
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 7.12.2. ГЕОХИМИЯ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ СИБИРИ

Проект 7.12.2.1. ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И МИГРАЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГЕОХИМИЧЕСКИХ ЦИКЛАХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА

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

Блок 1. Долговременные геохимические наблюдения окружающей среды на опорных станциях, профилях, водохранилищах и других объектах с целью определения путей миграции химических элементов и уровней их накопления (отв. исполнители: д.г.-м.н. В.И.Гребенщикова, к.г.-м.н. Г.П.Королева, к.б.н. Т.П.Виноградова)

- **Геохимический мониторинг истока р. Ангары.** Исток р. Ангары отражает суммарный химический состав воды озера Байкал, что представляет интерес с точки зрения возможного природного изменения состава воды со временем, загрязнения озера в связи с интенсивным развитием туристического бизнеса по всей акватории озера или влиянием промышленных предприятий, расположенных в ближайшем его окружении. По изменчивости состава воды истока можно выявить природные или антропогенные факторы и причины, влияющие на изменение химического состава. Полученные данные (1997-2009 гг.) химического состава воды отражают отсутствие серьезного антропогенного воздействия на оз.Байкал, допускающего значительные изменения состава воды по ионному, редкоэлементному составу и минерализации. В течение всех лет изучения вода истока р. Ангары имеет низкую минерализацию и гидрокарбонатно-кальциевый состав. Сумма ионов за период исследований варьирует от 89,8 до 102,4 мг/л. Можно отметить слабо выраженный положительный тренд. Характерной чертой поведения макрокомпонентов в воде истока р. Ангары за 12-летний период исследований является постоянство ионного состава, о чем свидетельствует незначительный диапазон колебаний содержаний главных ионов и их суммы. Изучение микроэлементного состава воды истока р. Ангары показало, что большинство микроэлементов находится в воде в очень низких концентрациях или на пределе обнаружения. Распределение их за 2006-2009 гг. довольно равномерное и каких-либо резких различий по годам не отмечается.

- **Геохимический мониторинг снегового покрова Иркутской области.** Станциями наблюдения охвачены практически все основные виды ландшафтов Южного Прибайкалья и весь диапазон атмосферной техногенной нагрузки – от фоновой до селитебно-индустриальной. Мониторинг снегового покрова проводится с 1994 г. Отбор проб снега начинается до начала уплотнения снегового покрова и снеготаяния (с 20 февраля по 15 марта). Расстояние пунктов пробоотбора от транспортных магистралей составляло не менее 100 м. До 2007 г. снегогеохимический мониторинг проводился на 36 станциях. Начиная с 2008 г., территория опробования значительно расширилась (Рис. 54). По основным металлам-экотоксикантам (Hg, Pb, Be, As, Cd) повышенными содержаниями выделяются города Усолье-Сибирское, Зима, Шелехов и Свирск. Особое внимание было уделено изучению ртутного загрязнения. Содержания ртути в снеговой воде было ниже, чем в предыдущие годы, в связи с закрытием цеха ртутного электролиза в 1998 г. При пределе обнаружения 0,0005 мкг/л содержания ртути в снеговой воде колеблются от 0,0007 до 0,13 мкг/л. Максимальные содержания отмечены в г. Усолье-Сибирское. В твердой фазе снега содержания ртути находятся в диапазоне от 0,06 до 337 мкг/г, максимальные содержания отмечены в городах и местах с большой запыленностью (Усолье-Сибирское, Свирск). Необходимо отметить, что видимой корреляции ртути с органическим веществом (сажа) в твердой составляющей снега не наблюдается.



Рис. 54. Схема опробования снегового покрова – 2007-2009 гг.

Средние содержания основных макрокомпонентов в снеговой воде ниже известных ПДК для питьевых вод. Содержания большинства микроэлементов в снеговой воде городов имеют один порядок величин и не превышают значений ПДК для питьевых вод.

Для оценки валового поступления загрязняющих веществ в зимний период на подстилающую поверхность были рассчитаны уровни накопления металлов. По большинству металлов-экоотоксикантов отличается г. Усолье-Сибирское, где максимальные уровни накопления отмечены для полиметаллов, никеля, хрома, кадмия и ртути.

Величина запыленности снегового покрова в Ангарске, Байкальске, Слюдянке, Зиме, Саянске, Залари, Черемхово и в заливе Мандархан (озеро Байкал) изменяется от 0,7-7,7 г/м², а в крупных промышленных городах – Иркутск, Шелехов, Усолье-Сибирское, Свирск составляет в среднем 71,168 г/м² (Рис. 55).

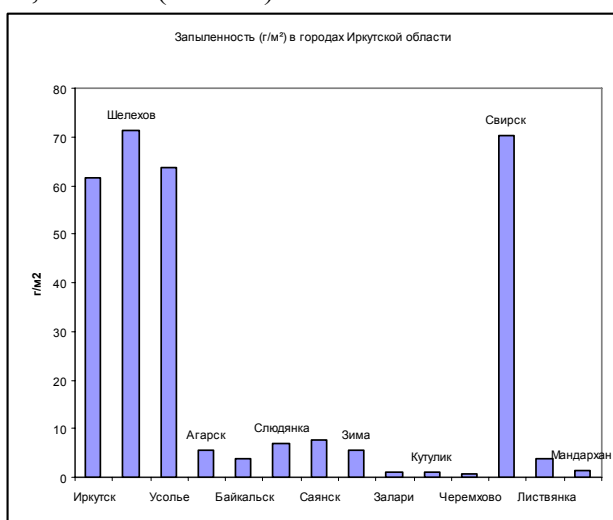


Рис. 55. Уровень запыленности в городах и поселках Иркутской области за зимний период 2009 г.

По микроэлементному составу различия в содержаниях элементов в снеговой воде г. Иркутска в сравнении сегодняшнего и регионального фона 1992 г. менее значимые, чем по макрокомпонентам. Так, на прежнем или близком уровне остались содержания в снеговой воде Be, Fe, Cd, Mn, As, Pb, Co, Ni. При этом в 10 раз увеличилась концентрация Mo, в 4 раза – Zn, в 2 раза – Cu.

Чистой по содержаниям микроэлементов является снеговая вода в заливе Мандархан озера

Байкал. Однако по сравнению с фоновым Мандарханом г. Иркутск накапливает в снеговой воде многие элементы – Mo, Be, Ni, Cu, Co и другие (Рис. 56), но концентрации их ниже ПДК питьевых вод.

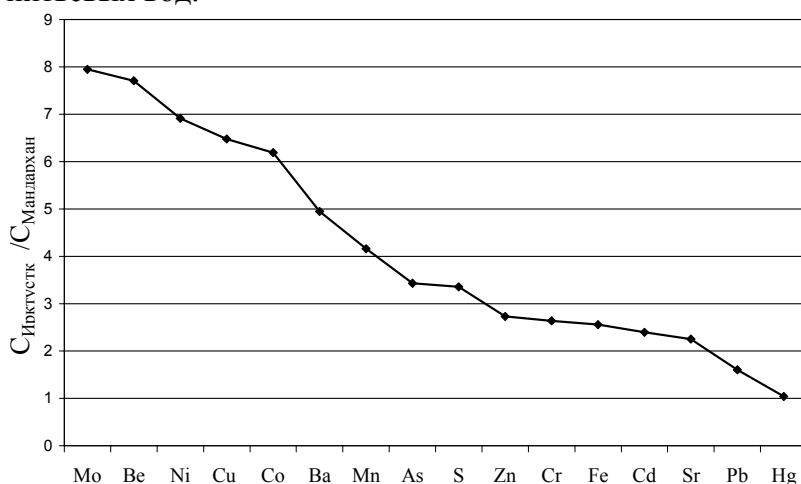


Рис. 56. Сравнительный тренд микроэлементного состава снеговой воды г. Иркутска относительно снеговой воды залива Мандархан (оз. Байкал) в 2009 г.

Снеговая вода в районе бензозаправок обогащена многими макро- и микроэлементами, которые поступают преимущественно за счет влияния автомобильного транспорта. Это преимущественно касается Sr, Fe, Mn, Cu, а также S, U, Th.

Исследования летних атмосферных осадков (дождь) проводилось на 8 станциях Гидрометеослужбы Приангарья и в районе Академгородка. За 2007-2009 гг. отобрано и проанализировано около 100 проб дождя. Все они, как и снеговая вода, относятся к низкоминерализованным водам (до 30 мг/л) гидрокарбонатно-сульфатного кальций-магниевого типа за исключением дождей в г. Шелехов, где обнаружены в повышенных содержаниях F и Cl. Некоторые пробы дождя в Ангарске и Усолье-Сибирском попадают в разряд высокоминерализованных атмосферных вод (> 100 мг/л). По основным металлам-экоотоксикантам также, как по снеговой воде, выделяются города Черемхово, Усолье-Сибирское, Шелехов, Свирск. Поселок Листвянка, расположенный в истоке р. Ангары, по направлению преобладающих ветров от промышленных центров Приангарья в сторону оз. Байкал и являющийся местом паломничества автотуристов, характеризуется более высокими содержаниями в атмосфере таких элементов, как свинец и цинк и сравним по ним с промышленными городами.

• **Гидрохимический мониторинг Братского водохранилища.** С целью определения техногенной и природной составляющих поступления элементов акватория Братского водохранилища была условно разделена на 3 зоны (Рис. 57).

Верхняя часть (техногенная зона I). Это наиболее неблагоприятная часть Братского водохранилища. Здесь сосредоточена крупная городская агломерация Иркутской области с населением 1,2 млн. человек и территорией промышленной зоны.

Средняя часть (зона II). Протяженная зона, вне явного влияния промышленных объектов. Выделение этой зоны связано с тем, что на этом участке отмечены узкие, локальные аномалии концентраций многих элементов, соизмеримые, а порой и многократно превышающие их содержания в областях размещения техногенных источников в верхней части водохранилища. Эти аномалии обусловлены подтоком высокоминерализованных вод, поступающих по зонам тектонических нарушений из нижележащих соленосных отложений усольской свиты нижнего кембрия.

Нижняя часть (зона III) испытывает влияние техногенной нагрузки за счет недостаточно очищенных сточных вод промышленных предприятий г. Братска, а также коммунальных сточных вод города и прилегающих территорий. К ней относится Окинское расширение Братского водохранилища, вода которого может быть загрязнена стоками притока р. Ангары – р. Ока.

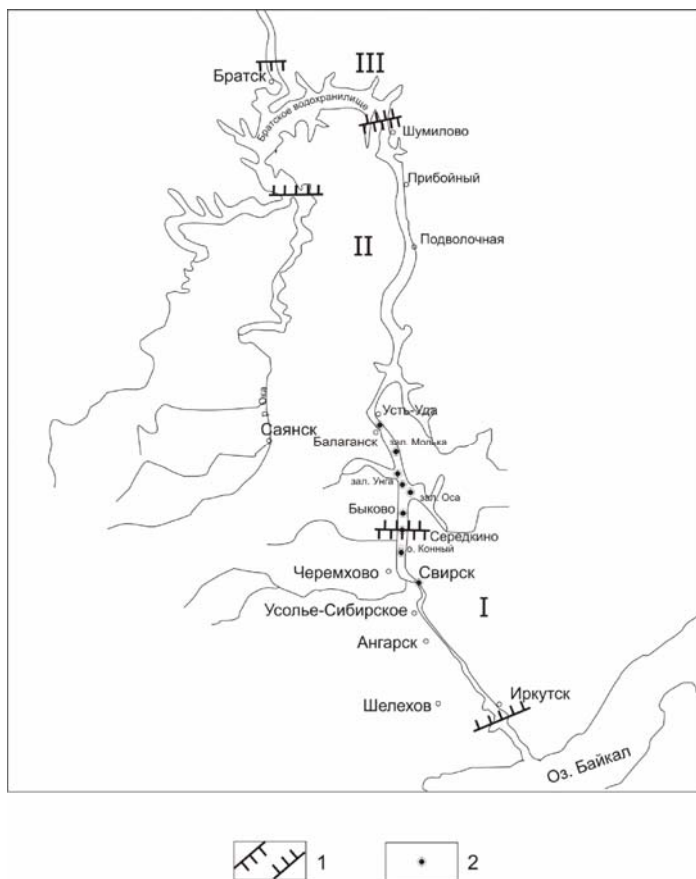


Рис. 57. Условно выделенные зоны поступления техногенных микроэлементов в акваторию Братского водохранилища. 1 – границы зон; 2 – опорные точки отбора проб воды. I – зона с высокой техногенной нагрузкой, II – зона с относительно невысокой техногенной нагрузкой, III – зона с повышенной техногенной нагрузкой.

Проведенные исследования показали, что содержания большинства химических элементов в водах Братского водохранилища не превышают ПДК рыбохозяйственного назначения (ПДК_{рбх}) и соизмеримы с содержаниями в речных водах региона. Выделенные техногенные зоны (верхняя: г. Иркутск – г. Свирск и нижняя – район г. Братска) мало отличаются, как по макро-, так и по микроэлементному составу от наиболее «чистой» зоны Ангарского сужения Братского водохранилища, где влияние техногенных источников наименьшее. Несмотря на это, при сопоставлении средних содержаний микроэлементов в загрязненных частях Братского водохранилища со средней частью следует отметить, что для нее характерны более высокие содержания в воде Mn, Zn, V и Hg. Площади аномальных содержаний этих элементов четко приурочены к промышленным комплексам г.г. Усоля-Сибирского и Свирска. Техногенные и природные потоки высокой контрастности характерны для Al, Ga, Ti и лантаноидов – La, Ce и Th. Сходные по поведению, но в то же время дающие менее контрастные потоки, элементы – Co, Ni, Cr, V, Cu, Tl, Be. Анализ карт распределения микроэлементов (в том числе и ртути) не дает надежных доказательств протяженного сноса при транспорте микроэлементов из зоны техногенного влияния. Полученные результаты свидетельствуют о наличии высокой самоочищающей способности водоема, которая обусловлена наличием геохимических барьеров по акватории Братского водохранилища. Следует также отметить, что во всех зонах эпизодически встречаются значительные величины концентраций микроэлементов (Mn, Hg, Zn, V, Al, Ti, Pb, Cd, Cu и др.).

Выявлены участки, где содержания элементов соизмеримы, а в некоторых случаях многократно выше, чем вблизи источников основного техногенного загрязнения. Изменение состава вод может быть обусловлено не только сбросами крупных предприятий химической промышленности г.г. Усоля-Сибирского, Саянска, но и существенным влиянием подтока высокоминерализованных подземных вод из соленосных отложений усольской свиты нижнего кембрия. В связи с этим необходимы дальнейшие исследования по уточнению роли эндогенной составляющей в общем балансе микроэлементов. Поступление ртути по зонам повышенной трещиноватости может найти подтверждение при детальном исследовании поведения в воде Братского водохранилища и других легко подвижных форм элементов. Кроме того, необходимы дальнейшие исследования по

изучению влияния многолетних и сезонных гидрогеологических факторов, форм транспорта и вывода элементов из водной среды, массообмена между водой и донным осадком – источником возможного вторичного загрязнения.

Распределение ртути в воде Братского водохранилища подчиняется установленным ранее закономерностям. Благодаря высокой самоочищающей способности водоема, прослеживается уменьшение содержаний ртути по его длине. Уже в точке, находящейся в 5 км по левому берегу от выпусков, содержание токсиканта в воде водохранилища уменьшается до $0,0044 \text{ мкг/дм}^3$ и становится близким к среднему значению по водохранилищу – $0,0040 \text{ мкг/дм}^3$.

При снижении концентраций ртути в водной фазе происходит ее накопление в донных отложениях, которые являются основным каналом «вывода» ртути из воды. Максимально высокие содержания ртути в донных отложениях (до 30-80 фоновых значений) приурочены к участку г. Усолье-Сибирское – г. Свирск. Повышенные содержания ртути выявлены в средних слоях керна донных отложений о. Конный, в этом районе предположительно находится седиментационный геохимический барьер (Рис. 58).

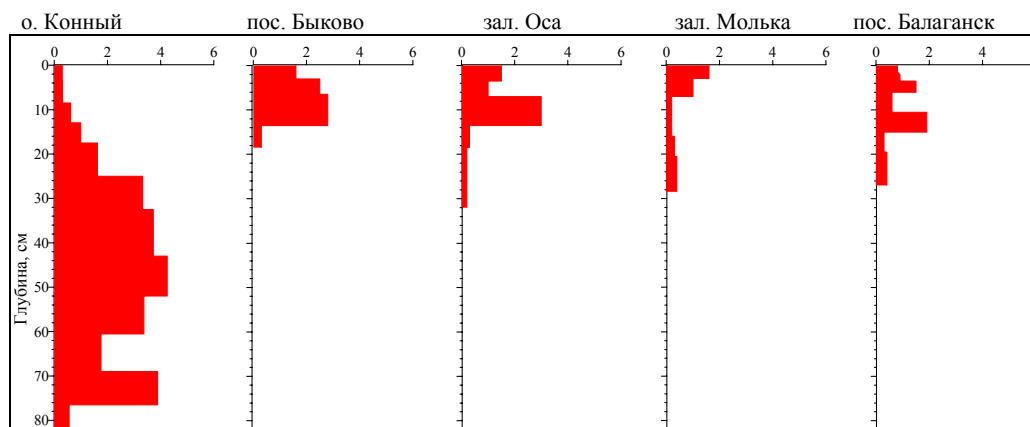


Рис. 58. Вертикальное распределение ртути в кернах донных осадков верхней части Братского водохранилища (станции расположены в порядке удаления от ООО «Усольехимпром» слева – направо).

В течение всего периода наблюдений отмечается отрицательная корреляция содержаний ртути в воде с уровнем воды в водохранилище. При более низком уровне фиксируются более высокие содержания, при более высоком – низкие. В районе о. Конный в 2007 г. (средний по водности год) концентрация ртути была близка к фоновому, в 2008 г. (маловодный год) содержание токсиканта увеличивается в два раза. В 2009 г. (многоводный год) происходит уменьшение концентрации элемента. В то же время, в точке, находящейся в 10 км ниже по течению от о. Конный в придонной воде зафиксировано значение ртути $1,5 \text{ ПДКрбх}$, и это показывает, что в маловодный год при поступлении накопленной в донных осадках ртути в водную фазу может происходить опасное вторичное загрязнение.

Уменьшение техногенной нагрузки после закрытия цеха ртутного электролиза и прекращения использования солей Hg^{+2} в качестве катализатора при производстве винилхлорида, не привело к коренному решению экологической проблемы (Рис. 59). Огромные объемы ртути, накопленные под цехом ртутного электролиза, шламонакопителе и донных осадках водохранилища, неизбежно становятся источниками вторичного загрязнения водной среды. Загрязненные ртутью коллекторные сети и очистные сооружения, также вносят существенный вклад в техногенную эмиссию этого токсиканта в экосистему водоема. В районе выпусков предприятия «Усольехимпром» содержание ртути достигает $8-10 \text{ ПДКрбх}$, дренажной канаве до $7-8 \text{ ПДКрбх}$. Большая часть ртути, поступающей со сточными водами, сорбирована на взвеси (физически и химически сорбированные формы), в связи с чем значительная ее часть оседает в непосредственной близости от источника загрязнения. Так, в 100 м от выпуска 2 содержание падает до $2-2,5 \text{ ПДК}$.

В распределении ртути отмечается выявленная ранее асимметрия. В левобережной части водохранилища вблизи предприятия содержания токсиканта на 1-2 порядка выше, чем в средней и правобережной части.

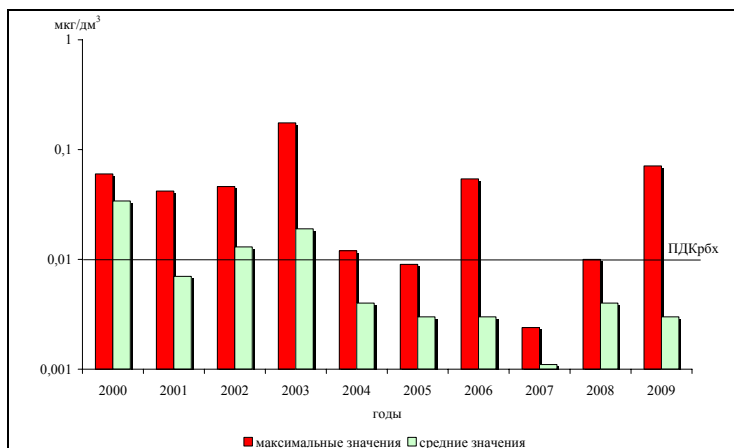


Рис. 59. Межгодовая динамика концентрации ртути в воде верхней части Братского водохранилища.

Таким образом, в течение всего периода наблюдений отмечается отрицательная корреляция содержания ртути в воде с уровнем воды в водохранилище ($r = -0,99$, $p < 0.0001$). Существует проблема вторичного загрязнения водной среды ртутью в результате десорбции и выхода ее мобильных форм из донных осадков с поровыми водами.

• **Изучение форм транспорта ртути со сточными водами ООО «Усольехимпром» в Братское водохранилище.** В рамках долговременного мониторинга ртутного загрязнения Братского водохранилища продолжались работы по контролю уровней содержания ртути в сточных водах ООО «Усольехимпром». В дополнение к основному регламенту (выпуска и дренажная канава) были опробованы промышленные воды и взвешенный материал коллекторной сети (кислотно-щелочной – КЩК и промышленно-ливневый – ПЛК коллекторы).

Таблица 4.

Количество растворенной (коллоидной, ионной) ртути в воде коллекторов, % от валового содержания

Объект исследования	Минимум	Максимум	Среднее
<i>КЩК</i>	44,7	99,5	29,7
<i>ПЛК</i>	54,5	85,4	36,1

Таблица 5

Количество сульфидной ртути в отложениях коллекторов, % от валового содержания

Объект исследования	Минимум	Максимум	Среднее
<i>КЩК</i>	1,4	64,0	35,1
<i>ПЛК</i>	4,9	44,4	28,3

Полученные данные по распределению содержаний ртути в коллекторной сети показывают наличие «ураганно» высоких концентраций этого металла как в воде, так и в отложениях, с диапазоном – от 0,1 мкг/дм³ до 1440 мкг/дм³ для воды и от 0,4 мг/кг до 164 мг/кг – для отложений. Установлено, что основная масса ртути (до 60-70%) по коллекторной сети переносится в виде взвеси. При разложении проб концентрированной HNO₃ и царской водкой было установлено, что до 64% ртути в отложениях коллекторной сети находится в сульфидной форме, при среднем значении 28 – 35%. Несмотря на то, что до попадания в р. Ангарау (Братское водохранилище) промышленные воды проходят очистку на станции нейтрализации и комплексных очистных сооружениях концентрация ртути в воде выпусков остается на высоком уровне. Установлено, что количество сорбированной ртути на взвеси сточных вод по сравнению с водами коллекторной сети химкомбината возрастает и в среднем колеблется в пределах до 65-95 % от валового содержания.

В дренажной канаве, представляющей собой искусственный ручей, дренирующий избыток воды из шламохранилища, накоплены большие запасы ртути в виде сульфида. Содержания ртути в воде дренажной канавы сопоставимы с содержаниями в выпусках, а количество сорбированной на

взвеси Hg составляет около 90%. Термический анализ форм нахождения ртути во взвеси выпусков и дренажной канавы однозначно свидетельствует, что основная масса металла здесь находится в физически сорбированном состоянии.

Установлено, что в среднем ежегодно в водохранилище поступает 50 тыс. тон сточных вод, в которых содержится около 2 тыс. тон взвеси, на которых, в свою очередь, сорбировано около 50 кг ртути. По средним оценкам рассчитано, что не более 25% ртути в экосистему Братского водохранилища поступает в сульфидной форме. Основная масса ртути, поступающей в водохранилище, находится в сорбированном виде на взвеси. Это, по-видимому, объясняет высокие содержания металла в биологических объектах водохранилища, как в зоне влияния сточных вод, так и на значительном удалении от места их сброса.

Таким образом, коллекторная сеть ООО «Усольехимпром» является транспортной «артерией» техногенного потока ртути с промышленной зоны Усольского химкомбината. Основная масса ртути физически сорбирована на взвеси сточных вод коллекторной сети и выпусков. Около 35% Hg в отложениях коллекторной сети находится в сульфидной форме. Не более 25% ртути попадает в водохранилище в сульфидной форме. Большая часть ртути, поступающая в водохранилище на взвеси, находится в формах, способных трансформироваться в водной среде и быть более биодоступной, в том числе и рыбе.

• **Влияние техногенного загрязнения промышленной зоны ООО «Усольехимпром» на водную растительность Братского водохранилища.** Известно, что высшие водные растения играют значительную роль в биогеохимическом круговороте химических элементов в водоемах, так как могут аккумулировать и переводить растворимые поллютанты в биологически связанное состояние. Они поглощают токсические вещества, включая многие тяжелые металлы, в том числе и ртуть. Ими специально, как объектом для исследований ртутного загрязнения в Братском водохранилище, практически не занимались, хотя они уже давно используются для биогеохимической индикации и биомониторинга загрязнения водных экосистем. Для определения уровня ртутного загрязнения Братского водохранилища летом 2007-2009 гг. были проведены сборы распространенных видов водных растений. В качестве фоновых отбирались пробы тех же видов из Иркутского водохранилища.

Сравнительный анализ содержания ртути в водных растениях, собранных в 2007 г. в разных местах Братского водохранилища, показал, что наибольшие показатели ртутного загрязнения отмечены в его верхней и окинской части, находящихся непосредственно под влиянием химических комбинатов «Усольехимпром» и «Саянскхимпласт». В средней и нижней частях водоема отмечены невысокие показатели загрязнения, что свидетельствует об ослаблении ртутной нагрузки в этих районах водохранилища (Рис. 60). Подобная картина распределения ртути по акватории Братского водохранилища наблюдалась и в 2008-2009 гг.

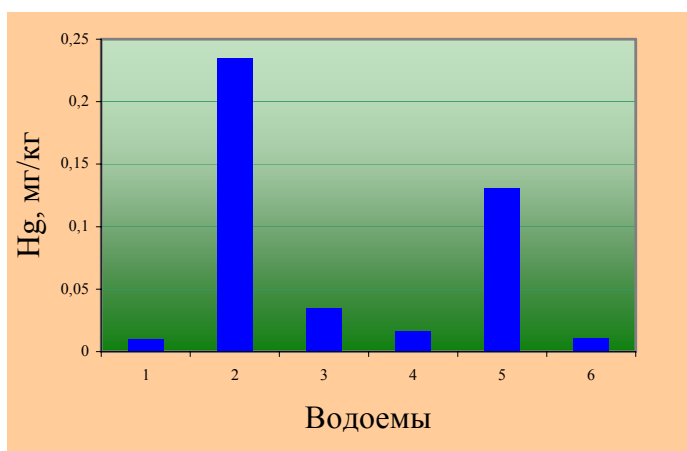


Рис. 60. Среднее содержание ртути в высших водных растениях Ангарских водохранилищ.

- 1 – Иркутское водохранилище;
- 2 – верхняя часть Братского водохранилища;
- 3 – средняя часть Братского водохранилища;
- 4 – нижняя часть Братского водохранилища;
- 5 – окинская часть Братского водохранилища;
- 6 – Усть-Илимское водохранилище.

В 2009 г. для определения уровня накопления макроэлементов были отобраны пробы наиболее распространенных водных растений верхней части Братского водохранилища. Анализ макроэлементного состава одного из отобранных растений – рдеста пронзеннолистного на участке

водохранилища г. Усолье-Сибирское – п. Балаганск показал, что с удалением от выпусков химкомбината «Усольехимпром» вниз по течению происходит снижение концентрации ряда элементов, в том числе алюминия и железа (Рис. 61). Подобная тенденция наблюдается и для других исследованных растений. Установлено, что наибольшие концентрации большинства макроэлементов в водных растениях наблюдаются на участке водохранилища, прилегающего к зонам непосредственного влияния техногенной эмиссии. В значительной мере накопление биофильных элементов связано с видоспецифичностью гидрофитов, их жизненным циклом и условиями окружающей среды.

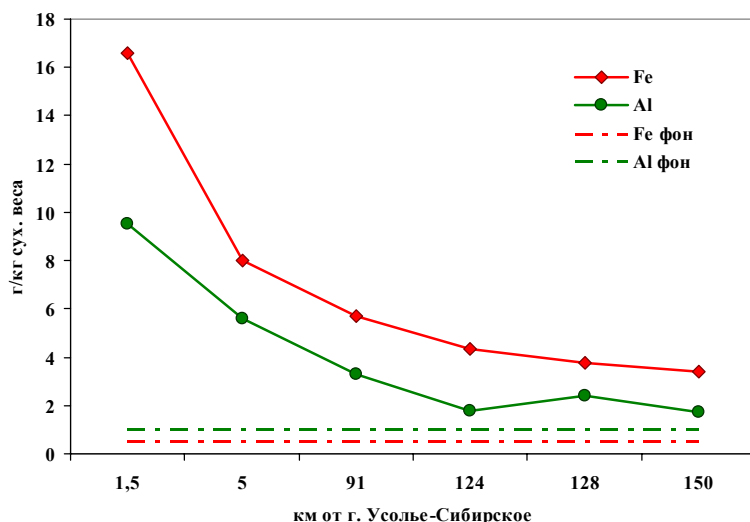


Рис. 61. Изменение концентраций Fe и Al в рдесте пронзеннолистном по мере удаления от основного источника техногенного загрязнения Братского водохранилища – химкомбината «Усольехимпром». Фоновые значения Fe и Al приведены по рдесту пронзеннолистному из оз. Байкал.

Наибольшее накопление ртути в водных растениях наблюдается в верхней части Братского водохранилища, прилегающей непосредственно к основному источнику ртутного загрязнения – химкомбинату «Усольехимпром». С удалением от выпусков этого предприятия вниз по течению средние концентрации ртути в растениях постепенно становятся ниже. И уже в средней и нижней частях водохранилища отмечены небольшие показатели ртутного загрязнения в растениях, что свидетельствует о значительном уменьшении техногенного влияния. Разные виды водных растений отличаются иногда существенно по уровню концентрации ртути. Как и с накоплением биофильных элементов в растениях, во многом это объясняется их видовыми особенностями и условиями местопроизрастания. Полученные результаты дают возможность использовать некоторые виды растений для биоиндикации ртутного загрязнения не только Братского водохранилища, но и других водоемов нашего региона.

• **Биоаккумуляция ртути планктонными организмами (фито- и зоопланктон).** Многолетние исследования показали значительные межгодовые колебания концентраций ртути в планктоне Братского водохранилища. Такие колебания могут зависеть от многих факторов окружающей среды и в первую очередь от гидрологических и гидрохимических показателей водоема, а также от состава самого планктона – преобладания в нем тех или иных трофических группировок. В результате проведенного анализа нами были установлены следующие значимые корреляционные зависимости:

- 1) Обнаружена ярко выраженная положительная зависимость содержания ртути в общем (фито- и зоо-) планктоне от ее содержания в водной среде (Рис. 62А, $r=0,96$, $p<0,001$).
- 2) Установлено, что содержание ртути в общем планктоне обратно пропорционально уровню воды в Братском водохранилище (Рис. 62Б, $r=-0,99$, $p<0,01$), т.е. в маловодные годы концентрация ртути в планктоне увеличивается, и, наоборот, в годы с повышенным уровнем воды наблюдается снижение ртутных концентраций в планктоне.

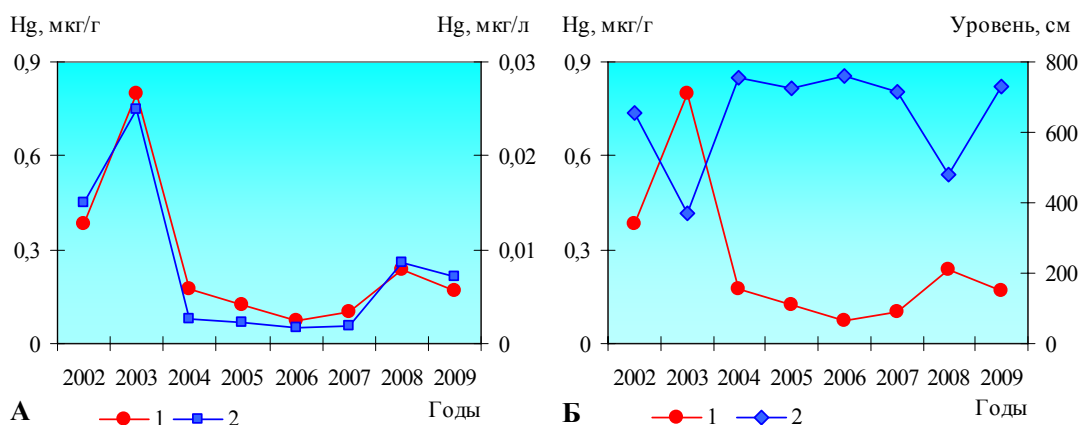


Рис. 62. Зависимость средних концентраций ртути в планктоне верхней части Братского водохранилища от ее концентраций в воде (А) и уровня воды (Б). 1 – концентрации ртути в планктоне; 2- концентрация ртути в воде (А), уровень воды (Б).

3) Найдена отрицательная корреляционная зависимость между биомассой планктона и концентрацией ртути в поверхностной воде (Рис. 63А, $r=-0,87$, $p<0,001$). Установлено, что при увеличении биомассы планктона содержание ртути в воде снижается, это происходит вследствие ее аккумуляции и абсорбции планктонными организмами. Полученная зависимость еще раз подтверждает важнейшую роль планктона в очищении водных масс от токсических веществ.

4) Обнаружено, что увеличение биомассы планктона влечет за собой уменьшение концентраций ртути в планктонном сообществе (Рис. 63Б, $r=-0,85$, $p<0,001$). То есть, при возрастании биомассы ртуть распределяется на большее количество планктонных организмов, каждый из которых в итоге извлекает ее меньше из водной среды.

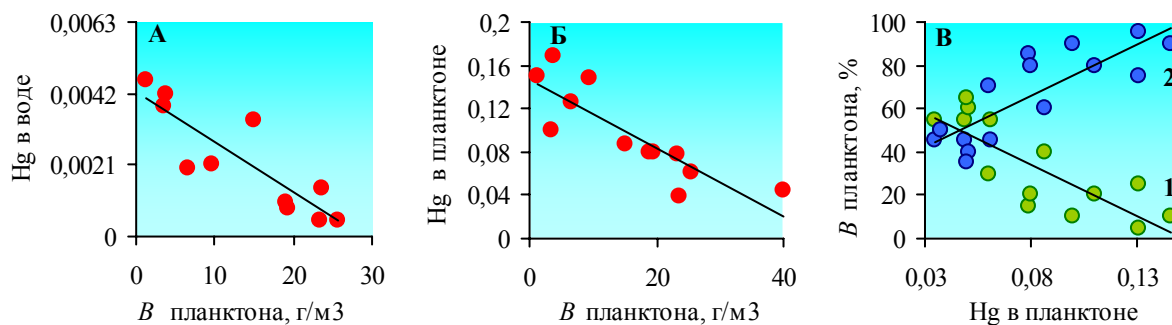
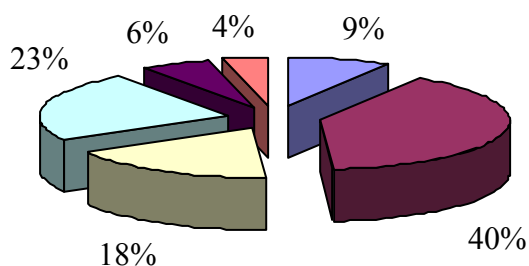


Рис. 63. Зависимость концентрации ртути в воде и планктоне от биомассы общего планктона.

B – биомасса; А – зависимость концентрации ртути в воде от биомассы общего планктона; Б – зависимость содержания ртути в планктоне от биомассы общего планктона; В – зависимость содержания ртути в общем планктоне от биомассы фитопланктона (1) и зоопланктона (2).

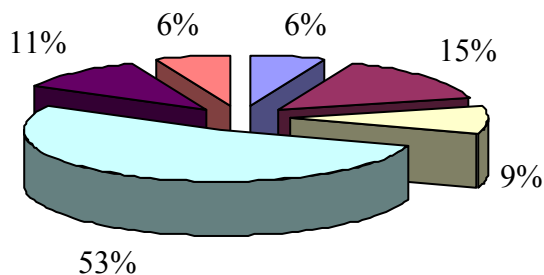
5) Как показали проведенные исследования, в тех пробах, где биомасса зоопланктона была высокой, были обнаружены повышенные концентрации ртути (Рис. 63В, $r=0,82$, $p<0,001$) и, наоборот, с преобладанием в пробах фитопланктона содержание ртути уменьшалось ($r=-0,82$, $p<0,001$). Это объясняется более высоким трофическим уровнем зоопланктона, аккумулирующего ртуть как из воды, так и из объектов питания (в частности фитопланктона и мелких беспозвоночных). Данную зависимость хорошо демонстрируют пробы планктона, отобранные на станциях со сходными лимнологическими характеристиками в Балаганском расширении Братского водохранилища, находящихся в 15 км друг от друга – напротив пос. Балаганск и пос. Заславск (Рис. 64).

Hg - 0,116 мкг/г



А

Hg - 0,055 мкг/г



Б

1 2 3 4 5 6

Рис. 64. Изменение содержания ртути в общем планктоне в зависимости от варьирования его состава.

Процентами показаны доли каждой группы планктона от общей биомассы. А – напротив пос. Заславск; Б - напротив пос. Балаганск. 1 – хищный зоопланктон; 2 –фильтрующий зоопланктон; 3 – динофитовые водоросли; 4 – диатомовые водоросли; 5 - сине-зеленые водоросли; 6 - зеленые водоросли.

6) С увеличением доли фильтраторов в биомассе зоопланктона увеличивается и содержание ртути в общем планктоне (Рис. 65А, $r=0,80$, $p<0,001$), обратная зависимость наблюдается у хищного зоопланктона (Рис. 65А, $r=-0,78$, $p<0,001$). По нашему мнению, связано это, в первую очередь, с особенностями питания различных групп зоопланктона – фильтраторы помимо употребления в пищу фитопланктона и детрита, часто заглатывают минеральную и органическую взвесь, сорбирующую на себе ртуть, в то время, как хищный зоопланктон не фильтрует воду, а питается избирательно мелкими беспозвоночными.

7) С увеличением биомассы диатомовых водорослей содержания ртути в планктоне снижались (Рис. 65Б, $r=-0,74$, $p<0,001$). У динофитовых водорослей была отмечена подобная зависимость, но с гораздо менее значимой корреляцией ($r=-0,51$, $p<0,05$). Противоположная связь наблюдается у сине-зеленых водорослей – при их высокой биомассе, концентрации ртути в общем планктоне также были повышены (Рис. 65В, $r=-0,73$, $p<0,001$).

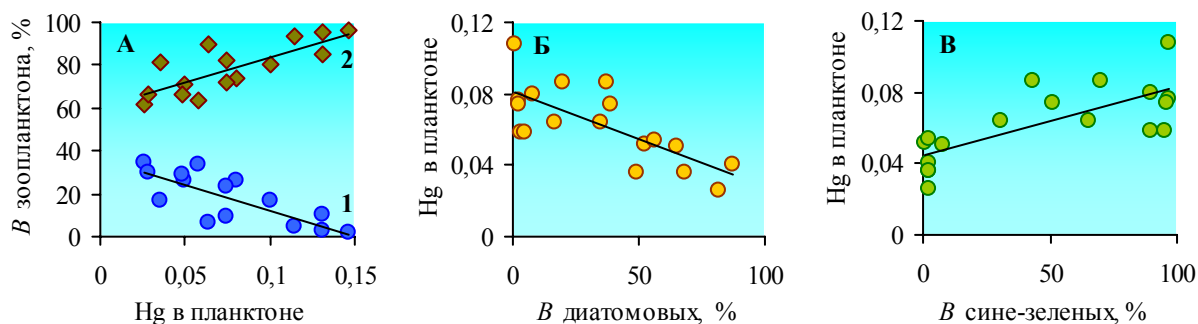


Рис. 65. Зависимость содержания ртути в планктоне от биомассы различных групп планктона.

В – биомасса; А - зависимость содержания ртути в общем планктоне от биомассы разных групп зоопланктона: 1) хищный планктон; 2) фильтраторы; Б - зависимость между содержанием ртути в общем планктоне и биомассой водорослей: диатомовых (Б), сине-зеленых (В).

Таким образом, биоаккумуляция ртути планктонными организмами (фито- зоопланктон) зависит от гидролого-гидрохимических, условий водоема, видового состава и биомассы планктона. Полученные микробиологические показатели позволяют характеризовать структуру и активность микробных сообществ как центрального фактора формирования и состояния качества вод речных и водохранилищных экосистем.

• **Микробиологический мониторинг Братского водохранилища.** Общим свойством изученных водных объектов Приангарья в период 2007-2009 гг. являлась широкая амплитуда количественных спектров индикаторных групп микроорганизмов. Максимальные количественные спектры микроорганизмов в речных экосистемах (в черте городов Иркутска и Шелехово) были динамичны во времени (в сезонном аспекте), но постоянны в пространстве и приурочены к приустьевым

участкам. В водохранилищах Ангары максимальные спектры динамичны во времени и в пространстве, кроме локальных зон, привязанных к районам поступления сточных вод, геохимических барьеров, разгрузки вещества подземных вод (Рис. 66). Площадь пятна загрязнения и его миграция зависят от водного режима и объемов поступающих веществ и аллохтонной микрофлоры со стоками.

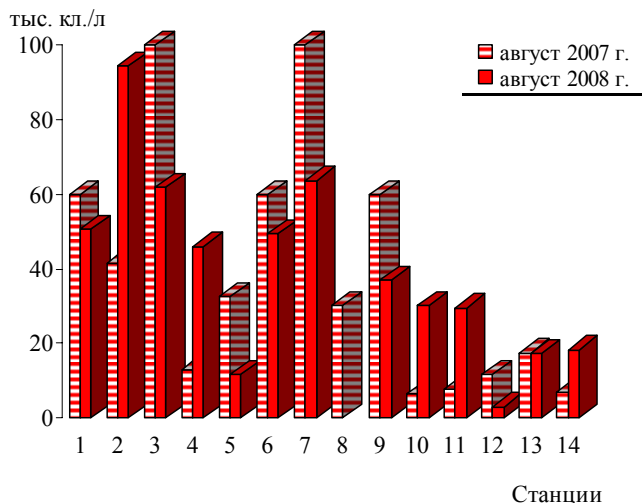


Рис. 66. Распределение численности селенитвосстанавливающих бактерий в воде Братского водохранилища на станциях: 1 – 1,5 км выше стоков, 2 – район поступления стоков, 3 – 1,5 км ниже стоков, 4 – 2,5 км ниже стоков, 5 – устье р. Белой, 6 – п. Буреть, 7 – п. Бархотово, 8 – 7 км ниже Бархотово, 9 – 1,5 км выше Свирска, 10 – у завода «Сибэлемент», 11 – перед разделением русла Ангары, 12 – левая протока Ангары, 13 – правая протока Ангары, 14 – о. Конный.

Показатели бактериопланктона и бактериобентоса Братского водохранилища в 2007-2009 гг. были нестабильны, несмотря на длительный период его формирования. В 2008 г. был зарегистрирован небывалый по мощности пул развития микроорганизмов в донных отложениях на отрезке Игжей-Заславск (до $n \cdot 10^8$ кл./см³), в 2009 г. – в придонной воде верхнего участка (до 5-16 тыс. кл./мл). Это позволяет утверждать, что экосистема не вышла на уровень стабилизации, как и Усть-Илимское водохранилище, и головное Иркутское водохранилище развивается с положительным временным трендом.

Спектры количественного развития автохтонного звена бактериопланктона ниже, чем аллохтонного. Доля ферментативно-активных микроорганизмов в воде Братского водохранилища и в р. Оке значительно снижена. Слабая активность автохтонного звена бактериопланктона приводит к снижению его участия в минерализационных процессах, и основная роль ложится на бактериобентос.

Впервые на основе анализа морфотипов колоний разных групп микроорганизмов установлено снижение видового разнообразия структурных элементов микробиоценозов Братского водохранилища в районах влияния сточных вод и повышенного содержания органического вещества. Экосистемные изменения затрагивают и качественную структуру микробного сообщества.

Микроорганизмы активно вовлекаются в восстановительные процессы токсичных соединений металлов (Рис. 67), их количественный состав динамичен в пространстве и времени и возрастает в каскаде Ангарских водохранилищ. Селенитвосстанавливающие микроорганизмы гетерогенны по составу (Рис. 67). Доля санитарной микрофлоры в восстановительных процессах селена в Братском водохранилище (2009 г.) возросла до 49-89% в районах влияния крупных населенных пунктов, мясоперерабатывающих комплексов, в зонах рекреации.

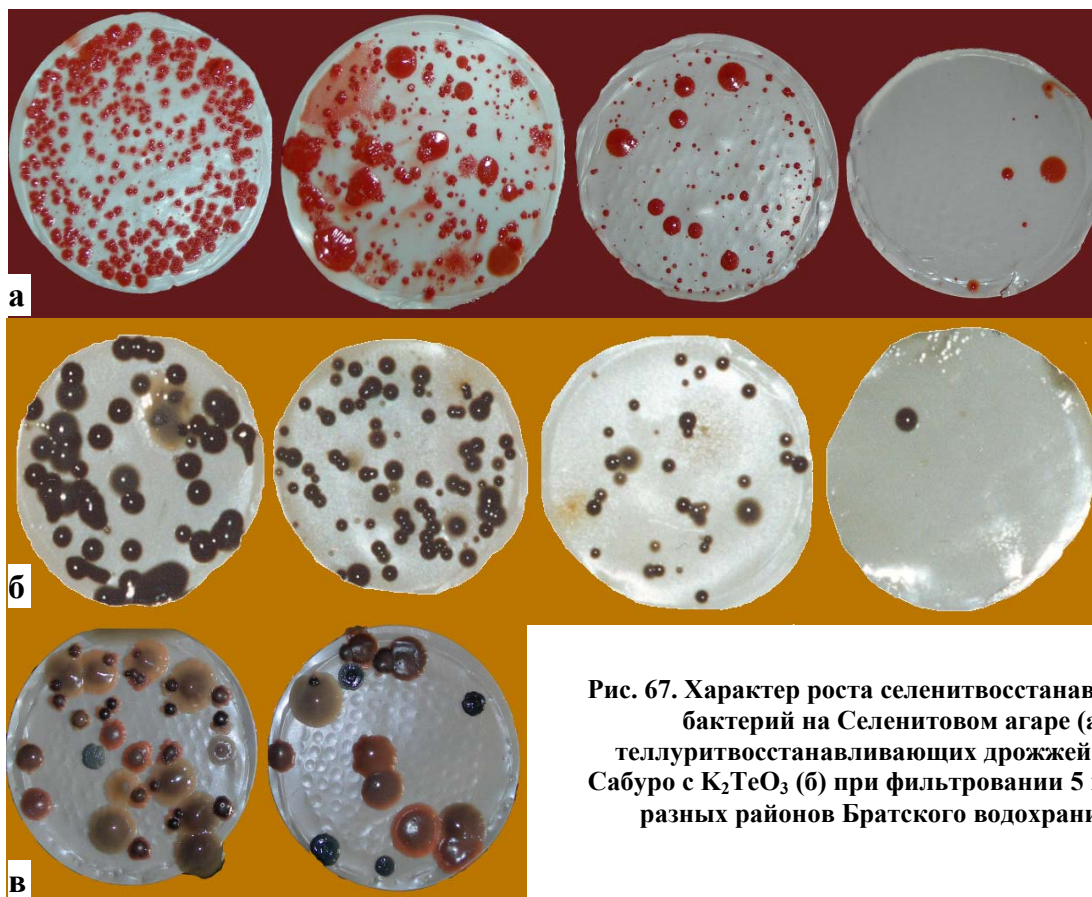


Рис. 67. Характер роста селенитвосстанавливающих бактерий на Селенитовом агаре (а) и теллуритвосстанавливающих дрожжей на среде Сабуро с K_2TeO_3 (б) при фильтровании 5 мл воды из разных районов Братского водохранилища.

Нарушение динамического равновесия природных процессов образования и окисления сероводорода в сторону сульфатредукции отмечалось в донных отложениях многих обследованных объектов.

Санитарный режим вод Иркутского водохранилища характеризовался разрядами II-III классов, Братского – III-V, приустьевых участков рек и 27 заливов Братского водохранилища – IV-V. В составе условно-патогенной микрофлоры в ангарских водохранилищах обнаруживались: *Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis*, *Enterobacter aerogenes*, *Enterobacter agglomerans*, *Klebsiella ozaenae*, *Shigella sonnei*, *Salmonella sp.*, *Proteus vulgaris*, *Citrobacter freundii*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas sp.*

Блок 2. Закономерности миграции тяжелых и токсичных металлов (Pb, Zn, Cu, Cd, As, Hg) в почвах Южного Прибайкалья и особенности поступления их в растения и пищевые цепи человека (отв. исполнители: к.г.-м.н. Белоголова Г.А., к.б.н. Матяшенко Г.В., к.г.-м.н. Кутаев Н.А.).

- **Геохимические особенности почв Иркутской области.** Одной из наиболее важных экологических функций почв является их способность к депонированию экотоксикантов, включая тяжелые металлы (ТМ), редкие и рассеянные элементы. С развитием научно-технического прогресса антропогенный источник их поступления в окружающую среду становится одним из ведущих. Функция почв как барьера, связанная с сорбцией и накоплением экотоксикантов, не безгранична – при избыточном поступлении элементов, разрушении или деградации почвенного покрова экотоксиканты вовлекаются в водную миграцию, поступая в поверхностные и подземные воды, вовлекаются в биологический круговорот веществ и, тем самым, представляют угрозу для здоровья животных и человека.

В настоящее время имеются многочисленные данные по изучению ТМ в почвах как в нативных, так и в антропогенных ландшафтах. Однако большинство авторов изучают свойства и поведение лишь наиболее приоритетных ТМ – загрязнителей окружающей среды – Pb, Zn, Cd, Hg и др., при этом редкие элементы остаются мало изученными, хотя некоторые из них, такие, как Be, Tl, Sn,

обладают высокой токсичностью. Следует также обратить внимание на то, что для них не разработаны нормативы содержания в почвах, что требует внимательного изучения этих элементов.

Большая часть изученных ландшафтов и почв, так или иначе, нарушены, что приводит к загрязнению и деградации почвенного покрова и ландшафтов. Анализ химического состава почв позволил выявить ряд специфических загрязнителей для каждой изученной территории. Среди них выделяются города, характеризующиеся наиболее повышенными содержаниями одновременно многих токсикантов.

Наибольшим загрязнением в Иркутской области характеризуются почвы г. Черемхово (Be, B, Ge, Cd, As, Sn, Hg, Pb, Zn, F, Tl, Ag), что, помимо транспортной нагрузки, связано с добычей и сжиганием угля. Выделяется также г. Байкальск, имеющий свою ассоциацию загрязняющих веществ: V, Ga, Fe, Co, Mo, Ni, Sc, Cr, которая связана с повышенным природным фоном этих элементов. В городе Иркутске выделяется ряд специфических загрязнителей – V, Mn, F.

Несмотря на ряд особенностей загрязнения почвенного покрова, во всех городах и посёлках приоритетными загрязнителями, несомненно, являются Pb и Zn, а для некоторых городов также и Hg, содержания которых в аномальных участках часто превышает нормы ПДК.

Особое внимание было уделено гг. Свирску и Усолье-Сибирскому, в которых содержания As, Pb, Zn, Cd, Hg и других элементов в почвах превышают фоновые значения в тысячи раз, что связано с ранее существовавшими в г. Свирке заводом по производству мышьяка и в г. Усолье-Сибирское – цехом ртутного электролиза. Однако в 2009 г. Администрацией Иркутской области принято решение о ликвидации и захоронении экологически опасных очагов (Федеральные целевые программы).

В урбанизированных и промышленных районах Иркутской области в большинстве случаев отмечается повышенный фон ТМ, редких и рассеянных элементов. В некоторых случаях (с. Еланцы, г. Байкальск, Залари) это связано с высоким природным фоном элементов. Многие города и посёлки характеризуется различными специфическими геохимическими ассоциациями элементов, что обусловлено особенностями промышленных производств и природного фона элементов. Выявленные аномальные участки с повышенным фоном загрязнителей требуют более детального изучения и картирования.

• **Закономерности миграции тяжелых и токсичных металлов.** Изучены закономерности миграции макро- и микроэлементов в системе почва-растение на примере киселемных растворов березы (*Betula pendula* Roth). Установлено, что наиболее активно березовый сок поглощает биофильные элементы Mn, K, Ca, Mg, Na, P, накопление которых мало зависит от степени их концентрации в почве, что обусловлено информационными свойствами растения, заложенными в их генетических особенностях. Поступление тяжелых металлов в киселемные растворы зависит от их концентрации в почве (Рис. 68). Березовый сок дает полную информацию о геохимической специфике техногенеза и о природном, естественном составе почв, развитых на различных геологических структурах. Наиболее ярким подтверждением этому является накопление в березовом соке высоких концентраций элементов-токсикантов вблизи основных промышленных городов – Иркутска, Шелехова и поступление ртути в киселемные растворы берез, произрастающих в зоне Приморского глубинного разлома Байкальской рифтогенной зоны.

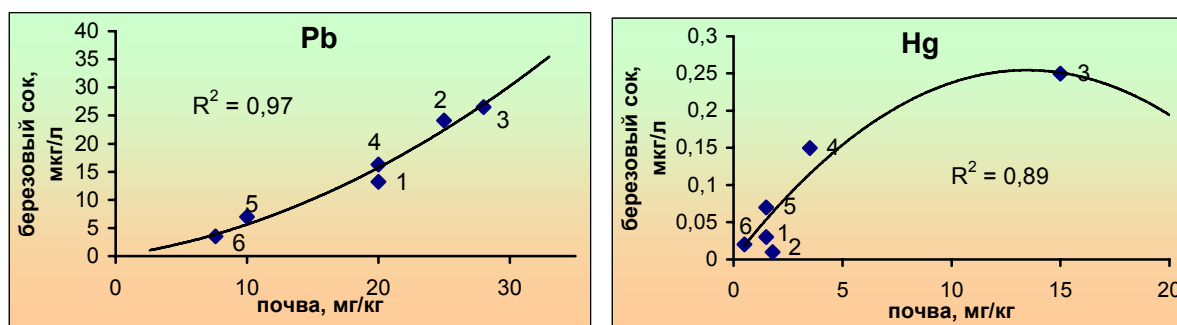


Рис. 68. Зависимость содержания химических элементов в березовом соке и почве (Южное Прибайкалье). (1-6)

– объекты исследования: 1 - г. Иркутск; (2-4) – г. Шелехов; 5 – г. Усолье-Сибирское; 6 – фоновый.

Особенности миграции и биоаккумуляции тяжелых металлов и мышьяка детально изучены на примере одного из наиболее загрязненных городов Приангарья – г. Свирска. Проведено комплексное изучение распределения содержаний Hg, Pb, Cu, Zn, Cd и As в различных объектах окружающей среды г. Свирска (почвах, продуктах местного производства, биосубстратах человека) и сопоставление результатов с другими промышленными городами Приангарья. Установлено, что наличие мышьяковой аномалии в почвах г. Свирска, приуроченной к отвалам огарков бывшего Ангарского металлургического завода (АМЗ) и свинцовое загрязнение почв г. Свирска, связанное с деятельностью аккумуляторного завода, могут представлять особую экологическую опасность. В зонах техногенного загрязнения в почвах возрастает содержание подвижных форм тяжелых металлов и мышьяка, что указывает на усиление их миграционной способности и биодоступности. Высокой подвижностью и биодоступностью в изученных почвах выделяется кадмий, являющийся одним из наиболее сильных генотоксичных и канцерогенных ядов. Мышьяк также при определенных условиях способен переходить в подвижные формы и накапливаться в растениях (Рис. 69).

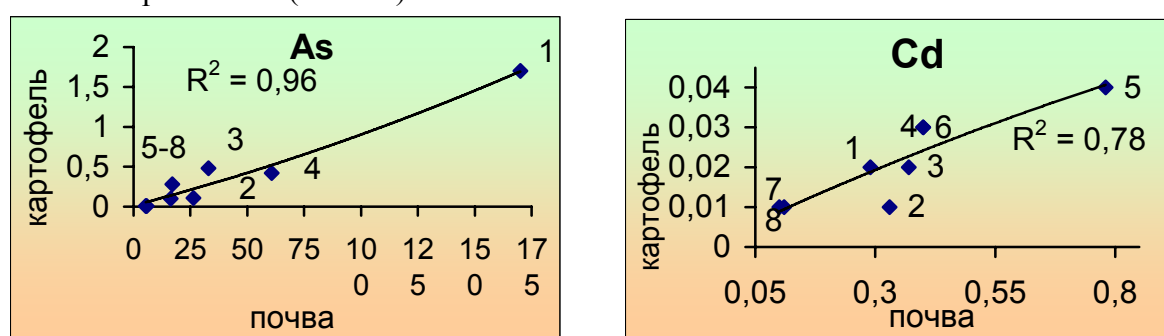
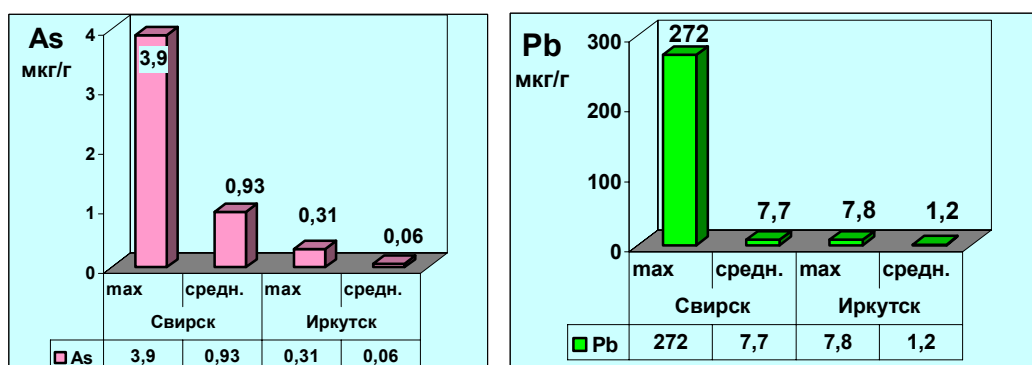


Рис. 69. Зависимость содержания химических элементов в картофеле и почве (мг/кг).

Прослеживается заметное накопление тяжелых металлов и мышьяка (в отдельных случаях достигающее ПДК) в продуктах питания местного производства, в частности в молоке и овощах г. Свирска. Эти результаты согласуются с высоким загрязнением почв тяжелыми металлами. Несмотря на то, что элементы-токсиканты в пищевой цепи человека не всегда достигают ПДК, в конечной цепи в биосубстратах человека, они накапливаются до очень высоких пределов. Особенно четко это проявлено на примере интенсивного накопления Pb, As и Cd в волосах детей г. Свирска (Рис. 70).



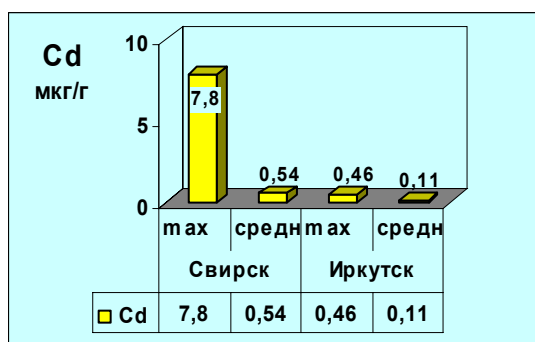


Рис. 70. Содержание мышьяка, свинца и кадмия в волосах детей городов Свирска и Иркутска.

Для изучения влияния барьерных свойств растений на накопление в них тяжелых металлов проанализированы паслен и кровохлебка, растущие на максимально загрязненных почвах г. Свирска. Установлено, что паслен (*Solanum dulcamara*) накапливает намного больше тяжелых металлов и мышьяка, чем кровохлебка (*Sanguisorba officinalis*) (Рис. 71), поэтому его можно использовать для фиторемедиации почв.

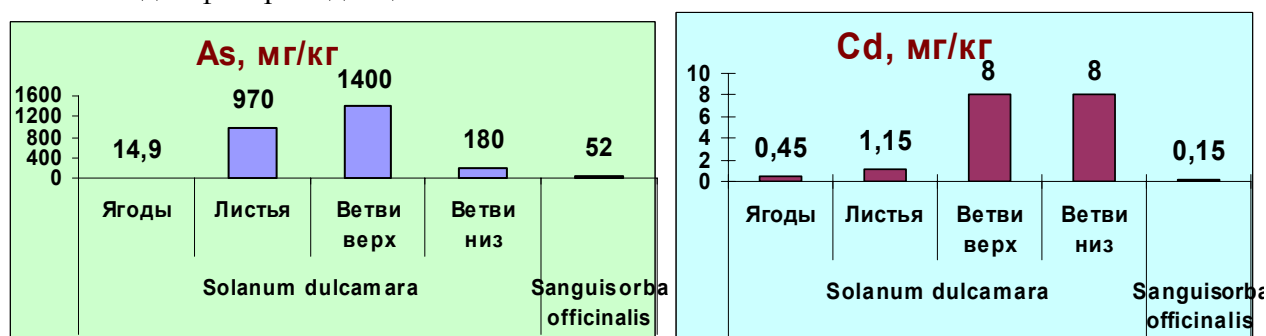


Рис. 71. Распределение содержаний As и Cd в различных органах паслена и кровохлебки (мг/кг).

В процессе изучения форм нахождения тяжелых металлов в почве г. Свирска установлено также, что подвижность тяжелых металлов зависит от особенностей органического материала. Начата работа по изучению органического состава почв и особенностей влияния его на поведение тяжелых металлов и As в техногенных и фоновых районах. В результате эксперимента выделены различные фракции Сорг.: 1) свободные гуминовые кислоты (ГК), 2) свободные фульвокислоты (ФК), 3) связанные ГК, 4) связанные ФК, 5) органика, связанная с глинистой фракцией, 6) твердый остаток. Для этих фракций установлено содержание Сорг. и сделан расчет процентного соотношения к Сорг., общему для почвы. Величина Сорг. в свободных и связанных фракциях ГК выше, чем в ФК. Максимальные значения Сорг. выделяются в трудно гидролизуемых связанных фракциях ГК. Очень высокое процентное содержание Сорг. остается в твердом остатке техногенных почв, что указывает на накопление в них трудно растворимой органики. Оценка степени гумификации почв основана на одном из показателей – $H = C_{ГК} : C_{ФК}$. Исходя из анализа этого параметра, степень гумификации в техногенных почвах г. Свирска понижена относительно почв фонового участка. Техногенные почвы отличаются особо высокими содержаниями мышьяка, большая часть которого связана с органическими фракциями почв. В отличие от фонового участка, его мало остается в твердом остатке и глинистой фракции. Кадмий в техногенных почвах имеет более крепкие связи со связанной органикой (ФК). Максимальная доля свинца, до 75,9 %, установлена в связанной органике (ФК), что еще раз подтверждает приведенные нами данные о его особенной способности создавать прочные комплексные соединения с органическим веществом даже при низких значениях pH почв. Значительно меньше свинца содержится в свободных ГК и, наоборот, в чистых лесных почвах свинец может накапливаться в связанной органике ГК.

Таким образом, для халькофильной группы тяжелых металлов (Cd, Pb) и мышьяка характерны металлоорганические соединения типа фульватов. Среди этой группы элементов Pb образует трудно гидролизуемые фульватные металлоорганические соединения.

Блок 3. Биогеохимические циклы макро- и микрокомпонентов органического вещества в водных и наземных экосистемах Байкальского региона природного и техногенного происхождения (отв. исполнители: к.х.н. Е.Н.Тарасова, к.м.н. Е.А.Мамонтова).

• **Биоиндикация.** Для оценки степени загрязнения территорий токсикантами используют биоиндикаторы – «живые организмы, обладающие хорошо выраженной реакцией на внешнее воздействие» [Опекунова, 2004]. Содержание стойких органических загрязнений (СОЗ) в тканях некоторых живых организмов может служить показателем загрязнения токсикантами атмосферного воздуха, почв и воды на территории их обитания, т.е. служить основой для специфической биоиндикации загрязнения окружающей среды этими соединениями [Опекунова, 2004]. В качестве объектов для специфической биоиндикации рассмотрены домашние животные и продукция животноводства и птицеводства. Достоверная сильная корреляция была получена между содержанием полихлорированных бифенилов (ПХБ) в почве пастбищ и в осеннем молоке (Табл. 6). Слабая связь величин ПХБ в почве пастбищ и в весеннем молоке найдена во всех случаях, при условии, что концентрации в осеннем молоке выше, чем в весеннем. Средняя и сильная корреляционная связь получена для суммы стабильных конгенов ПХБ в яйцах кур и в почве (Рис. 72, Табл. 6). Для низкохлорированных ПХБ взаимосвязь концентраций в яйцах и в почве сильная и достоверная (ПХБ-28 – $r = 0,99$, $p = 0,002$, ПХБ-74 – $r = 0,98$, $p = 0,016$, ПХБ-95/66 – $r = 0,99$, $p = 0,004$).

Таким образом, распределение ПХБ в почвах региона и в организме сельскохозяйственных животных обусловлено наличием значительного источника атмосферного поступления в районе Усолье-Сибирского. Современные уровни дихлордифенилтрихлорэтана (ДДТ) и гексахлорциклогексана (ГХЦГ) в абиотических и биотических объектах окружающей среды в основном определяются их использованием в сельском хозяйстве в прошлом, однако, возможно и локальное свежее поступление из мест хранения неиспользованных пестицидов и в результате трансграничного переноса. Изученные объекты (коровье молоко и яйца домашних кур) могут быть показателями загрязнения почв и атмосферы на определенной территории СОЗами при условии существования источника их атмосферной эмиссии и при содержании животных, обеспечивающим их контакт с почвой (например, выпас скота на пастбищах). Для уменьшения накопления СОЗ в организме сельскохозяйственных животных необходимо проведение мероприятий по ликвидации возможных источников загрязнения (ПХБ-содержащее электротехническое оборудование, запасы запрещенных ХОП, свалки опасных промышленных отходов и т.п.), а также по снижению их концентраций в почвах, используемых в сельском хозяйстве, и, в некоторых случаях, по ограничению контакта животных с загрязненной почвой.

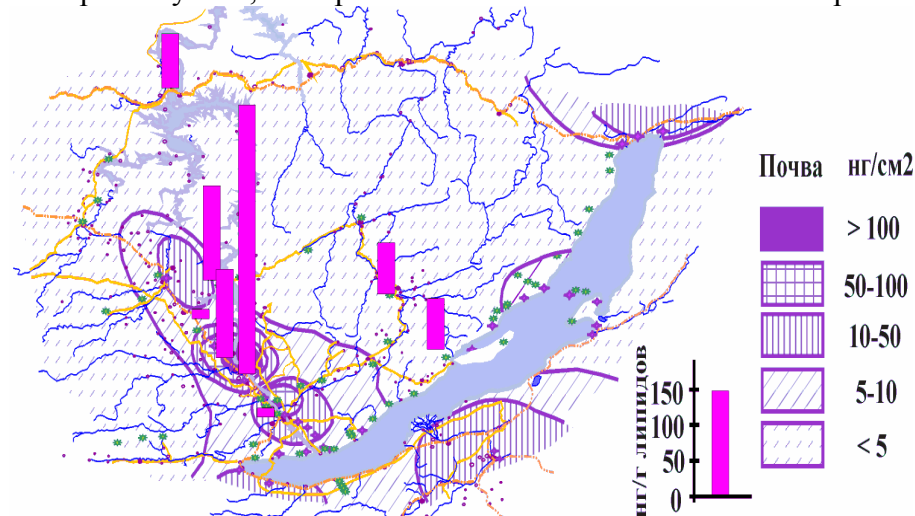


Рис. 72. Концентрации ПХБ в куриных яйцах (нг/г липидов) и в почвах региона (нг/см²).

Таблица 6.

Корреляция содержания СОЗ в яйцах кур, коровьем молоке весной (ВМ) и осенью (ОМ) и почве пастбищ (& - сумма стабильных конгенов - № ИЮПАК 74, 99, 85, 118, 153, 138, 158, 183, 180, 190/170,

- в знаменателе сумма тех же конгенов ПХБ + ПХБ-28, * - $p < 0,05$) [Мамонтова и др., 2009].

Соединение	Яйца кур	Коровье молоко					
		Все пробы		1 группа (весна < осень)		2 группа (весна > осень)	
		ВМ	ОМ	ВМ	ОМ	ВМ	ОМ
ПХБ ^{&}	0,62 / 0,94 [#]	0,22	0,78 *	0,91	0,86 *	0,28	0,71 *
α,γ -ГХЦГ	- 0,22	- 0,11	- 0,13	- 0,17	- 0,18	- 0,30	0,13
ДДТ и ДДЭ	- 0,31	- 0,21	0,54*	- 0,13	0,73 *	- 0,30	- 0,19

• **Оценка риска.** Для оценки степени опасности СОЗ для населения Иркутской области использован подход анализа риска здоровью человека от воздействия токсикантов [Онищенко и др., 2007]. В 2007-2009 г. проведены работы по оценке риска здоровью населения от воздействия комплекса стойких органических загрязнителей при потреблении продуктов питания местного производства. Установлено, что в среднем по области индекс опасности (ИО) развития заболеваний ЦНС, печени, иммунной системы от воздействия СОЗ, меньше единицы. Однако, возможны нарушения в развитии человека и в гормональном статусе. Комбинированное поступление СОЗ в организм жителей пос. Качуг не превышает допустимое (Рис. 73). Тогда, как при потреблении продуктов, произведенных в районе города Усолье-Сибирское, воздействие СОЗ может приводить к возникновению нарушений в работе ЦНС, печени, иммунитете, гормональном статусе и развитии. Наибольший вклад в суммарную экспозицию вносят копланарные ПХБ (35 %), затем ПХБ с недииоксиноподобным механизмом (30 %). За ними в порядке убывания идут ПХДФ > ПХДД > ГХБ > ДДТ > ГХЦГ [Мамонтова, Тарасова, 2009].

Канцерогенный риск (КР) от воздействия комплекса изученных СОЗ в среднем по области превышает предельно допустимый уровень и составляет уже $2,1 \cdot 10^{-4}$. Данная величина соответствует диапазону неприемлемого риска в целом для населения и требует проведения плановых мероприятий по его снижению. В этом же диапазоне лежат величины риска в промышленных городах области. В сельской местности КР находится в пределах предельно допустимого риска, требующего постоянного контроля и проведения дополнительных мероприятий по его снижению. Эти мероприятия следует направлять на прекращение использования технического ПХБ, ликвидацию последствий использования ПХБ и хлорорганических пестицидов в прошлом, а также на прекращение использования в частных хозяйствах хлорорганических пестицидов (особенно ГХЦГ). Основной вклад в КР в промышленных городах вносят ПХБ > ПХДФ > ПХДД > пестициды. На остальных территориях – ПХБ > ГХЦГ > ПХДФ > ПХДД > ГХБ > ДДТ (полихлорированные дибензофураны (ПХДФ), полихлорированные дибензо-пара-диоксины (ПХДД), гексахлорбензол (ГХБ)).

Таким образом, проведенные исследования риска здоровью населения от воздействия комплекса СОЗ показали, что возможность возникновения как канцерогенных, так и неканцерогенных заболеваний у жителей области существует. Начатые исследования в дальнейшем будут продолжаться, будет изучено поступления СОЗ с другими продуктами питания, с водой, частицами почвы и т.д. как в целом по области, так и по отдельным районам региона.

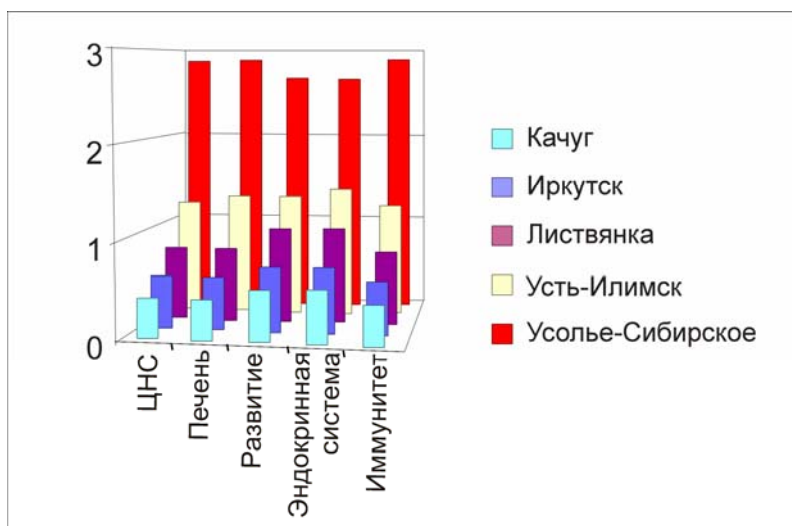


Рис. 73. Индексы опасности при поступлении СО₂ с продуктами питания в организм жителей Иркутской области.

• **Прогноз (эвтрофирование и загрязнение) состояния водных экосистем.** На примере многолетних исследований открытого Байкала показано, что на зависимости хлорофилла-а от предшествующего содержания биогенных элементов можно прогнозировать состояние водных экосистем, т.е. можно предсказать как продукцию первичного звена трофической цепи в водоеме, так и нахождение токсикантов в водоеме (Рис. 74), что подтверждается прямой зависимостью между содержанием ПХБ в фитопланктоне и содержанием азота в воде (Рис. 75). Величины отношения биогенных элементов в предшествующий период максимального развития фитопланктона служат показателем развития того или иного видового состава водорослей (развитие *Aulacoseira baicalensis* лимитируется кремнием и фосфором – отношение больше 90, развитие *Synedra acus* возможно при Si:P меньше 70, при промежуточном отношении Si:P=70-90 в зимнее время возможно совместное развитие указанных выше водорослей весной).

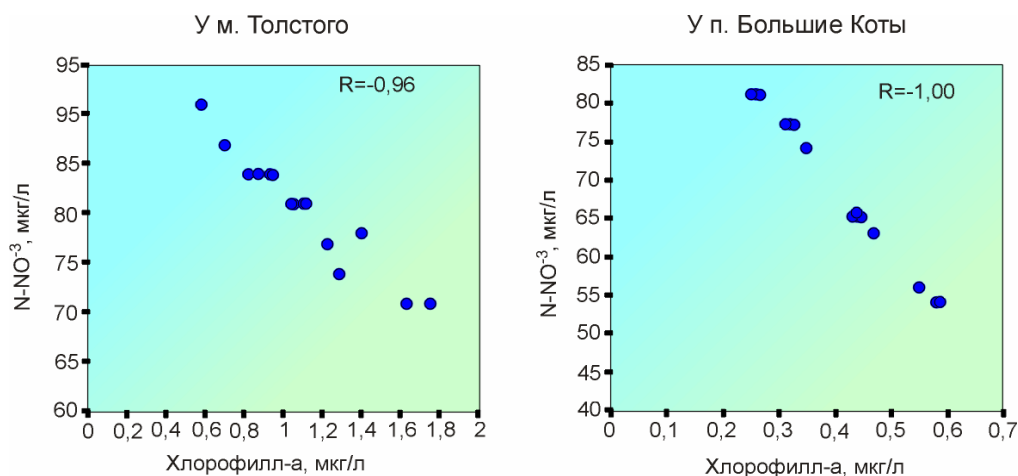


Рис. 74. Зависимость весенней концентрации хлорофилла-а от нитратного азота зимой в пелагиали Южного Байкала у мыса Толстого и в прибрежной части озера у пади Б.Коты.

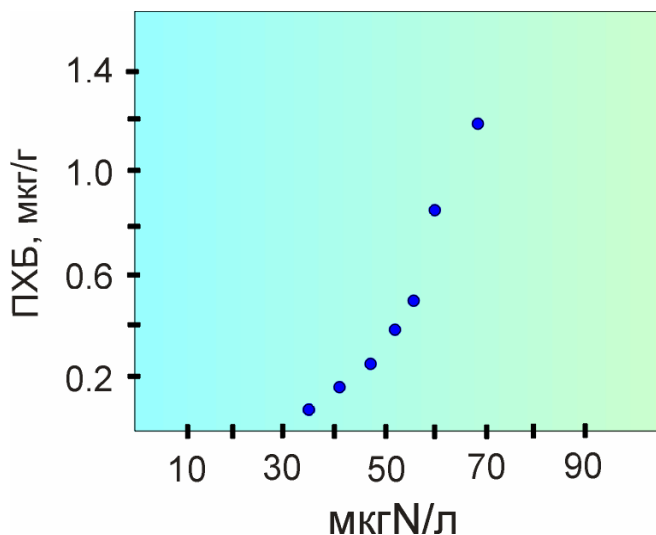


Рис. 75. Зависимость содержанием ПХБ в фитопланктоне и содержанием азота в воде оз. Байкал.

Для установления трофности водоемов исходили из того, что каждое озеро имеет свое стехиометрическое атомное отношение С:N:P. Экспериментально найдено, что сообщества зеленых мелких клеток водорослей имеют эти отношения 40:7:1, для больших диатомовых водорослей: 318:40:1. В оз. Мичиган С:N:P = 780:54:1, а в эвтрофированном оз. Эри оно было 76:11:1 [Kilham, 1990]. В пелагиали озера Байкал изменение стехиометрического атомного отношения С:N:P во взвешенном органическом веществе от 200:16:1 в 1983-1984 гг., 107:31:1 в 1986-1988 гг. до 79:31:1 в 2004-2005 гг. свидетельствует о повышении трофического уровня озера.

Блок 4. Лито- и гидрогеохимическое изучение распределения содержаний Se, S, F, U, Sr (и других биоактивных элементов) в окружающей среде Байкальского региона (отв. исполнители: д.г.-м.н. И.С.Ломоносов, д.г.-м.н. В.И.Гребенщикова, к.г.-м.н. О.А.Склярова, к.г.-м.н. Н.А.Китаев).

• **Биогенные и токсичные элементы в пресных природных водах как основа биогеохимического районирования Байкальской природной территории.** При биогеохимическом районировании территорий особую роль играет изучение концентраций элементов в природных водах, служащих источником питьевого водоснабжения. К сожалению, этому вопросу в последние десятилетия уделяется мало внимания. В этой связи задача изучения распределения и концентрации необходимых для жизни биогенных и токсичных элементов в пресных водах Прибайкалья приобретает важное значение. Для решения этой задачи были обобщены данные о содержании приоритетных биоактивных элементов (кальция, магния, калия и натрия) в природных водах Прибайкалья. Распределение и содержание в питьевых поверхностных водах территории этих элементов имеет важное биохимическое и экологическое значение, так как они входят в число элементов, нормируемых гигиеническими требованиями к качеству воды центральных систем питьевого водоснабжения.

Соли кальция и магния – основная часть минерализации поверхностных вод Прибайкалья, определяющая общую жесткость воды. В связи с тем, что подавляющее большинство поверхностных вод Прибайкалья с низкой минерализацией относится к гидрокарбонатным кальциевым или магниевым-кальциевым, важнейшим показателем вод региона является их жесткость. По этому показателю поверхностные воды Прибайкалья имеют широкий диапазон качественных различий: от очень мягких (до 1,5 миллимолей) до очень жестких (более 10 миллимолей) при среднем значении 3 миллимоля, что отвечает классу очень мягких вод. Оптимум жесткости равен 7 миллимолям. Вместе с фосфором – это основные остео- и одонтотропные элементы.

В поверхностных водах Прибайкалья концентрация кальция определена в 940 пробах, из которых в 24 его содержание оказалось ниже предела обнаружения (0,4 мг/дм³) метода анализа при среднем значении 140 мг/дм³ и максимальном – 423 мг/дм³. В оз. Байкал среднее содержание кальция составляет 16 мг/дм³, в водах малых рек и ручьев, питающих озеро – 13,9 мг/дм³, а в водах рек

Селенга и Баргузин в отдельные периоды года достигает 22-24 мг/дм³ и более. В то же время в степных и лесостепных районах Приангарья выявлены жесткие и очень жесткие воды.

Содержание магния в водах 256 рек и ручьев притоков оз. Байкал составляет всего 3,5 мг/дм³. В поверхностных водах на локальных участках засушливых районов Тажеранских степей выявлено повышенное содержание магния, превышающее ПДК, а в степных районах близ п. Баяндай установлены аномально высокие его концентрации, достигающие 300-750 мг/дм³.

На территории Прибайкалья в 939 опробованных водопунктах среднее содержание Na составляет 20,21 мг/дм³, при колебаниях от 0,13 до 1153 мг/дм³. Принятое для воды оз. Байкал ПДК натрия с целью розлива – 3,4 мг/дм³. На большей части Байкальской природной территории в поверхностных водах содержание натрия не превышает 20 мг/дм³ и только в случае подтока соленых вод по зонам тектонических нарушений его концентрация увеличивается, так же, как она возрастает в соленых озерах степных ландшафтов в районе Тажеранских степей и п. Баяндай.

В речных водах земного шара среднее содержание калия составляет 2,12 мг/дм³, что близко к среднему содержанию, определенному в 939 водоисточниках (3,6 мг/дм³). В то же время его среднее содержание в воде оз. Байкал составляет всего 0,9 мг/дм³, а в 256 его малых притоках – 0,8 мг/дм³. Наиболее крупный приток озера р. Селенга содержит 1,2-1,4 мг/дм³ калия.

Аномальные содержания (максимальное и минимальное) этих элементов вызывают многообразные патологические изменения в организме человека, в течение длительного времени использующего питьевые воды региона. Особенно значительные изменения происходят при дефиците катионогенных химических элементов. Факторами возникновения болезней может быть целый ряд макро- и микрокомпонентов, которые подразделяются на жизненно необходимые I и II порядка. Так, использование мягких пресных и ультрапресных вод приводит к значительным изменениям в сердечно-сосудистой системе. При дефиците Ca и Mg может проявиться ишемическая болезнь сердца, стенокардия, инфаркт миокарда, аритмия и др., что встречается значительно чаще, чем при использовании жестких или умеренно жестких вод.

Продолжены исследования распределения биогенных (селен, фтор) и токсичных (ртуть и бериллий) элементов в питьевых поверхностных водах Байкальской природной территории. Установлены низкие содержания Se в воде 58 притоков Байкала. Концентрации этого элемента в реках не превышают 0,2 мкг/л. Исключением является лишь вода 3-х притоков. Среди притоков западного берега озера Байкал только в реке Риты содержание Se достигает 0,54 мкг/л, а на восточном берегу в реках Ширильды и Томпуда концентрация Se составляет 0,3 мкг/л, что гораздо ниже оптимального количества для питьевой воды (2,5-3,3 мкг/л.), установленного сотрудниками государственного медицинского университета и Восточно-Сибирского научного центра СО РАМН. По нашим данным в воде, отобранной как с поверхности озера Байкал, так и на различных его глубинах, содержание селена колеблется от <0,01 мкг/дм³ до 0,23 мкг/дм³, т.е. на порядок ниже гигиенических норм.

В совокупности с содержанием селена в почвах района истока р. Ангары, Прибайкалье можно отнести к эндемичной по дефициту селена провинции и констатировать неблагоприятную биогеохимическую ситуацию.

ПДК фторид-иона составляет 0,75- 1,50 мг/дм³ [Питьевая вода..., 2001], в то время, как в воде оз. Байкал, его содержания изменяются от 0,18 до 0,21 (среднее – 0,19 мг/дм³), что ниже оптимального в 8 раз. В воде 58 изученных притоков оз. Байкал его среднее содержание не превышает 0,2-0,25 мг/дм³.

ПДК суммарного содержания ртути в питьевой воде России принято 0,5 мкг/дм³, а для водоемов рыбохозяйственного назначения – 0,01 мкг/дм³. В 9 пробах воды, отобранных с акватории оз. Байкал, содержание ртути не превысило 0,0006 мкг/дм³, а в изученных притоках – максимальное среднее содержание составляет 0,003 мкг/дм³.

Содержание бериллия в речных водах Мира колеблется от 0,01-0,3 мкг/дм³. Допустимое содержание Be в водопроводной воде США составляет 0,03-0,06 мкг/дм³, в России ПДК бериллия – 0,2 мкг/дм³. В воде оз. Байкал бериллий в большинстве случаев содержится в количестве 0,001 мкг/дм³ и менее, а его максимальные содержания не превышают 0,003 мкг/дм³. В воде притоков озера наибольшее среднее содержание бериллия установлено на западном побережье и составляет 0,36 мкг/дм³. Содержание рассматриваемых элементов в воде термальных источников

значительно выше, чем в воде оз. Байкал. Низкие содержания высокотоксичных элементов – Hg и Be в питьевых водах свидетельствуют о том, что территория Прибайкалья пригодна для жизнедеятельности человека.

Получены новые данные по содержанию радиоактивных элементов, радиационному, химическому и радиохимическому составу донных отложений озер и ручьев, коренных пород (гранитов), почв, а также поверхностных и подземных вод Баргузино-Чивыркуйского перешейка на Байкале. Установлен факт образования гейзерита в источнике Кулиные болота, представленного опалом, а в районе разгрузки вод источника Аранготуйского на геохимических барьерах в донных илах на органогенной составляющей происходит процесс современного формирования урана гидрогенного типа. Источником U являются отдельные массивы биотитовых гранитов, при этом легко подвижный уран составляет 35% от валового. Содержание урана в воде Аранготуйского источника составляет $204 \cdot 10^{-8}$ мкг/дм³, что во много раз превышает его геохимический фон, радиоактивность воды 120-132 мкР/ч, концентрация радона 324-360 Бк/дм³. Содержание урана в пробах донного ила, отобранных через 50 м от выхода источника вдоль русла ручья до 200 м, достигает 15 г/т.

Таким образом, уран из гранитных массивов Ангаро-Витимского плутона отлагается на площади Баргузино-Чивыркуйского перешейка, где на геохимических барьерах происходит процесс современного формирования урановой осадочно-инфильтрационной (гидрогенной) минерализации «Витимского типа».

• **Геохимические особенности поведения редкоземельных элементов (РЗЭ) в притоках озера Байкал.** Сопоставление распределения РЗЭ в притоках озера Байкал и в преобладающих породных комплексах водосборных бассейнов (Рис. 76) свидетельствует о том, что состав исходных пород является определяющим фактором в распределении РЗЭ в растворенном веществе речной воды.

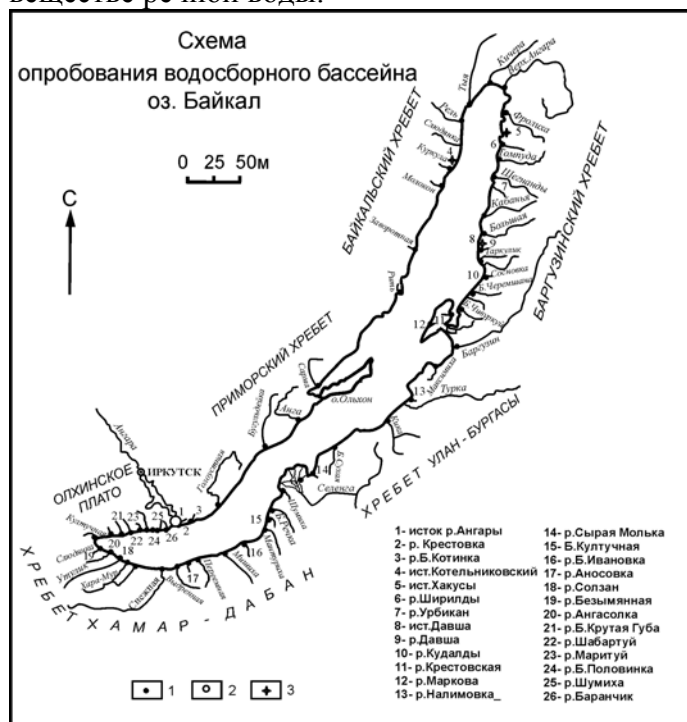


Рис. 76. Схема станций опробования притоков оз. Байкал.

1 - станции опробования притоков;
2 - исток р. Ангары;
3 - термальные источники.

Физико-химические параметры (рН и минерализация) имеют второстепенное значение, но оказывают влияние на абсолютные концентрации РЗЭ (Рис. 77). Крупные речные системы бассейна озера Байкал, такие, как Селенга, Баргузин, Верхняя Ангара, формируют состав воды на огромной площади притоками, дренирующими различные геологические структуры, и могут характеризоваться только усредненным распределением РЗЭ. Для ряда рек Байкальского хребта (западное побережье) отмечается наличие в распределении РЗЭ отчетливой отрицательной Eu аномалии, а притоки Баргузинского хребта (восточное побережье), наоборот, характеризуются

положительной аномалией Eu, что типично для дренируемых ими гранитов Ангаро-Витимского батолита. Положительные и отрицательные Eu аномалии являются непосредственной характеристикой водосборных бассейнов и наследуются притоками при взаимодействии воды с породами (Рис. 77). Низкие концентрации лантаноидов характерны для ряда рек Баргузинского хребта ($\Sigma\text{PЗЭ}_{\text{средн.}} = 0,29 \text{ мкг/дм}^3$). Для воды всех притоков озера Байкал характерно наличие отрицательной Ce аномалии. Ее величина варьирует в широких пределах от 0,10 до 0,97. Самыми значительными отрицательными аномалиями Ce характеризуются реки Байкальского хребта (0,10-0,38). Такое поведение Ce согласуется с его способностью в окислительных условиях достаточно легко переходить в 4-х валентное состояние, и намного быстрее, чем все остальные 3-х валентные РЗЭ, удаляться из раствора.

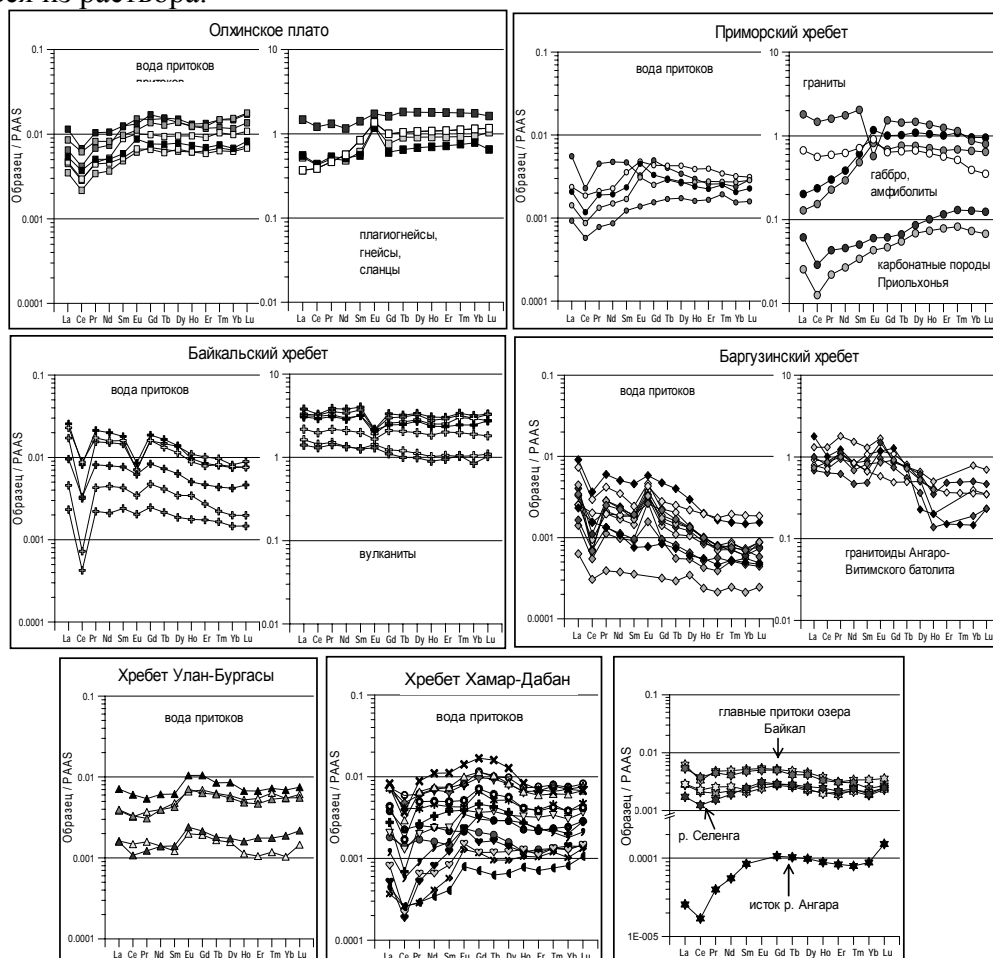


Рис. 77. Распределение РЗЭ в воде притоков озера Байкал и преобладающих комплексах водосборных бассейнов.

Блок 5. Радиоэкологическая оценка территории Байкальского региона (отв. исполнители: д.ф.-м.н. А.И.Непомнящих, к.ф.-м.н. Б.П.Черняго).

- В 2007-2009 гг. продолжено расширение сети наблюдений радиоэкологического мониторинга и заполнение радиоэкологической базы данных для мониторинговых наблюдений в сопряжённых природных средах территории Прибайкалья. В окрестностях посёлка Листвянка продолжены мониторинговые (серийные, всего 5 серий) наблюдения содержания изотопов радона в почвенном газе по профилю р. Мал. Черемшанка – р. Крестовка, проходящему через активные тектонические разломы (Рис. 78). Время между отдельными сериями измерений составляло от 3 до 10 дней. Планируется продолжение наблюдений.

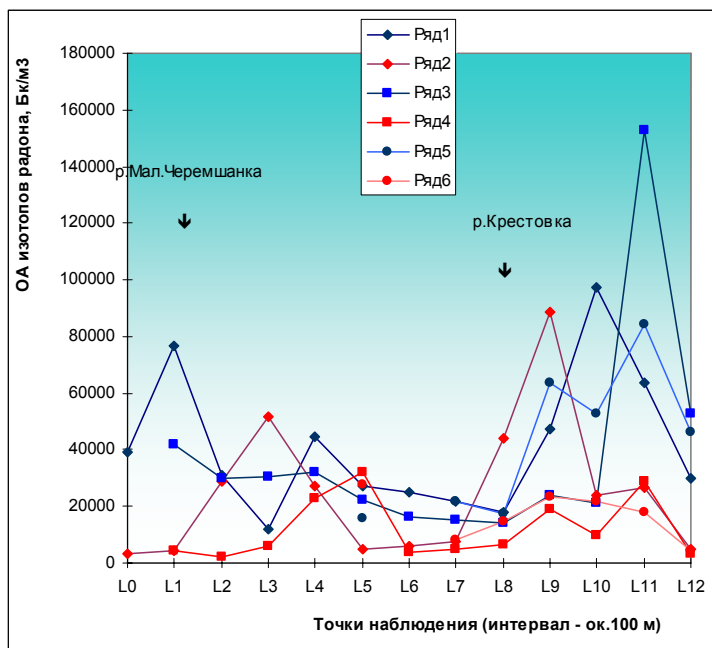


Рис. 78. Распределение объёмной активности изотопов радона по профилю р. Мал. Черемшанка – р. Крестовка (пос. Листвянка), пересекающему зону активных тектонических разломов (синие точки – ОА радона-220, красные – ОА радона-222).

Наибольшие по величине активности в почве радонопроявления приурочены к предгорьям Приморского хребта (участок Листвянка – Большие Коты, Малое и Большое Голоустное и вся южная часть Иркутского района), где отмечаются выходы коренных пород (в основном гранитоидов) с повышенным содержанием естественных радионуклидов и активные тектонические разломы. Средние объёмные активности изотопов радона в почвах южного Прибайкалья составляют величину около 10-30 тысяч Бк/м³, достигая в аномалиях 100-200 тысяч Бк/м³. По профилю в окрестностях пос. Листвянка, где также отмечаются высокие значения активностей изотопа радона в почвах, по полученным данным планируется провести корреляционный анализ с сейсмической активностью за период до и между сериями измерений, а также с данными по содержанию ртути в почве.

Отбор проб рыхлых донных отложений в мелководных заливах (пролив Малое Море) озера Байкал показал, что отмечаются максимумы содержания цезия-137 в слоях осадков на глубине от 5 до 20 см (Рис. 79), которые соответствуют максимумам (по времени) атмосферных радиоактивных выпадений от испытаний ядерного оружия на полигонах северного полушария. На глубинах после 15-25 см радионуклиды цезия-137 практически отсутствуют. Эта граница соответствует началу выпадений техногенных радионуклидов.

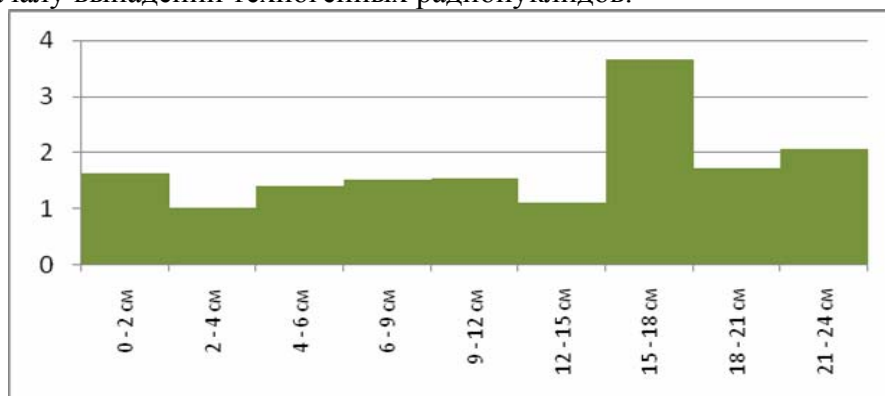


Рис. 79. Типичные гистограммы распределения содержания цезия-137 в донных осадках мелководных заливов озера Байкал (заливы Эхе-Нур, Зама, Курма, соотв.).

Современная радиационная обстановка на территории южных районов Иркутской области, в т.ч. по содержанию техногенных радионуклидов в окружающей среде, считается благополучной. С целью сравнения дозовых нагрузок на население от давних радиоактивных выпадений выполнена оценка современной эффективной дозы от природных источников излучения. В отдельных населённых пунктах Прибайкалья наблюдается напряжённая «радоновая» обстановка – в жилых и

общественных зданиях отмечены повышенные и высокие содержания изотопов радона. Средняя годовая индивидуальная эффективная доза от природных источников радиации, с учётом «радоновой» составляющей и фона внешнего гамма-излучения (Рис. 80), для жителей обследуемых посёлков Малое Голоустное, Листвянка и Большая Речка Иркутского района оценивается величиной 4-5 мЗв/год, что соответствует накопленной за 60 лет (пожизненной) дозе около 60-120 мЗв с учётом времени пребывания в помещениях. Для жителей этих посёлков, проживающих в домах с высоким среднегодовым содержанием радона (более 200 Бк/м³), накопленные эффективные дозы могут достигать 600 мЗв.

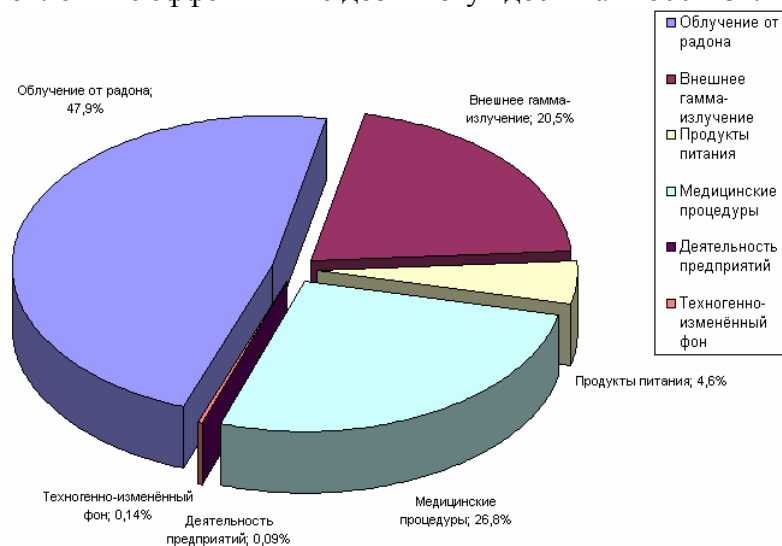


Рис. 80. Средняя годовая эффективная доза облучения жителя Прибайкалья от всех источников радиации, включая природный фон (с учётом внутреннего облучения от радона), медицинские радиологические процедуры и техногенные источники.

В современных условиях основной вклад в годовую эффективную коллективную дозу населения Иркутской области – т.е. 73% от суммарной - вносят природные источники, в том числе радон – около 50%, внешнее гамма-излучение от земли и космоса – около 20%. 26% от суммарной коллективной дозы формируется за счёт медицинских процедур с использованием радиоактивных веществ и генераторов ионизирующего излучения.

От деятельности предприятий, использующих радиоактивные вещества, вклад в эффективную дозу населения (в основном, персонал) составляет 0,09%, от техногенно изменённого фона – до 0,14%.

Таким образом, при изучении загрязнения Прибайкалья техногенными радионуклидами получены убедительные факты и радиэкологические данные о том, что значительная часть территории области испытала радиоактивное загрязнение вследствие ядерных испытаний на ядерных полигонах. При этом участки наибольшего радиоактивного загрязнения продуктами ядерных испытаний и территории с высокой природной радиацией нередко совпадают друг с другом, что свидетельствует о приоритетном значении проблемы радиационной безопасности Байкальского региона, и требует учета при планировании устойчивого развития территории. Предполагается, что по радиэкологическим данным, удовлетворяющим требованиям разработанной методики, будут составляться «паспорта» на обследованные населенные пункты Прибайкалья и базы данных (выборка) по оценкам индивидуальных дозовых нагрузок, которые станут основой для медицинских программ по реабилитации здоровья местного населения.