокому пониманию ряда ключевых процессов ее трансформации в биогеохимическом цикле.

¹⁴ Rodriguez-Gonzalez P., et al. 2009. Species-specific stable isotope fractionation of mercury during Hg(II) methylation by an anaerobic bacteria (*Desulfobulbus propionicus*) under dark conditions // Environ. Sci. Technol., V. 43, P. 9183-9188.

- **Выявление основных трендов геохимической эволюции поверхностных вод и закономерностей поведения элементов в водных объектах в процессе транспортировки и накопления.**

Геохимическое изучение родников и малых озер Ольхонского региона (Западное Прибайкалье) позволило обосновать положение о значительной вариабильности состава и солености озер как результате процессов эвапоритизации и криогенеза.

На основании данных химического состава водных систем Приольхонья выполнено численное моделирование процессов эвапоритизации озерных вод с помощью программы «EQL/EVP» (Рис. 49).

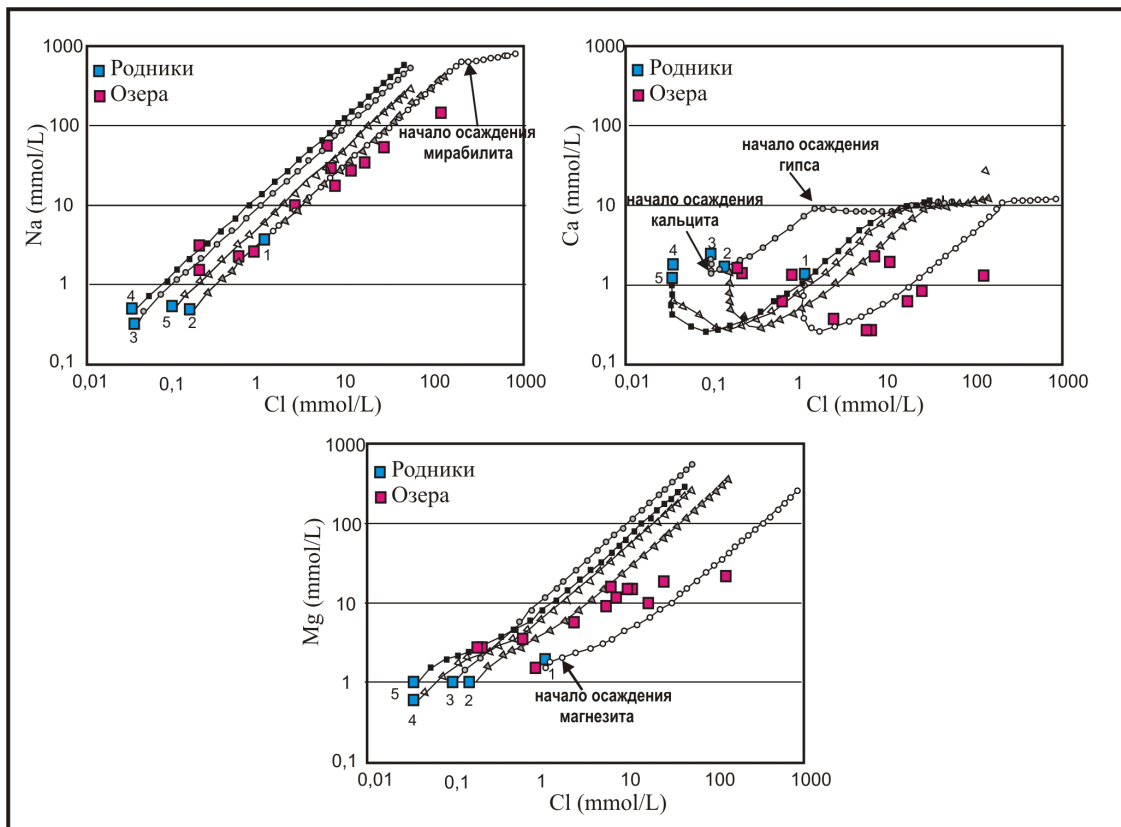


Рис. 49. Модель процессов эвапоритизации пресных вод до состояния высокоминерализованных вод.

С помощью программы смоделированы процессы испарения пресных питающих озера вод до растворов с высокой концентрацией солей. Для расчетов фазовых равновесий в программе использован метод Питцера. Концентрирование вод приводит к последовательной садке минералов. Первыми осаждаются Ca-Mg карбонаты уже при минерализации 0,75 г/л, затем происходит осаждение гипса, а при солености >50 г/л мирабилита, что хорошо согласуется с ранее полученными

данными исследования керн озер Приольхонья методами рентгеновского дифракционного (XRD) и ИК-спектроскопического анализов. В вещественном составе образцов из эвапоритовой толщи существенно преобладают (80-90%) карбонатные минералы, и только в верхней части разреза их содержание не превышает 40 %. Гипс является постоянным компонентом осадка нижней части разреза, где его содержание составляет преимущественно 3-5 % валового состава. Мирабилит в осадках не обнаружен, что является косвенным доказательством устойчивого гидрохимического состояния озерных систем Приольхонья в течение длительного периода.

Исследованы изотопные отношения стронция и урана в пробах воды родников и озер Приольхонья (Рис. 50).

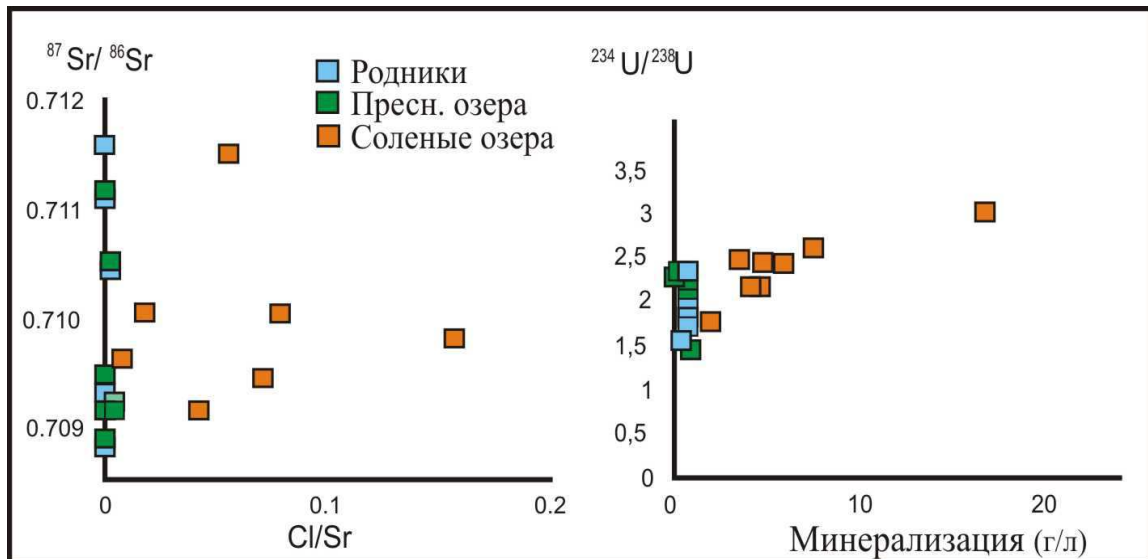


Рис. 50. Вариации изотопных отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в воде родников, пресных и соленых озер Приольхонья.

Отношения изотопов стронция в воде родников и озер показывают подобные диапазоны изменения: от 0,7092 до 0,7101 для минерализованных озер и от 0,7088 до 0,7116 для родниковой воды. Не отмечается взаимосвязи между значениями отношения изотопов Sr ни от местоположения водного образца в бассейне, ни от литологии водосборного бассейна.

Данные по изотопии урана показывают, что время является важным параметром для объяснения широкого спектра минерализации озер Приольхонья: самые высокие $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ отношения измерены в водах соленых озер (Рис. 50).

Различие в $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ отношениях может быть следствием более длительного периода взаимодействия вода-порода в соленых озерах относительно пресных. Изотопные отношения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ позволяют предполагать устойчивое состояние озер не менее нескольких тысяч лет, что подтверждается проведенным ^{14}C -датированием карбонатного материала кернов нескольких озер Приольхонья. Вариации в химическом составе и минерализации озер расположенных на площади в несколько километров, являются следствием различной продолжительности процессов испарения летом и криогенеза зимой.