

территорий существенно различается по макро- и микрокомпонентному составу и отражает промышленную специфику городов: Иркутск – Zn, Pb, Cu, Ni, Co, V; Усолье-Сибирское – Hg, B, Si, Sc, Mo; Братск – Al, Cd, Ba, Sr, Li, Rb; Шелехов – Be, Al, F, B; Ангарск – S, Al, Sr, B и др.

Содержание урана в снеговой воде города Ангарска относительно природного фона на Байкале (0.02 мкг/дм^3) существенно выше и достигают 0.475 мкг/дм^3 . Наибольшие его концентрации отмечены в промышленной зоне – между заводом полимеров и нефтеперерабатывающим комплексом (Рис. 34).

Основным источником поступления урана в атмосферу является сжигание углей на площадке ТЭЦ, обеспечивающих энергией химические предприятия города. Максимальная запыленность снегового покрова ($20\text{-}44 \text{ г/м}^2$ и более) (Рис. 35) отмечена в промышленной зоне города Ангарска вдоль р. Ангара и

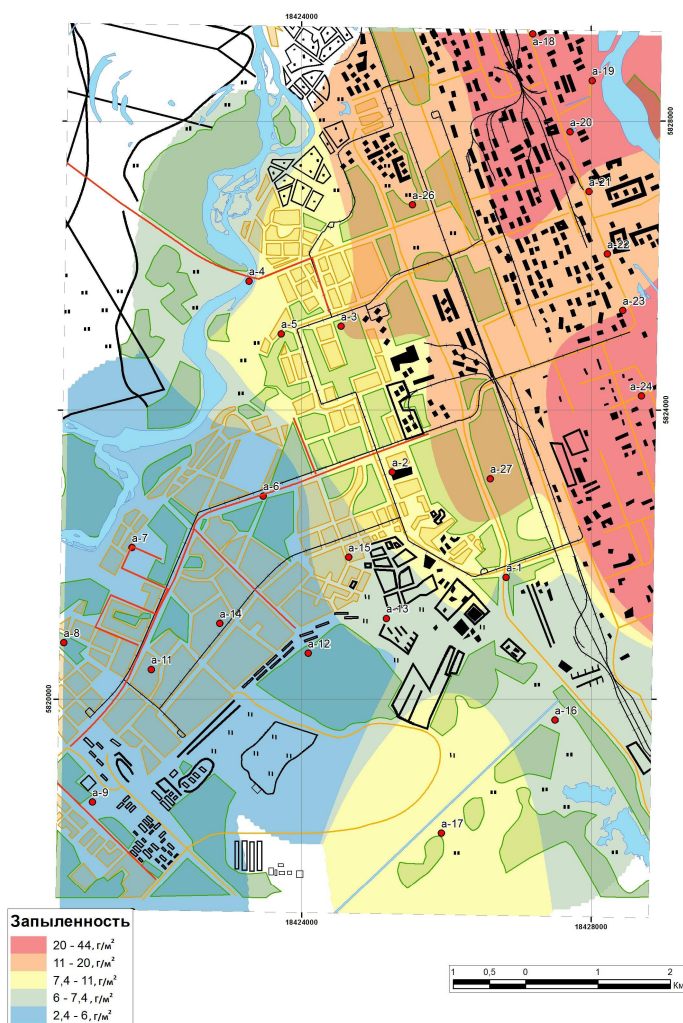


Рис. 35. Карта-схема запыленности снегового покрова г. Ангарска.

и менее значимая в центральной части города в узкой полосе вдоль московского тракта и железной дороги ($11-20 \text{ г/м}^2$). При этом природный фон на Байкале составляет 0.33 г/м^2 . По удалению от промышленной зоны запыленность резко снижается. На жилой территории города запыленность довольно низкая (менее 6 г/м^2), что обусловлено обилием здесь зеленых насаждений и отсутствием крупных промышленных предприятий.

Определяющим фактором в загрязнении снегового покрова в городе является направление розы ветров – вдоль реки Ангары на юго-восток. Поскольку жилая зона занимает западную часть г. Ангарска, то и загрязнение здесь снега существенно меньше, либо фоновое. Такое распределение характерно не только для урана, но и для других химических элементов (Рис. 36).

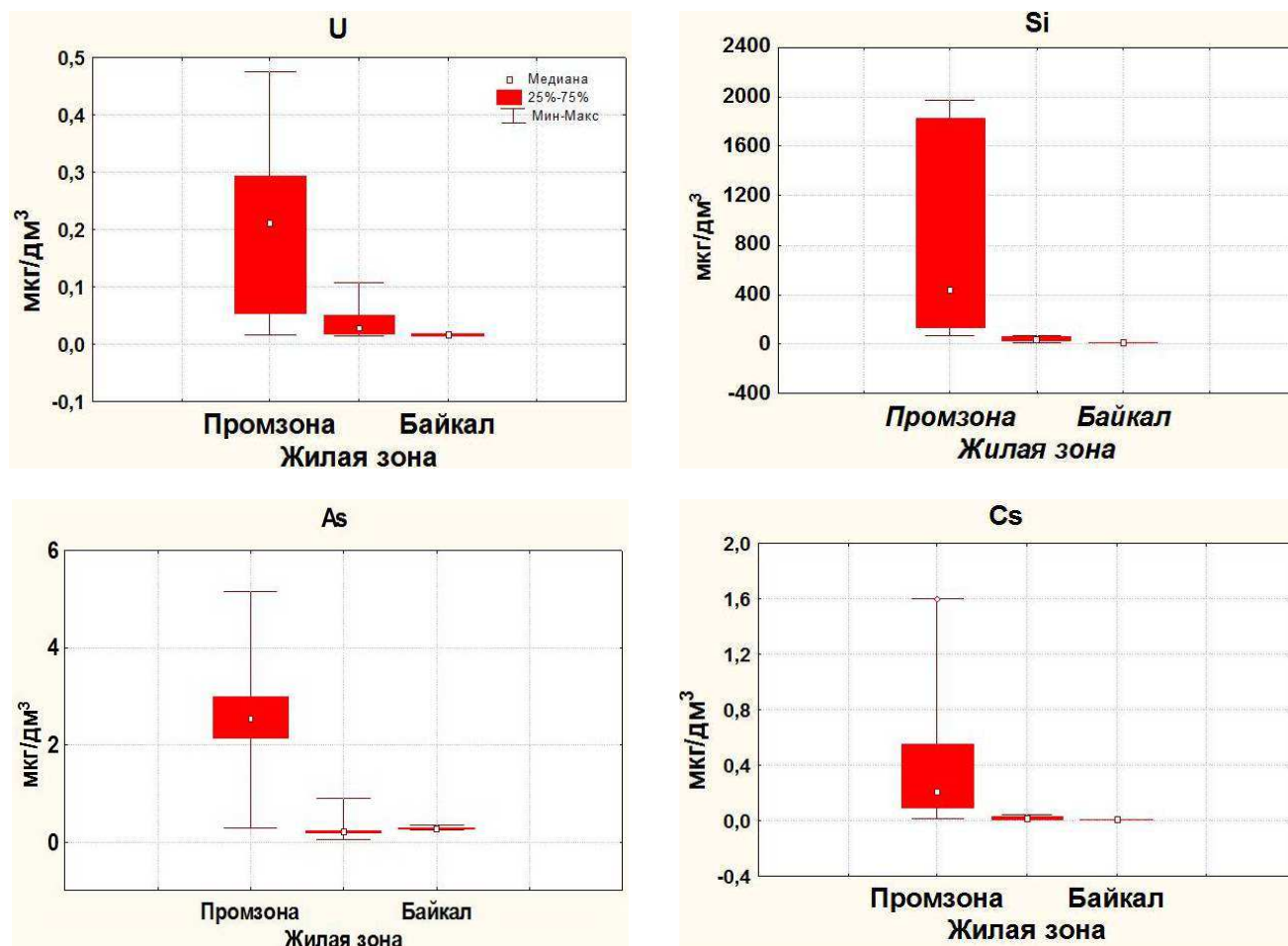


Рис. 36. Уровень содержания U, Si, As и Cs в снеговой воде различных по техногенной нагрузке зон г. Ангарска и оз. Байкал (условно фоновый район).

- Повышенные содержания тория, урана, а также значения уровня мощности экспозиционной дозы гамма-излучения (МЭД) характеризуют почвенный покров

урбанизированной территории г. Иркутска относительно почв из его окружения. В зонах техногенеза выявлены наибольшие содержания тория и урана, указывающие на локальные, различные по своей специфике источники привноса радиоэлементов в окружающую среду.

Отклонение торий-уранового отношения от нормального (3.5-5), так же, как и отношения изотопов $^{232}\text{Th}/^{226}\text{Ra} < 1$ в почвах, является индикатором техногенной эмиссии данных радиоэлементов. Городским почвам зон техногенеза свойственна «урановая природа», т.е. преобладание урана по сравнению с торием. «Ториевая природа» характерна для антропогенно измененных почв сельскохозяйственного назначения, что возможно связано с применением органических удобрений.

Исследования содержаний радиоактивных элементов по почвенным разрезам показывают, что максимальное количество радионуклидов аккумулируется в гумусовом горизонте почвы на глубине 0-5 см., исключая верхний дерновый слой (Рис. 37). Значения рядом с колонками на рисунке обозначают содержания тория и урана – средние значения в выборке.

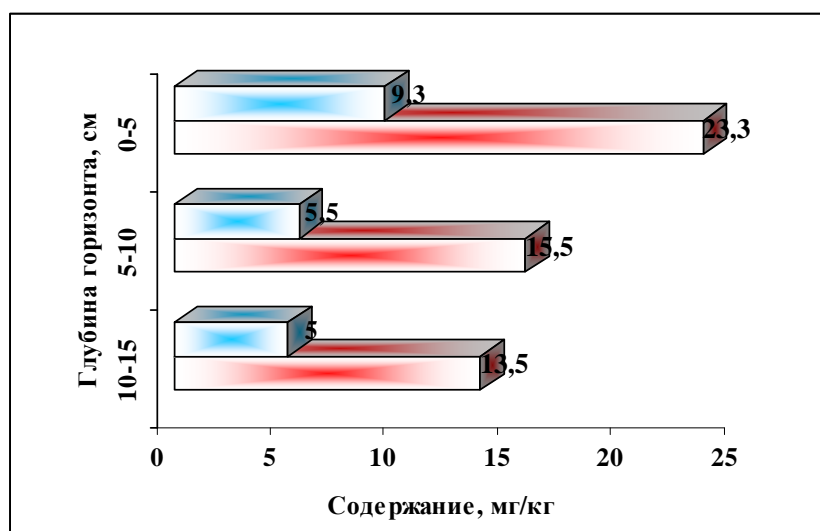


Рис. 37. Характер распределения Th (■) и U (■) в почвенном профиле в Иркутске-II, возле взлетной полосы авиазавода «Иркут».

- В городе Черемхово Иркутской области полученные данные исследований по содержаниям урана и тория позволили рассчитать техногенную нагрузку этих металлов за зимний период года: со снеговой водой на поверхность поступает 0.10-0.18 г/км² тория и 0.16-0.47 г/км² урана. На два порядка и более металлы поступают на поверхность с твердой фазой снега (г/км²): 91-437 тория и 45-131 урана.

Становится очевидным, что основной вклад в загрязнение почв г. Черемхово этими металлами вносят твердые продукты сжигания каменного угля. Здесь же установлен достаточно высокий положительный коэффициент корреляции урана и тория с ртутью, который составляет 0.7. Это свидетельствует об общем источнике их поступления в результате сжигания угля.

В результате проведенных исследований установлен характер распределения урана и тория в почвах г. Черемхово и его окрестностей (на глубине 5-10 см), который показывает особенности локального загрязнения почв данной территории. Повышенные содержания урана приурочены к зоне воздействия предприятий энергетики (ТЭЦ-12) и транспорта, связанных со сжиганием угля, и к частному сектору территории города (Рис. 38).

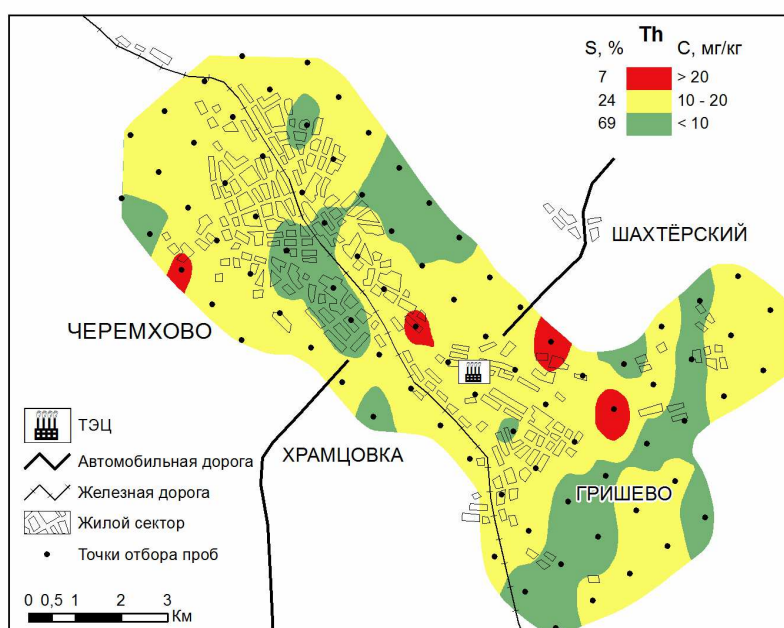


Рис. 38. Распределение концентраций Th в почвах г. Черемхова.

Повышенные содержания тория имеют более широкий ареал распространения в почвах, что обусловлено не только его поступлением из антропогенных источников, но также и влиянием коренных пород (геохимическими особенностями региона). В настоящее время загрязнение почв ураном и торием мало отражается на таком показателе, как Th/U-отношение. Нарушение данного отношения отмечается лишь на отдельных локальных участках

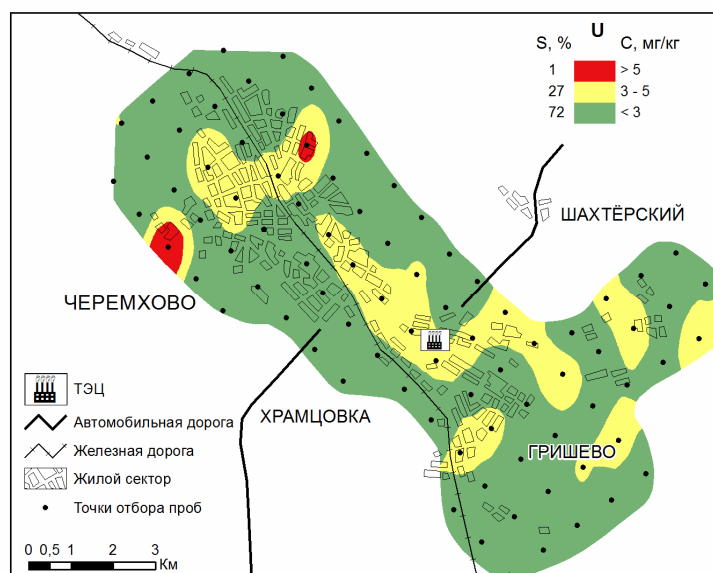


Рис. 39. Распределение концентраций U в почвах г. Черемхова

Блок 2. Трансформация биогеохимических процессов в системе почва–растение в техногенных ландшафтах Южного Прибайкалья (отв. исполнитель к.г.-м.н. Г.А Белоголова).

- Изучено влияние ризосферных бактерий *Azotobacter* и *Bacillus* на фазовое состояние As и Hg непосредственно в ризосферной части почв и их аккумуляцию в растениях, выращенных на техногенных почвах с различными концентрациями этих элементов. Установлено различное поведение As и Hg в органическом веществе почв. Увеличение содержаний ртути в ризосфере наблюдается в гуминовых кислотах, а мышьяк в основном связан с наиболее подвижными формами фульвокислот.

Результаты модельного эксперимента указывают на способность ризосферных бактерий связывать мышьяк в ризосфере техногенных максимально загрязненных почв, уменьшая поступление мышьяка в растения. Таким барьером могут являться низкомолекулярные органические соединения As хелатного типа, выделенные из почв ризосферы в вытяжке этилендиаминтетраацетатом натрия ЭДТА. Эти соединения мышьяка могут накапливаться на клетках почвенных бактерий, создавая барьер для поступления его в растения, что может иметь большое значение для разработки новых экобиотехнологий.

На максимально загрязненных почвах ризосферы участка 4 установлено значительное увеличение содержаний As в органических соединениях, выделенных ЭДТА и резкое снижение концентраций мышьяка в растениях, а

высокая корреляционная зависимость этих двух параметров указывает на максимальное влияние фракций ЭДТА ризосферы на бионакопление мышьяка (Рис. 40).

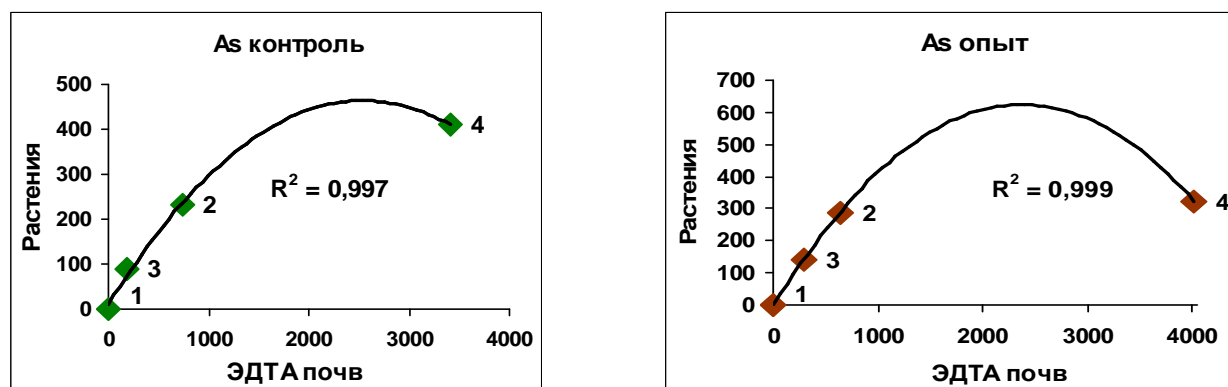


Рис. 40. Зависимость среднего содержания As (мг/кг сухого вещества) в растениях от концентрации As во фракции ЭДТА ризосферной почвы (мг/кг) контрольного и опытного экспериментов. Участки: 1 – условно фоновый; 2 – в 500 м; 3 – в 100 м; 4 – в 10 м от источника загрязнения.

- Изучены особенности миграции ртути в системе «почва-растение» на территории «Усо́льехимпрома» и в окрестностях г. Усо́лья-Сиби́рского. Показано, что биодоступность ртути зависит от различных факторов – вида растения, биоаккумулирующей способности различных органов, степени загрязнения и форм нахождения Hg в почвах. Результаты фракционирования форм ртути показали, что ртуть в почвах находится преимущественно в органической и прочносвязанной фракциях. Органические соединения Hg в почве, количества которых находятся в пределах 15-61 %, имеют решающее значение в её биодоступности. На это указывает установленная значимая корреляционная связь ($R = 0.91$, $p = 0.033$) между органическими формами ртути в почвах и средними содержаниями ее в травах (Рис. 41) Таким образом, одним из основных источников поступления ртути в растения являются ее органические формы в почвах.

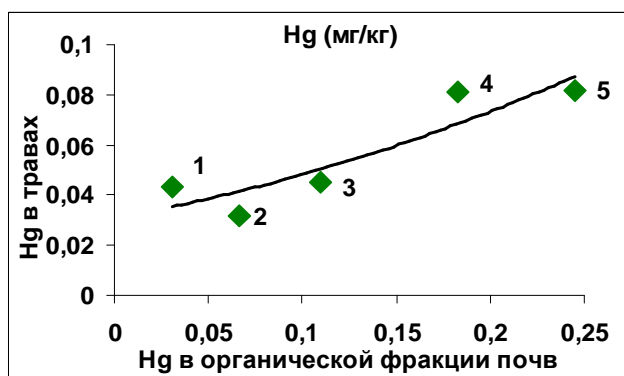


Рис. 41. Зависимость содержаний Hg в органической фракции почв и концентрациями ее в травах, мг/кг (сухой массы). Участки: 1-3 – в 1.5 км от цеха ртутного электролиза; 4 – в 2 км от цеха; 5 – окрестности г. Усо́лье-Сиби́рского.

Блок 3. Изучение эволюции водных экосистем Прибайкалья с различной геохимической обстановкой и техногенной нагрузкой (отв. исполнители к.б.н. М.В. Пастухов, к.г.-м.н. О.А. Склярова).

• На основе опубликованных к настоящему времени наиболее представительных данных и наших результатов исследования сделана экспертная оценка достоверных интервалов базовых уровней (БУ) 58 элементов в водной массе озера Байкала (Рис. 42). Этот способ представления БУ в наибольшей степени соответствует статистической природе концентраций элементов и различиям в результатах разных методологий.

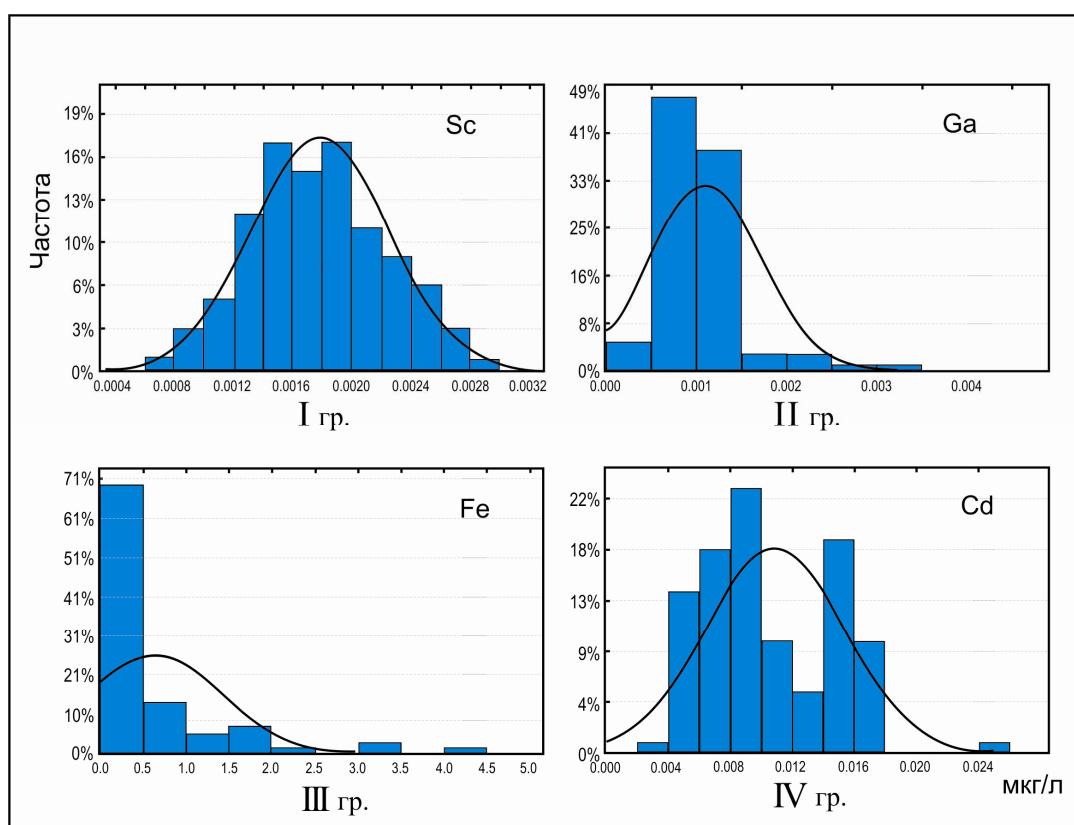


Рис. 42. Статистическое распределение представителей четырех групп элементов: Sc – I группа, нормальное распределение; Ga – II группа, асимметричное распределение; Fe – III группа, неравномерное распределение; Cd – IV группа, двумодальное распределение.

Все определяемые нами элементы разделены на пять групп. Элементы I группы имеют равномерное распределение по всей толще байкальской воды, для них получены близкие результаты во всех исследованиях (Li, B, Sc, V, Ni, Cu, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Mo, Sb, Ba, Tl, U). Ко II группе нами отнесены элементы, концентрации которых в озерной воде близки, либо ниже соответствующих пределов определения (Be, Ti, Co, Ga, Ge, Zr, Ag, Sn, Cs, Th, Hg). К III группе относятся элементы-гидролизаты Al и Fe, образующие коллоиды гидроокислов различного размера,

имеющие очень неравномерное распределение в байкальской воде. В эту группу включены также биогенные элементы Mn и P, содержание которых в озерной воде может зависеть от наличия и массы планктона и заметно меняться в зависимости от глубины, места и времени отбора проб. IV группа — это элементы Zn, Cd и Pb, для которых характерен широкий диапазон концентраций вследствие неконтролируемого загрязнения на этапах отбора и подготовки проб. Сравнение принятых нами оценок БУ элементов в Байкале с фоновым содержанием химических элементов в незагрязненных пресных поверхностных водах планеты свидетельствует о принадлежности Байкала к наиболее чистым водоемам биосферы.

- Методом термодинамического моделирования равновесий в системе вода-порода-органические кислоты исследовалось влияние последних на перераспределение Ca и Mg между раствором и твердой фазой в связи с использованием кальцитов переменного состава $\text{Ca}_x\text{Mg}_{1-x}\text{CO}_3$ в качестве индикаторов палеоклиматических обстановок (Рис. 43). В термодинамической модели высокомолекулярные гумусовые кислоты (сумма фульво- и гуминовых) были представлены как набор независимых металлсвязывающих центров, поэтому их количество задавалось, исходя из принятого значения плотности связывающих протон или металл позиций. Численная реализация нескольких геохимических ситуаций по осаждению/растворению кальцитов разной магнезиальности показала, что основной эффект присутствия фульво- и гуминовых кислот состоит в подкислении растворов и снижении устойчивости карбонатов. Несмотря на то, что гумусовые кислоты могут играть важную роль в фиксации Ca и Mg и удалении их из раствора, при реальных их концентрациях в природных средах ($\ll 1$ г/л), это не приводит к значимым изменениям состава фаз $\text{Ca}_x\text{Mg}_{1-x}\text{CO}_3$. В то же время количественно продемонстрировано, что на вариации отношений Mg/Ca в растворе и твердой фазе значимо влияют другие процессы, такие, как испарительное концентрирование пересыщенных по Mg растворов, подщелачивание/подкисление в процессе их эволюции или вариации содержаний CO_2 , связанных с изменением климата и функционированием озер.

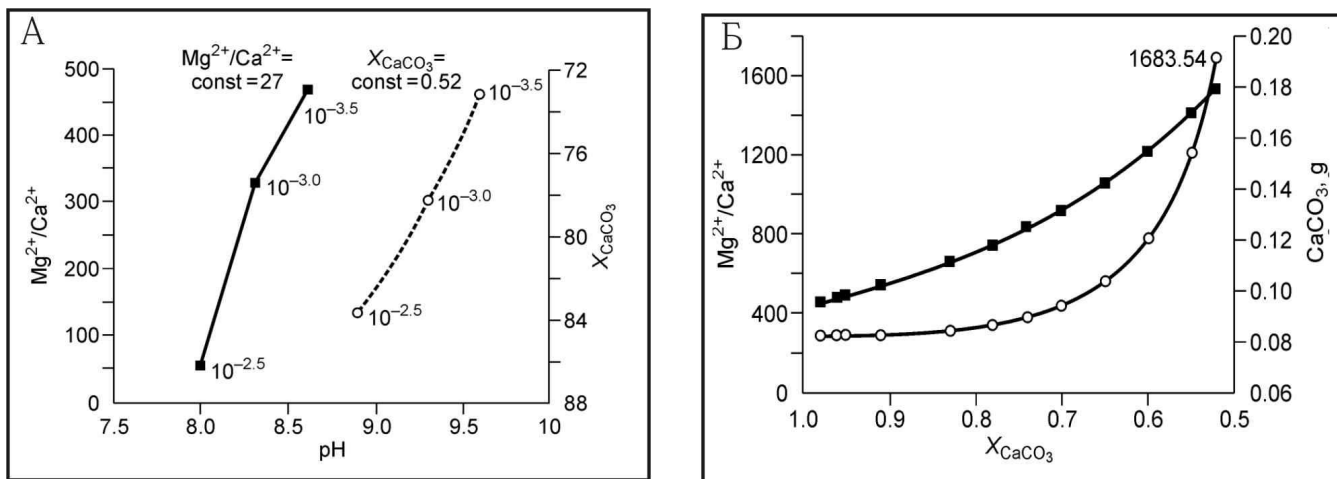


Рис. 43. Термодинамическая модель равновесий в системе вода-порода-органические кислоты на примере оз. Саган-Тырм (Приольхонье) А) Изменение состава твердых растворов в зависимости от CO_2 . Б) Зависимость отношения Mg^{2+}/Ca^{2+} от состава кальцитов $CaCO_3$ по мере испарительного концентрирования вод озера.

• На примере эндемичных обитателей оз. Байкал рогатковидных рыбах и амфиподах показано, как кардинально отличающаяся среда обитания (открытые воды и донные осадки озера) влияет на уровни накопления ртути гидробионтами в природном водоеме, слабо подверженном техногенному воздействию. Установлено, что глубоководные рыбы, обитающие на дне озера, накапливают ртуть на порядок больше, чем пелагические (Рис. 44). Такие значительные отличия обусловлены как разными концентрациями общей ртути в воде и донных осадках и поступлением ртути в придонный слой в результате активности разломов, так и процессами метилирования ртути, преимущественно проходящих в анаэробных

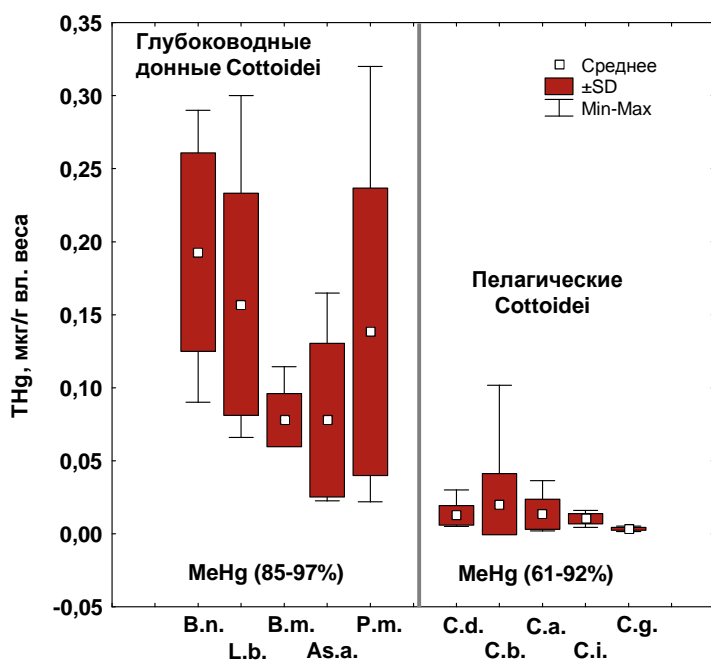
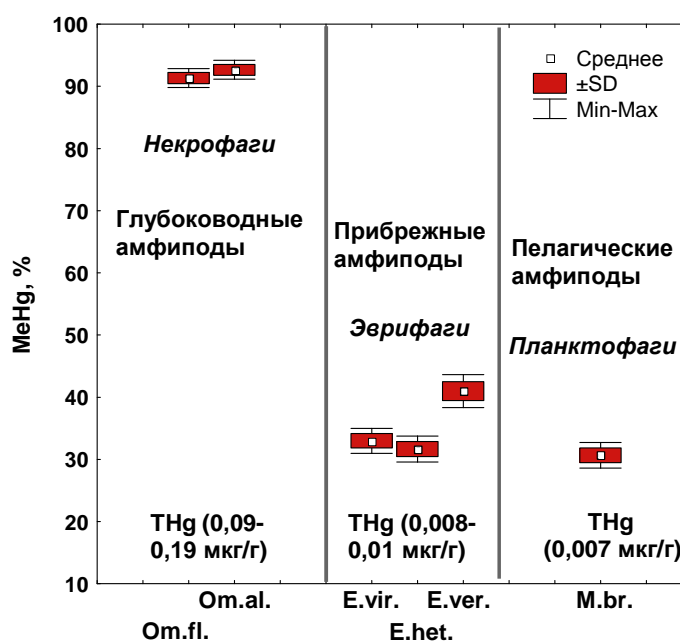


Рис. 44. Биоаккумуляция общей ртути (THg) байкальскими рогатковидными рыбами (Cottoidei) из различных биотопов. B.n. – *Batrachocottus nikolskii*, B.m. – *B. multiradiatus*, L.b. – *Limnocottus bergianus*, As.a. – *Asprocottus abyssalis*, P.m. – *Procottus major*, C.d. – *Comephorus dybowski*, C.b. – *C. baicalensis*, C.a. – *Cottocomephorus alexandrae*, C.i. – *C. inermis*, C.g. – *C. grewingkii*.

условиях на дне озера. В объектах питания пелагических рыб (зоопланктоне, пелагических амфиподах и молоди рыб) доля MeHg заметно ниже (от 16 до 37%), чем у аналогичных глубоководных донных обитателей (от 30 до 92%), что, несомненно, сказывается и на уровне аккумуляции MeHg рыбами из разных биотопов (Рис. 44).

Накопление ртути байкальскими амфиподами, занимающими различные экологические ниши, прежде всего, зависит от их диеты, а, следовательно, и от их трофического уровня (Рис. 45).

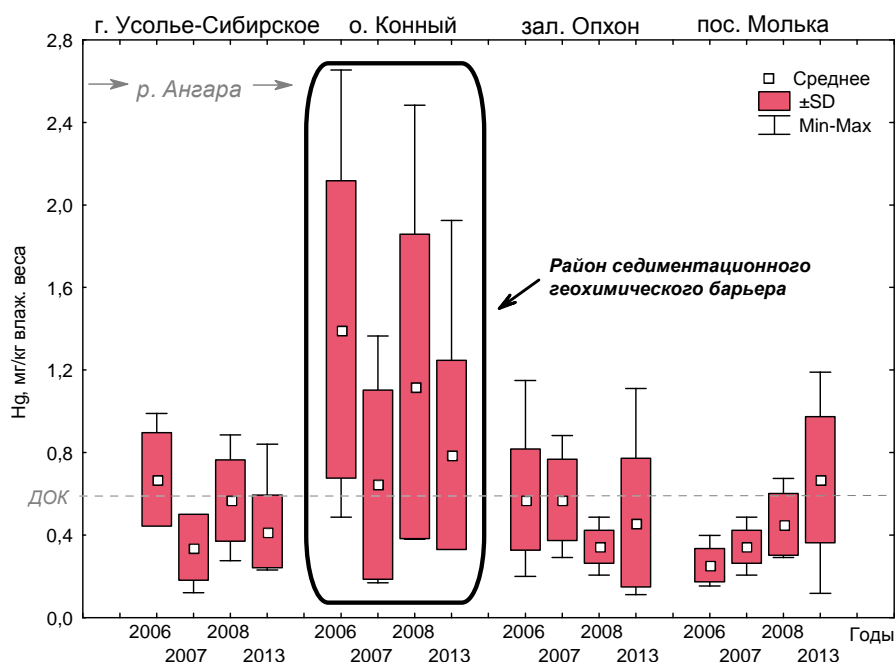
Рис. 45. Биоаккумуляция метилртути (MeHg) в байкальских амфиподах, занимающих различные экологические ниши.
 Om. fl. – *Ommatogammarus flavus*,
 Om.al. – *O. albinus*,
 E.vir. – *Eulimnogammarus viridis*,
 E.het. – *E. heterochirus*,
 E.ver. – *E. verrucosus*,
 M. br. – *Macrohectopus bra.*



Так, например, представители рода *Ommatogammarus*, являясь облигатными некрофагами, питаются трупами погибших животных, преимущественно рыб, которые уже содержат высокие процентные концентрации MeHg (до 95 %), имеют самые высокие уровни биоаккумуляции ртути среди амфипод. В то время, как в пелагических амфиподах *Macrohectopus branickii* обнаружены самые низкие уровни аккумуляции ртути (Рис. 45), т.к. объектами питания этих ракообразных является фито- и зоопланктон, накапливающие ртуть в низких концентрациях и с малой долей MeHg (8 и 16 %, соответственно). Таким образом, биотоп обитания, трофический уровень гидробионтов и объектов их питания являются основополагающими факторами биоаккумуляции ртути.

• Продолжены исследования, направленные на выявление внутренних и внешних факторов, определяющих поведение ртути в экосистемах водоемов Байкало-Ангарской водной системы. На примере техногенно загрязненного Братского водохранилища показано, что наибольшие уровни аккумуляции ртути зообентосом и рыбами соответствуют зоне основного седиментационного барьера верхней части водохранилища (о. Конный), что указывает на усиление процессов метилирования в донных осадках этого района (Рис. 46).

Рис. 46. Многолетняя динамика аккумуляции Hg речным окунем в верхней части Братского водохранилища. г. Усолье-Сибирское – 98 км по судовому ходу (с.х.); о. Конный – 150 км с.х.; зал Опхон – 180 км с.х.; пос. Молька – 230 км с.х.



Данный факт косвенно подтверждают и микробиологические исследования, показавшие существенное увеличение активности процессов сульфатредукции в донных осадках этого района. В барьерной зоне водохранилища большая часть ртути, сорбированной на тонкой взвеси, выводится из водной толщи в осадок, образуя зоны наибольшего загрязнения и максимального содержания летучих форм ртути в воде.

Таким образом, многолетние исследования ртутного загрязнения Братского водохранилища с одной стороны показали важную роль седиментационных геохимических барьеров в процессах самоочищения водной среды и буферирования в донных осадках, с другой – позволили рассматривать барьерную зону как основной источник вторичного загрязнения.

• Продолжены исследования состава вод притоков р. Ангара с целью выявления основных факторов, влияющих на формирование химического состава вод. Гидрохимические исследования воды р. Куда и поверхностных вод ее бассейна позволили выявить природные и антропогенные факторы формирования и трансформации их химического состава. Поверхностные воды бассейна р. Куда разнообразны по своему химическому составу. Здесь встречаются реки с водой малой минерализации ($TDS < 200 \text{ мг/дм}^3$) – р. Верхняя Хага, р. Куяда, р. Большой Кот; средней минерализации ($TDS = 200-500 \text{ мг/дм}^3$) – р. Молька, р. Дундайка, р. Мурин, р. Баяндайка); повышенной минерализации ($TDS = 500-1000 \text{ мг/дм}^3$) – р. Оек; высокоминерализованной ($TDS > 1000 \text{ мг/дм}^3$) – р. Орда, р. Ишин-Гол, р. Каменка. По классификации Алекина они принадлежат к классам гидрокарбонатных, сульфатно-гидрокарбонатных и гидрокарбонатно-сульфатных вод. В большинстве случаев преобладающим катионом является кальций. Исключение представляют воды р. Орда и ее притока Ишин-Гол, в которых доля ионов магния превалирует над долей кальция (Рис. 47).

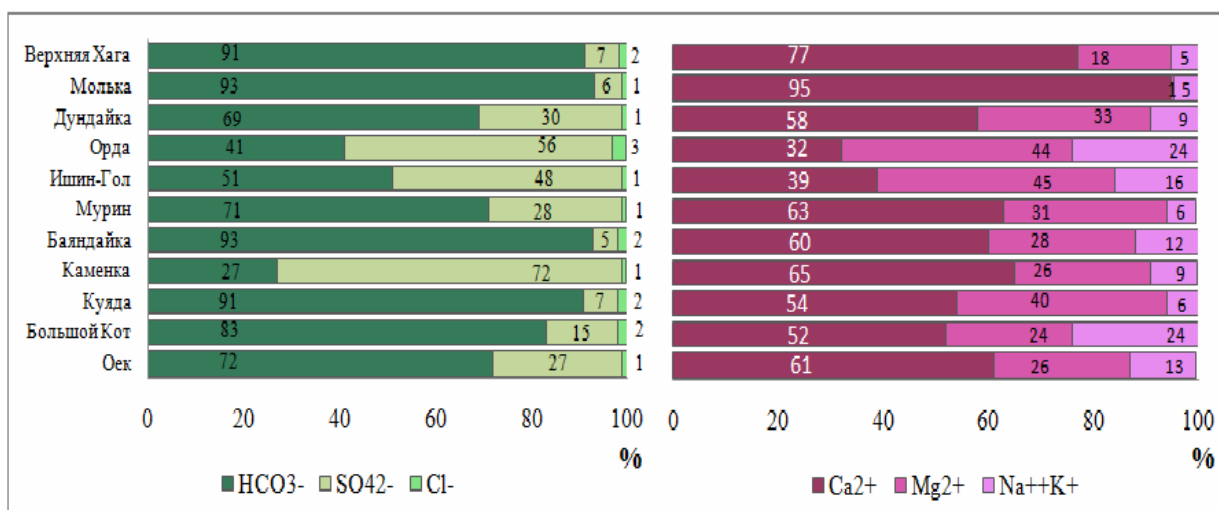


Рис. 47. Соотношения анионов и катионов в поверхностных водах бассейна р. Куда.

В верхнем течении р. Куда на ионный состав воды большое влияние оказывают распространенные здесь грунтовые воды сульфатного магниево-кальциевого состава. В среднем течении реки происходит резкое возрастание концентраций хлорид-ионов и натрия, поступающих, возможно, с поверхностным стоком с засоленных почв. В нижнем течении воды р. Куда разбавляются

маломинерализованными водами притоков (Куяда, Большой Кот), в результате чего происходит снижение минерализации и концентраций всех основных компонентов. Вместе с тем на этом участке происходит значительный рост биогенных компонентов, источниками которых служат поселки, животноводческие комплексы и сельхозугодья, расположенные в бассейне реки (Рис. 48).

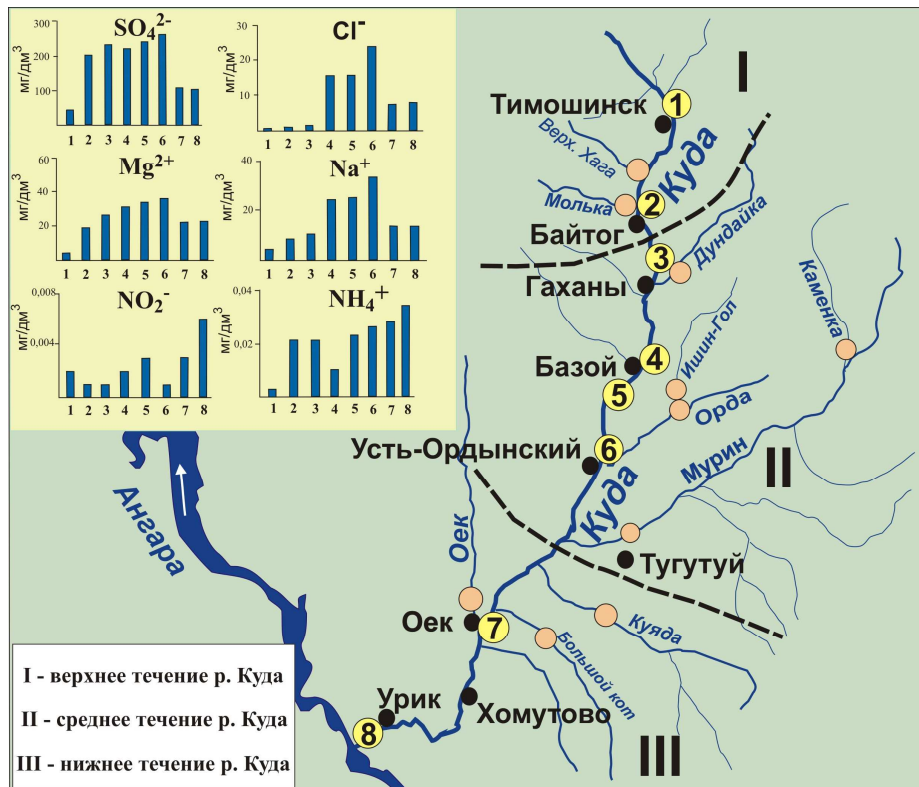


Рис. 48. Карта-схема отбора проб поверхностных вод бассейна р. Куды и динамика макро- и биогенных компонентов в воде р. Куды по течению: 1-8 – станции отбора проб на р. Куды.