

УДК 550.4: 504.0549(571.50)

ОБОСНОВАНИЕ ПРОГРАММ ЭКОГЕОХИМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРИРОДНЫХ СРЕД В РЕГИОНЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ

В.А. Ветров

Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН,
Россия, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 20Б, vetrov.igce@mail.ru

Реферат. Работа посвящена проектированию программ эколого-геохимического мониторинга геосистемы Байкала, под которым понимается система регулярных наблюдений за содержанием химических веществ в водах озера и притоков, в атмосферных осадках, донных отложениях, почвах, в представителях водной и наземной биоты. Цель мониторинга – оценка степени антропогенного влияния на естественные (фоновые, «доиндустриальные») уровни химических веществ в воде озера и в перечисленных компонентах его геосистемы. Из анализа балансовой модели следует, что основной задачей мониторинга воды озера должно стать надежное определение приходных и расходных составляющих баланса химических веществ в озере, в первую очередь, химического стока в озеро с водами притоков и выведения наблюдаемых веществ из водной массы в донные отложения.

На основе анализа прогнозируемых темпов изменения гидрохимического режима Байкала оцениваются основные пространственно-временные параметры программы гидрохимического мониторинга выделенных частей водной массы озера. Подобные рекомендации делаются для программ мониторинга контролируемых веществ в притоках, в атмосферных осадках, донных отложениях, почвах, гидробионтах (планктон, моллюски, рыбы, нерпа), наземной растительности (лишайники, хвоя).

Ключевые слова: озеро Байкал, эколого-геохимический мониторинг, балансовая модель, водная масса, притоки, атмосферные осадки, донные отложения, гидробионты, индикаторные растения.

RATIONALE FOR ECOGEOCHEMICAL MONITORING PROGRAMS FOR LAKE BAIKAL REGION

V.A. Vetrov

Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russia,
vetrov.igce@mail.ru

Summary. The paper considers projecting ecogeochemical monitoring programs for Lake Baikal geosystem, i. e. monitoring of chemical substances' content in the Lake and tributary waters, atmospheric pre-

precipitations, bottom sediments, soils, aquatic and terrestrial biota indicator specimens. The general objective of monitoring is an assessment of man-made impact on natural (background, "preindustrial") levels of chemical substances in geosystem environments. The previous analysis of the Lake chemical budget showed that the basic task of the Lake waterbody monitoring should be a reliable assessment of input and output components of the budget of monitored chemical substances in the Lake, first of all, input of monitored chemicals with inflow waters and their output through deposition to the bottom sediments.

Space-time monitoring programs for the dedicated Lake waterbody compartments are proposed based on predicted rates of the Lake water chemical composition changes. Similar programs are provided for monitoring of chemical substances in tributaries, atmospheric precipitations, bottom sediments, soils, aquatic biota (plankton, mollusks, fish, seal) and terrestrial plant specimens (lichens, conifer needles) indicating atmospheric pollutants.

Keywords: Lake Baikal, ecogeochemical monitoring, chemical substances, budget model, space-time program, Lake waterbody, tributaries' waters, atmospheric precipitations, bottom sediments, soils, aquatic biota, terrestrial plants.

Введение

Эколого-геохимический мониторинг геосистемы Байкала мы определяем, как систему регулярных наблюдений за содержанием химических веществ в основных компонентах геосистемы озера: в водах озера и притоков, в атмосферных осадках на озеро и водосборный бассейн, в донных отложениях озера, в почвах водосборного бассейна, в представителях водной и наземной биоты (последняя – в прибрежных районах озера).

Общая цель экологохимического мониторинга – получение необходимых и достаточных знаний для информационного обеспечения управления качеством среды. Решение задачи экологохимического мониторинга предполагает оценку степени антропогенного влияния на естественные (фоновые, «доиндустриальные») уровни элементов в природных средах геосистемы озера в текущем времени и в обозримом будущем.

Краткий анализ практики наблюдений за состоянием озера Байкал за последние 30 лет (Обзор фонового загрязнения..., 1983, Качество поверхностных вод..., 2011-2014 гг.) обнаруживает отсутствие как внятных программ мониторинга, так и концептуальных обоснований проводимых наблюдений. В настоящем сообщении изложены концептуальные основы экологохимического мониторинга, которые применяются для обоснования программ мониторинга содержания химических веществ в основных компонентах геосистемы Байкала.

Методология

Методология разработки программ мониторинга основана на его каноническом определении в виде трех основных взаимосвязанных направлений (этапов) деятельности: наблюдения, оценка, прогноз (Израэль, 1984). Нами принято более широкое концептуальное определение мониторинга антропогенных изменений природной среды как системы наблюдений, оценки и прогноза состояния среды с целью научного и информационного обеспечения управления качеством среды (рис. 1) (Ветров, 1985; Ветров, Кузнецова, 1997). Это определение не противоречит «каноническому», однако ставит мониторинг в строго подчиненное положение по отношению к практическим задачам контроля и управления качеством природной среды во всей сфере взаимоотношений общества и природы. Это уточнение дает возможность использовать определенные критерии для установления приоритетов при выборе объектов наблюдений и планировании пространственно-временной матрицы наблюдений, т.е. оптимизировать систему в условиях заведомо ограниченных затрат на ее функционирование.

Следует пояснить содержание этапов в блоке «Мониторинг антропогенного загрязнения окружающей природной среды» (рис. 1) для деятельности в рамках эколого-геохимического мониторинга геосистемы Байкала.

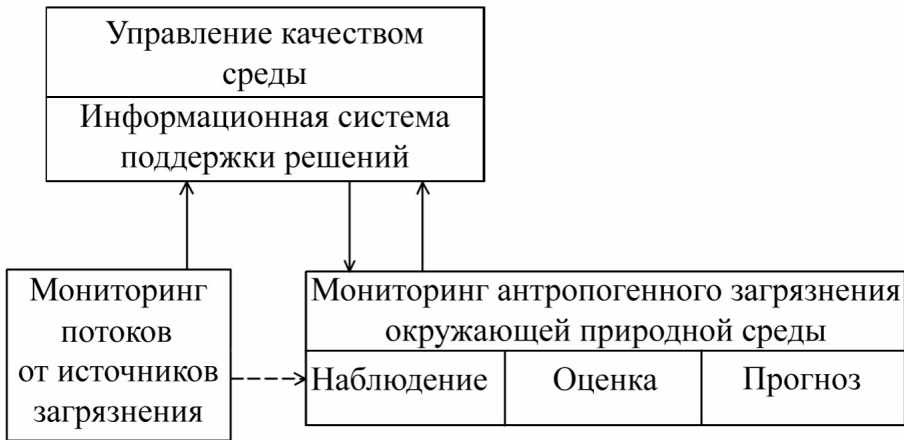


Рисунок 1 – Концептуальная схема мониторинга антропогенного загрязнения окружающей среды для решения задач управления качеством среды.

Наблюдение. Обоснование программы наблюдений экогеохимического мониторинга сводится к краткому анализу целей и задач мониторинга химического (элементного) состава основных компонентов среды в границах рассматриваемой геосистемы на основе совокупности знаний в этой области, в итоге – к выбору контролируемых элементов и периодичности наблюдений. Предлагаемые про-

граммы должны обеспечить достаточным объемом данных этапы оценки и прогноза экогеохимического состояния геосистемы озера (состояния по экогеохимическим показателям) в соответствии с требованиями блока «Информационная система поддержки решений». Следует подчеркнуть, что наблюдения в аспекте мониторинга проводятся на иных методологических принципах, чем чисто научные исследования.

Оценка состояния среды. Под экогеохимическим состоянием природных сред мы понимаем содержание в них химических элементов, соотнесенное к естественным природным концентрациям – кларкам, ферсмам и локальным уровням содержания, которые для краткости обычно называют природным («доиндустриальным») фоном. Необходимо иметь четкие количественные (по крайней мере, полуколичественные) критерии для оценки экогеохимического состояния и его изменения под действием антропогенных факторов.

При этом мы *a priori* отказываемся от использования в качестве критериев таких чисто «антропогенных» показателей, как предельно- или ориентировочно-допустимые концентрации, или уровни (ПДК, ОДК, ОДУ) и т. п., как прямо не относящихся к собственно геохимическим показателям состояния природных экосистем.

Оценка экогеохимического состояния природной экосистемы (или её компоненты) должна дать ответы на два основных вопроса:

- обнаружено ли достоверное повышение уровней природного («доиндустриального») геохимического фона за счет действия техногенных или иных факторов?
- являются ли обнаруженные изменения (тренды) угрожающими с точки зрения сохранения геохимического фона геосистемы?

Ответ на последний вопрос может быть получен, в основном, с привлечением прогнозных расчетов, выполняемых на этапе мониторинга «Прогноз» (рис. 1).

Прогноз. По существу, этот этап является ключевым для решения основной задачи мониторинга, поскольку прогнозные модели служат для организации как имеющихся данных, так и всей системы мониторинга. Выходные результаты этапа «прогноз» могут иметь решающее значение для блока «Управление качеством среды» (рис. 1). Это наиболее «наукоемкий» раздел мониторинга, поскольку для разработки даже относительно простых моделей требуются достаточно глубокие и разносторонние знания рассматриваемой природной среды, накопленные в ходе специальных научных исследований. Поэтому одной из задач этого этапа должен быть сбор и обобщение научных знаний, необходимых для разработки прогнозных моделей.

Таким образом, научное обоснование программ мониторинга должно опираться на уже известные знания об объекте монито-

ринга. Такая тесная системная взаимосвязь мониторинга и научного исследования часто приводит к смысловой и терминологической путанице, когда результаты традиционно научных исследований выдаются за данные мониторинга, а режимные (систематические) наблюдения в аспекте мониторинга рассматриваются как результат научного исследования. В то же время системная взаимосвязь мониторинга и научного исследования – необходимое условие разработки оптимальных программ мониторинга при неизбежной ограниченности ресурсов (Ветров, Кузнецова, 1997).

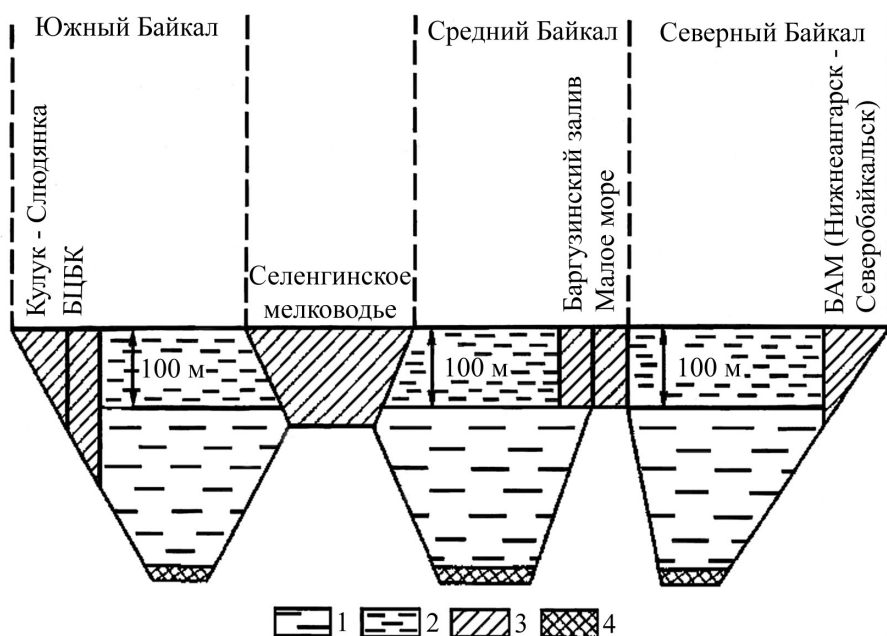
Мониторинг воды озера

Исходя из различий в пространственном и временном распределении химических веществ в водной массе Байкала, К.К. Вотинцев (1978) разделял показатели (компоненты) природного химического состава воды Байкала на две группы. К *первой* относились все показатели гидрохимического состава: pH, минерализация, HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ . К этой же группе мы относим микроэлементы в растворенных формах (Ветров, Кузнецова, 1997).

Ко *второй* группе, по К.К. Вотинцеву (1978), относятся компоненты, тесно связанные в своей динамике с протекающими в водоеме биологическими процессами: нитратный азот, фосфатный фосфор, свободная углекислота, растворенный кислород и органическое вещество. Наиболее отчетливые изменения этих показателей тесно связаны с сезонными циклами в развитии фитопланктона в трофогенном слое (до 100 м глубины), где происходит процесс фотосинтеза (Тарасова, 1976). Как показывают наблюдения и расчеты, ввиду олиготрофности Байкала биологическая ассимиляция биофильных элементов, таких как Na, K, Fe, Zn, Br, даже в периоды наибольшего развития фитопланктона, не снижает в заметных пределах концентраций этих веществ в трофогенном слое (Ветров, Кузнецова, 1997).

Классификация К.К. Вотинцева нами расширена до *третьей* группы – загрязняющие вещества антропогенной природы. С учетом их токсичности и значимости в региональном и глобальном масштабах контролируемыми веществами в Байкале должны быть: фенолы, углеводороды (нефтепродукты), пестициды, СПАВ, тяжелые металлы (Ветров, Кузнецова, 1997). Следует отметить, что кроме специфических синтетических веществ, таких как пестициды и СПАВ, в группу загрязняющих веществ могут попасть вещества природного происхождения, присутствующие в воде озера в фоновых концентрациях (например, фенолы или токсичные металлы).

С учетом особенностей водообмена и формирования гидрохимического режима Байкала в водной массе озера нами выделяются гидрохимические зоны и районы озера, в которых могут наблюдаться особенности гидрохимического состава в пространстве и во времени (рис. 2).



Обозначения: 1 – глубоководные зоны каждой котловины; 2 – трофогенный и динамически активный слой пелагиали каждой котловины; 3 – зоны возможного антропогенного влияния; 4 – придонный слой.

Рисунок 2 – Гидрохимические зоны и районы озера Байкал (Ветров, Кузнецова, 1997).

1. Глубоководные зоны трех частей (котловин) озера: ниже 100 м и до придонного слоя. Здесь сосредоточена основная масса (около 80%) озерной воды. Химический состав вод отличается большей однородностью (гомогенностью) и стабильностью (Галазий, 1987; Грачев, 2001).

2. Трофогенный и динамически активный слой пелагиали каждой котловины: глубина – от поверхности до 100 м. Этот слой – аналог «океанского тандема», используемого при описании и моделировании гидрохимического режима океанских вод (Киплинг, 1976). В этом слое производится основная продукция (до 90%) органического вещества в озере, с которой связаны все суточные, сезонные и пространственные вариации гидрохимических показателей второй группы и некоторых показателей третьей группы (например, фенола).

3. Зоны возможного антропогенного влияния – районы озера, подверженные прямому действию потоков загрязняющих веществ. Наиболее значительные районы: южная оконечность озера (Кулук-Слюдянка), район Байкальского ЦБК, Селенгинское мелководье, Баргузинский залив, Малое море, район БАМ (Северобайкальск).

4. *Придонный слой*: толщина – от нескольких метров от дна до 0,1 глубины озера в месте наблюдения. Выделение этого слоя в особую зону гидрохимических наблюдений связано с возможностью накопления в нем веществ третьей группы, а также с задачами мониторинга донных отложений.

Одной из наиболее сложных задач мониторинга содержания химических веществ в природных водах является выделение, так называемых *базовых уровней*, на фоне природной пространственно-временной изменчивости концентраций. Термин *базовый уровень* был заимствован нами из обзорных работ по изучению элементного состава вод мирового океана, в которых он обозначал генеральное среднее содержание элемента в морской воде по достаточно большим выборкам данных, полученных независимыми коллективами исследователей. В геохимическом аспекте *базовый уровень* элемента должен соответствовать его кларку в океанской воде. Тот же смысл мы придаем термину *базовый уровень* в отношении как вод озера Байкал в целом, так и отдельных частей его водной массы. Физический смысл базового уровня – это концентрация элемента, полученная путем усреднения имеющихся данных по объему наблюдаемой водной массы.

Общий подход к определению базовых уровней наблюдаемых веществ в водах Байкала основан на стохастической природе определяемых концентраций и, как следствие, на статистической интерпретации данных наблюдений. Для мониторинга изменения содержания микропримесей (менее 100 мкг/л) загрязняющих веществ в воде озера нами был предложен подход, основанный на определении набора показателей статистического распределения наблюдаемых концентраций, а именно: среднее значение выборки $\bar{C}$ (базовый уровень); стандартное отклонение S ; медианное значение $\overline{X}_{50}$; квантили (в %) различной степени обеспеченности – X_5 , X_{25} , X_{75} , X_{90} , X_{95} . При этом степень близости вида распределения к нормальному, логнормальному, либо к какому-то другому закону, не имеет особого практического значения (Ветров, 1985; Ветров, Кузнецова, 1997).

Критерием оценки гидрохимического состояния водной массы озера служит сравнение показателей распределения наблюдаемых концентраций элементов в воде озера с соответствующими фоновыми («доиндустриальными») показателями, прежде всего с базовыми уровнями.

Другой фундаментальный критерий – степень нарушения баланса приходных и расходных потоков элементов в водной массе. Для осуществления оценок по этому критерию была разработана простая «резервуарная» балансовая модель изменения массы m контролируемого вещества в озере со временем (рис. 3) (Ветров, Кузнецова, 1997):

$$\frac{dm}{dt} = (P_a + P_T + P_r + P_u) - (P_A + P_s) = P(t) \quad (1)$$

где составляющими приходной и расходной частей баланса (потоками, т/год) являются:

P_a – поступление вещества на зеркало озера с атмосферными осадками;

P_T – антропогенный (техногенный) сток от источников непосредственно в озеро;

P_r, P_u – поступление с речным и подземным стоком;

P_A – вынос вещества с водами Ангары;

P_s – выведение вещества из водной массы со взвешенным материалом в донные отложения;

$P(t)$ – так наз. «невязка баланса», разность между его приходной и расходной частями.

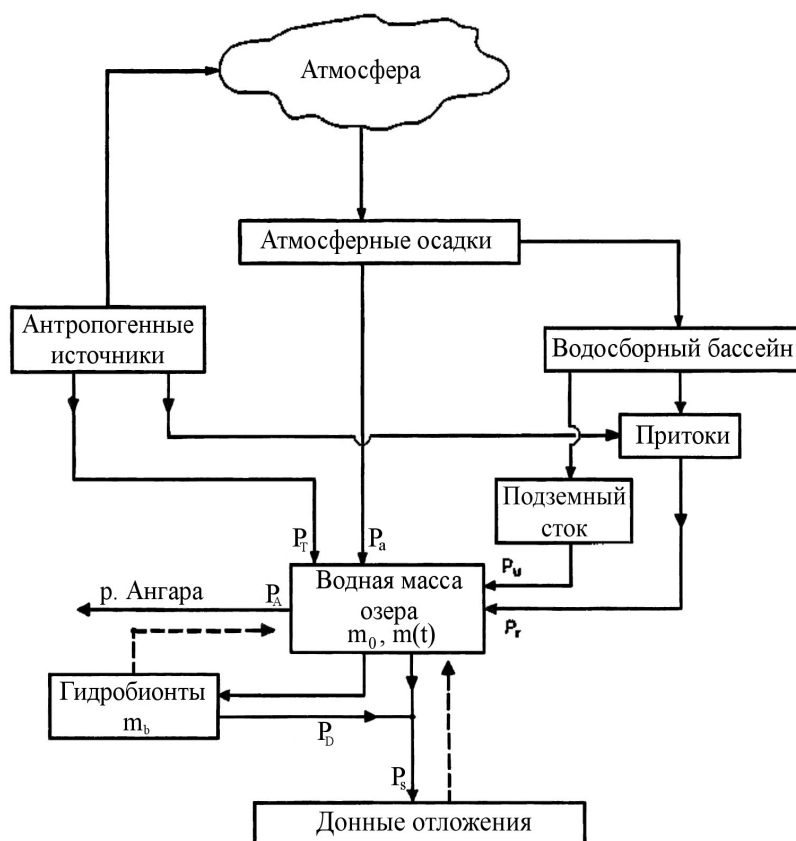


Рисунок 3 – Схема основных путей миграции химических элементов в водосборном бассейне оз. Байкал

Решение модели (1) имеет вид:

$$\frac{m}{m_0} = \frac{P(t)}{\lambda_A \cdot m_0} - \left(\frac{P(t)}{\lambda_A \cdot m_0} - 1 \right) e^{-\lambda_A t} \quad (2)$$

где: m_0 – масса вещества в озере в начальный момент времени $t = 0$;

$\lambda_A = Q_A/V$ – постоянная величина водообмена ($Q_A = 60,4 \text{ км}^3/\text{год}$ – водный сток из озера, $V = 21,7 \cdot 10^3 \text{ км}^3$ – объем водной массы озера $\lambda_A = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$).

С учетом большого периода водообмена в озере (около 360 лет) при горизонте прогноза менее нескольких десятков лет ($t < 50$ лет) решение уравнения (2) можно с хорошей степенью приближения представить в виде линейной зависимости m от t (2), или (относительно средней концентрации вещества $\bar{C} = m/V$) $\bar{C}$ от t при условии $P(t) \approx \text{const}$ (Ветров, Кузнецова, 1997):

$$\frac{\bar{C}}{\bar{C}_0} = 1 + \left(\frac{P(t)}{m_0} - \lambda_A \right) \cdot t \quad (3)$$

В работе (Ветров, Кузнецова, 1997) нами были сделаны расчеты роста средних концентраций сульфатов (SO_4^{2-}) и хлоридов (Cl^-) в водах озера Байкал по модели (3), в которой параметры $P(t)$ для этих веществ оценивались по наиболее представительным данным наблюдений на начало 1990 гг., полученным в 1991 г. (Falkner et al., 1991). При этом считалось, что доля поступления веществ в озеро с подземными водами P_u должна была иметь тот же порядок величины, что и доля подземного стока в общем водном стоке в озеро, т.е. порядка нескольких процентов. С учетом того, что точность используемых значений компонентов баланса оценивалась нами в пределах $\pm 20\%$, вкладом подземного стока в приходную часть баланса можно было пренебречь.

Что касается термальных или других подземных вод, имеющих тектоническую природу, то в целом их влияние на микроэлементный состав байкальских вод практически не изучено. Можно лишь предположить, что это влияние вряд ли выходит за пределы небольших участков дна, где эти воды могут поступать в придонные слои водной массы озера. Таким образом, в соответствии с имеющимися в 1990 гг. представлениями, основной составляющей приходной части баланса химических веществ в озере оставался химический сток притоков.

Согласно результатам расчетов, при сохранении постоянного значения «невязки» $P(t)$ линейный рост концентраций SO_4^{2-} и Cl^- должен был происходить со скоростью, порядка 1% и 9% за 20 лет,

соответственно. Понятно, что это были консервативные оценки; реальные темпы роста концентраций SO_4^{2-} и Cl^- , по-видимому, должны были быть в несколько раз ниже расчетных, т.е. не выше 1-3% за 20 лет.

Отсюда следует фундаментальный для мониторинга Байкала вывод о принципиальной невозможности инструментального обнаружения роста средних концентраций этих веществ в воде озера даже при периодичности прямых наблюдений «одна съемка за 10 лет» (Ветров, Кузнецова, 1997). Иллюстрацией к этому выводу служит табл. 1, в которой приведены различные оценки содержания SO_4^{2-} и Cl^- в воде озера Байкал в 1982 – 2013 гг., т.е. за 30-летний период после отправной точки нашего прогноза (1980 год). Как видно из этих данных, оценки средних концентраций сульфатов в Байкале различаются в пределах 5,2-6,0 и не обнаруживают определенного тренда во времени. В то же время оценки средних концентраций хлоридов, полученные разными группами исследователей, расходятся более чем в 2 раза!

Таблица 1 – Средние концентрации ионов SO_4^{2-} и Cl^- (мг/л) в воде Байкала по данным разных исследователей в 1982-2013 гг.

	1982 (Обзор фонового загрязнения..., 1983)	1987 (Галазий, 1987)	1991 (Falkner et al., 1991)	2001 (Грачев, 2001)	2010 (Качество поверхностных вод, 2011)	2011 (Качество поверхностных вод, 2012)	2012 (Качество поверхностных вод, 2013)	2013 (Качество поверхностных вод, 2014)
SO_4^{2-}	5,6	5,2	5,5	5,5	5,7	6	5,3	5,5
Cl^- , мг/л	0,8	0,60	0,44	0,4	0,95	0,85	0,9	0,95

Примечание: данные *Качество поверхностных вод* за 2010 – 2013 гг. (2011 – 2014) – для Южного Байкала

На основе анализа ожидаемых темпов изменения гидрохимического режима вод Байкала нами сделаны оценки основных параметров программы мониторинга воды оз. Байкал по гидрохимическим показателям (табл. 2).

Таблица 2 – Рекомендуемая периодичность мониторинговых наблюдений за гидрохимическими показателями в различных зонах водной массы Байкала, годы.

Зона водной массы	Компоненты основного состава, микроэлементы	Биогенные вещества	Загрязняющие вещества
Пелагиаль			
Трофогенный слой	10–12	7–10 ^{*)}	5–7
Глубоководные зоны трех котловин	10–12	7–10	5–7
Придонные слои	10–12	10–12	7–10
Районы антропогенного влияния, придельтовые районы основных притоков			
Трофогенный слой	7–10	5–7 ^{*)}	3–5

^{*)} Отбор проб в период наиболее полной депрессии в развитии фитопланктона, т.е. от декабря до начала февраля (Тарасова, 1976).

Мониторинг водной биоты

Гидробионты, как объект мониторинга загрязняющих веществ, имеют определенные преимущества перед мониторингом воды. Концентрации практически всех металлов в сырой биомассе гидробионтов любого трофического уровня, по крайней мере, в сотни раз выше, чем в воде озера. Это резко повышает аналитические возможности мониторинга, особенно для токсичных элементов со сверхнизкими фоновыми концентрациями: As, Se, Cd, Hg, Pb.

Удобным объектом мониторинга элементного состава вод открытого Байкала могут служить массовые виды зоопланктона – эпишура и макрогектопус. Основные задачи исследований, которые необходимо провести для получения необходимых знаний: определение времени отбора проб в годовом и многолетних циклах изменения биомассы планктона; разработка методологии исследований (от отбора до анализа); определение статистических характеристик природных и аналитических вариаций содержания элементов в пробах.

Для мониторинга загрязнения относительно ограниченных литоральных зон озера с повышенной антропогенной нагрузкой наиболее подходящими объектами наблюдений был бы брюхоногий моллюск вида *Benedictia baicalensis* в виду его способности «инте-

грировать» медленные изменения уровней загрязнения в течение всей жизни в условиях относительно ограниченного биотопа. Такой же интегрирующей способностью обладают ткани рыб и нерпы (Ветров, Кузнецова, 1997). По этой причине представители высших видов ихтиофауны традиционно рассматриваются как наиболее подходящие и удобные индикаторы медленных изменений фоновых уровней токсичных металлов в природных водах.

Периодичность наблюдений за содержанием контролируемых веществ в гидробионтах мы оцениваем в 5-10 лет, в зависимости от района наблюдений (табл. 3).

Таблица 3 – Рекомендуемая периодичность мониторинговых наблюдений за содержанием загрязняющих веществ и химических элементов в гидробионтах озера Байкал

Вид	Определяемые показатели	Периодичность, лет	
		Пелагиаль	Литораль
Зоопланктон (эпишура, макрогектопус)	Загрязняющие вещества, хим. элементы	3-5	–
Моллюск <i>Benedictia baicalensis</i>	Загрязняющие вещества, хим. элементы	–	3-5
Рыба, нерпа	Загрязняющие вещества, хим. элементы	3-5	3-5

Мониторинг притоков

Общий вывод из анализа расчетов по балансовой модели (1) состоит в том, что основной задачей мониторинга загрязнения воды озера должно стать как можно более надежное определение приходных и расходных составляющих баланса, в первую очередь, поступления с водами притоков и выведения в донные отложения.

При организации мониторинга химического стока притоков следует учесть, что около 80% водного и более 90% химического стока в озеро приходится на долю девяти притоков, каждый из которых имеет среднегодовой водный сток более 1% от суммарного: Селенга (50%), Верхняя Ангара (13,6%), Баргузин (6,6%), Снежная (2,6%), Турка (2,5%), Тья (1,9%), Томпуда (1,5%), Кика (1,4%), Хара-Мурин (1,4%). При этом, основная доля антропогенного химического стока будет приходиться на долю Селенги, Верхней Ангара и Баргузина. Рост антропогенной составляющей химического стока в современный период можно оценить не выше 1-2% в год, в среднем не более 20% за десятилетие. Исходя из этой оценки, для опреде-

ления трендов поступления контролируемых веществ в озеро в табл. 4 приведены наши оценки периодичности мониторинговых наблюдений за химическим стоком четырех групп притоков – от 3-5 (Селенга, Верхняя Ангара, Баргузин), до 7-10 лет (Тыя, Томпуда, Кика, Хара-Мурин).

В такой схеме ежегодными наблюдениями будут охвачены устьевые участки в среднем 3-4 рек, что вполне доступно для современного уровня затрат на мониторинг. Отметим, что подробные (10-15 отборов в год, более или менее равномерны по основным гидрологическим фазам) наблюдения на одном притоке имеют гораздо большую ценность, чем отрывочный и хаотичный пробоотбор одновременно на нескольких притоках.

Таблица 4 – Рекомендуемая периодичность мониторинговых наблюдений за химическим стоком основных притоков Байкала

Группа притоков (% водного стока)	Среднегодовой водный сток, %	Периодичность мониторинга химического стока, лет
Селенга (50%) Верхняя Ангара (13,6%) Баргузин (6,6%)	~ 70	3-5
Снежная (2,6%) Турка (2,5%) Тыя (1,9%)	~ 7	5-7
Томпуда (1,5%) Кика (1,4%) Хара-Мурин (1,4%)	~ 4	7-10
Остальные (< 1% каждый)	< 20	10-12

Мониторинг атмосферных осадков и наземной биоты

Очевидно, что нарушение химического баланса в озере вследствие загрязнения атмосферных осадков следует ожидать лишь в тех случаях, когда концентрации химических веществ в них будут значительно (в несколько раз) превышать соответствующие базовые уровни в воде озера. Основной путь поступления в озеро загрязняющих веществ в составе осадков – смыв этих веществ с водосборного бассейна с водами притоков.

Для учета всех путей поступления химических веществ с атмосферными осадками в природные среды региона предлагаются следующие этапы 4-летнего цикла наблюдений, каждый – продолжительностью в 1 год:

- 1) осадки на водную поверхность в теплое время года;
- 2) снежные осадки на ледовый покров;
- 3) осадки на береговые районы;
- 4) осадки в фоновых районах на водосборном бассейне.

Эпифитные лишайники, хвоя пихты и кедра могут служить индикаторами содержания загрязняющих веществ в атмосферных осадках, обладающими свойством накапливать эти вещества за время жизни. Рекомендуемая периодичность наблюдений – синхронно с наблюдениями за химическим составом атмосферных осадков в соответствующем районе суши.

В табл. 5 приведены оценки годовых потоков сульфатов и хлоридов в оз. Байкал с водами Селенги и с атмосферными осадками по данным наблюдений в 1983-2013 гг. (Ветров, Кузнецова, 1997; Качество поверхностных вод за 2010-2013 гг., 2011-2014 гг.). Данные табл. 5 иллюстрируют большой разброс оценок (до двух раз и более), что ставит под сомнение возможность их использования для прогнозных расчетов по балансовой модели (1).

Таблица 5 – Поступление сульфатов и хлоридов в оз. Байкал с водами Селенги и с атмосферными осадками в 1983-2013 гг.

	1983	2010	2011	2012	2013
	(Ветров, Кузнецова, 1997)	(Качество поверхностных вод, 2011)	(Качество поверхностных вод, 2012)	(Качество поверхностных вод, 2013)	(Качество поверхностных вод, 2014)
Поток с водами р. Селенга, тыс. т/год					
SO_4^{2-}	493	225	218	295	386
Cl^-	64	49	40	47	60
Поток с атмосферными осадками на Ю. Байкал, тыс. т/год ^{*)}					
SO_4^{2-}	9	15	14	20	12

^{*)} в 2010-2013 гг. – среднее по данным, приведенным в Качество поверхностных вод 2010-2013.

Мониторинг почвы

Гидрохимический режим Байкала формируется, в основном, водами притоков. Гидрохимия вод притоков, в свою очередь, определяется поверхностным стоком атмосферных осадков и подземным стоком. Таким образом, денудация химических веществ с почв водосборного бассейна – один из основных источников поступления загрязняющих веществ в озеро. Поэтому вполне логично программу наблюдений за загрязнением почв в водосборном бассейне координировать с программой наблюдений за химическим стоком с водами притоков. Это означает, что мониторинг содержания приоритетных загрязняющих веществ (Hg, Pb, пестициды и т.п.) в верхнем слое почв в водосборном бассейне каждого притока следует синхронизировать со временем наблюдений за химическим стоком данного притока. Рекомендуемая периодичность обследования почв на водосборных бассейнах основных притоков (табл. 4) – от 5 (Селенга, Верхняя Ангара, Баргузин) до 10 лет (Томпуда, Кика, Хара-Мурин); для остальных притоков (выборочно) – 10-15 лет. Рекомендуемая плотность относительно равномерной сети точек отбора почв – 10-40 точек на площадь водосборного бассейна.

Мониторинг донных отложений

С учетом скорости осадконакопления, в придельтовых районах основных притоков озера определение химического состава верхнего слоя (~10 мм) натурального осадка может осуществляться синхронно с соответствующей гидрохимической съемкой в этих районах, либо с мониторингом химического стока, т.е. один раз в 3-10 лет (табл. 2, 4). Основная трудность – определение средних значений наблюдаемых показателей на выбранном полигоне мониторинга донных осадков. Примером могут служить данные табл. 6, которые демонстрируют вариабельность наблюдаемых концентраций бенз(а)пирена (БП) на полигоне мониторинга донных осадков на севере озера Байкал в 1984, 1988, 2013 гг.

Таблица 6 – Содержание бенз(а)пирена (БП) в донных отложениях на севере озера Байкал в 1984, 1988, 2013 гг., (в скобках – интервал значений, знаменатель – среднее значение, мкг/кг) (Качество поверхностных вод за 2013г., 2014)

1984 г.	1988 г.	2013 г.
(0,7 – 7,6) / 2,9	(0,1 – 3,4) / 1,3	(0,6 – 10,6) / 3,0

Практически непреодолимая трудность при попытке экогеохимического мониторинга пелагических донных осадков путем «прямых» наблюдений за химическим составом самих осадков обусловлена крайне низкой скоростью осадконакопления в глубоководных зонах

озера. Последние исследования с использованием радиоактивных меток ^{137}Cs и ^{210}Pb дают среднее значение скорости осадконакопления в глубоководных зонах озера около 0,3 мм/год натурального осадка, что соответствует потоку сухой массы в среднем около 7 мг/см²·год при разбросе оценок 3-18 мг/см²·год (Edgington et.al., 1991).

Отбор верхних 3-5 мм натурального осадка (за 10 лет накопления) – технически достаточно сложная процедура. В этой ситуации, согласно мировому опыту (Великие озера США, озера Швейцарии, см., например, Sigg et al., 1987), перспективной методологией мониторинга пелагических донных отложений является отбор потока осаднения взвешенного материала с помощью набора седиментационных ловушек, устанавливаемых обычно на трех горизонтах: порядка 50-100 м, на средней глубине и в 20-50 м от дна. При минимальном потоке порядка 3 мг/см²·год ловушка площадью 1 м² при 6-месячной экспозиции позволит собрать 10-20 г сухого вещества взвеси, что вполне достаточно практически для всех видов химического анализа. В качестве оптимального варианта можно рекомендовать годовой отбор в 2-3 точках пелагиали каждой котловины озера, с периодичностью 3-летнего цикла отбора (по году в каждой котловине) в 5-7 лет.

Заключение

Эколого-геохимический мониторинг геосистемы Байкала определяются как система наблюдений за содержанием химических веществ в водах озера и притоков, в атмосферных осадках, донных отложениях, почвах, в представителях водной и наземной биоты. Задачи экогеохимического мониторинга – оценка и прогноз степени антропогенного влияния на естественные (фоновые, «доиндустриальные») базовые уровни элементов в природных средах геосистемы озера.

В основу разработки программ эколого-геохимического мониторинга вод озера Байкал положен анализ составляющих приходной и расходной статей баланса химических веществ в озере. В первую очередь, следует надежно определять химический сток с водами притоков и поток выведения наблюдаемых веществ из водной массы в донные отложения. Нет смысла строить сложные прогнозные модели, пока точность оценки составляющих баланса контролируемых веществ не улучшится до уровня порядка $\pm 10\%$ от среднего значения каждой составляющей.

С учетом особенностей водообмена и формирования гидрохимического режима Байкала в водной массе озера выделяются гидрохимические зоны и районы озера, в которых могут наблюдаться

особенности гидрохимического состава в пространстве и во времени:

- глубокоководные зоны;
- трофогенный и динамически активный слой пелагиали;
- зоны возможного антропогенного влияния;
- придонный слой.

Одной из наиболее сложных задач мониторинга содержания элементов в природных водах является выделение так называемых базовых уровней на фоне природной пространственно-временной изменчивости концентраций. Физический смысл базового уровня – это концентрация элемента, полученная путем усреднения имеющихся данных по объему наблюдаемой водной массы.

Для мониторинга изменения содержания микропримесей (менее 100 мкг/л) загрязняющих веществ в воде озера предложен подход, основанный на определении набора показателей статистического распределения наблюдаемых концентраций, а именно: среднее значение выборки $\bar{C}$ («базовый уровень»); стандартное отклонение S ; медианное значение $\overline{X_{50}}$; квантили (в %) различной степени обеспеченности – X_5 , X_{25} , X_{75} , X_{90} , X_{95} . При этом степень близости вида распределения к нормальному, логнормальному либо к какому-то другому закону не имеет особого практического значения.

Критерием оценки гидрохимического состояния водной массы озера служит сравнение показателей распределения наблюдаемых концентраций элементов в воде озера с соответствующими фоновыми («доиндустриальными») показателями, прежде всего с базовыми уровнями. Другой фундаментальный критерий – степень нарушения баланса приходных и расходных потоков элементов в водной массе.

На основе оценок ожидаемых изменений уровней химических веществ рекомендуется периодичность мониторинговых наблюдений за гидрохимическими показателями в различных зонах водной массы Байкала: от 3-5 лет (загрязняющие вещества в придельтовых районах основных притоков) до 10-12 лет (компоненты основного состава, микроэлементы в пелагической водной массе). Рекомендуемая периодичность мониторинговых наблюдений за содержанием загрязняющих веществ и химических элементов в индикаторных видах гидробионтов Байкала: от 3-5 лет (зоопланктон, моллюски, рыба, нерпа в пелагических и литоральных зонах) до 5-7 лет (рыба, нерпа в пелагических зонах).

Рекомендуемая периодичность мониторинговых наблюдений за химическим стоком 9-ти основных притоков Байкала: от 3-5 лет (Селенга, Верхняя Ангара, Баргузин), до 7-10 лет (Томпуда, Кика, Хара-Мурин).

Для учета всех путей поступления химических веществ с атмосферными осадками в природные среды региона предлагается про-

ведение 4-летних циклов наблюдений, по этапам продолжительностью в 1 год: 1) осадки на водную поверхность в теплое время года; 2) снежные осадки на ледовый покров; 3) осадки на береговые районы; 4) осадки в фоновых районах на водосборном бассейне. Рекомендуемая периодичность наблюдений в индикаторах загрязнения атмосферных осадков (эпифитные лишайники, хвоя пихты и кедра) – синхронно с наблюдениями за химическим составом атмосферных осадков в соответствующем районе суши.

Рекомендуемая периодичность обследования почв на водосборных бассейнах основных притоков – от 5 (Селенга, Верхняя Ангара, Баргузин) до 10 лет (Томпуда, Кика, Хара-Мурин); для остальных притоков (выборочно) – 10-15 лет. Рекомендуемая плотность относительно равномерной сети точек отбора почв – 10-40 точек на площадь водосборного бассейна.

Определение химического состава верхнего слоя (~10 мм) натурального осадка в придельтовых районах основных притоков озера может осуществляться синхронно с соответствующей гидрохимической съемкой в этих районах, либо с мониторингом химического стока, т.е. один раз в 3-10 лет. Перспективной методологией мониторинга пелагических донных отложений является отбор потока взвешенного материала с помощью набора седиментационных ловушек. Рекомендуется годовой отбор в 2-3 точках пелагиали каждой котловины озера, с периодичностью 3-летнего цикла отбора (по году в каждой котловине) в 5-7 лет.

Благодарности

Автор благодарен коллегам С.М. Семенову и Г.М. Черногаевой за полезные замечания, а также М.С. Зеленовой за помощь в подготовке рукописи.

Список литературы

- Ветров В.А. 1985. Некоторые вопросы построения системы наблюдений за гидрохимическим состоянием оз. Байкал. В сб.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 7., – Л.: Гидрометеиздат, с. 37-50.
- Ветров В.А., Кузнецова А.И. 1997. Микроэлементы в природных средах региона озера Байкал. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 236 с.
- Вотинцев К.К. 1978. Гидрохимия. В кн.: Проблемы Байкала (Под ред. Г.И. Галазия, К.К. Вотинцева). Новосибирск: Наука, с. 124-145.
- Галазий Г.И. 1987. Байкал в вопросах и ответах. Иркутск: Восточно-Сибирское книжное издательство, 167 с.

Грачев М.А. 2001. О современном состоянии экологической системы озера Байкал. ЛИН СО РАН, Иркутск, 106 с.

Израэль Ю.А. 1984. Экология и контроль состояния природной среды. Изд. 2-е. – М.: Гидрометеиздат. 375 с.

Качество поверхностных вод Российской Федерации по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2010, 2011. Ростов-на-Дону: Гидрохимический институт.

Качество поверхностных вод Российской Федерации по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2011, 2012. Ростов-на-Дону: Гидрохимический институт.

Качество поверхностных вод Российской Федерации по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2012, 2013. Ростов-на-Дону: Гидрохимический институт.

Качество поверхностных вод Российской Федерации по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2013, 2014. Ростов-на-Дону: Гидрохимический институт.

Киплинг Ч. 1976. Цикл двуокиси углерода. Резервуарные модели для описания обмена атмосферной двуокиси углерода с океанами и растительностью суши. Химия нижней атмосферы. – М.: Мир. 311-401 с.

Обзор фоновое состояние окружающей природной среды в СССР за 1982 год. 1983. – М.: МО Гидрометеиздат, с. 169.

Тарасова Е.Н. 1976. Органическое вещество вод Южного Байкала. Новосибирск: Наука. 147 с.

Edgington D.N., Klump I.V., Robbins J.V. et al. 1991. Sedimentation rates, residence times and radionuclide inventories in Lake Baikal from ^{137}Cs and ^{210}Pb in sediment cores. *Nature*. V. 350, pp. 601-604.

Falkner K.K., Measures C.I., Herbelin S.E., Edmond J.M. 1991. The major and minor element geochemistry of Lake Baikal. *Limnology and oceanography* V. 36, № 3, pp. 413-423.

Sigg L., Strum M., Kistler D. 1987. Vertical transport of heavy metals by settling particles in Lake Zurich. *Limnology and oceanography*. V. 32. № 1, pp. 112-130.