



УДК 550.84 (571.53)

ИССЛЕДОВАНИЕ И СРАВНЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕЩЕСТВА ЮЖНОГО, СЕЛЕНГИНСКОГО, СРЕДНЕГО, УШКАНЬЕОСТРОВСКОГО, СЕВЕРНОГО РЕЗЕРВУАРОВ ОЗ. БАЙКАЛ© О.Ю. Астраханцева¹, О.М. Глазунов²Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
664033, Россия, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а.

Вещество каждого резервуара (Южного, Селенгинского, Среднего, Ушканьеостровского, Северного) может рассматриваться как система, открытая по отношению к веществу окружающей среды, обладающая целостностью в отношении своих функциональных характеристик по обмену веществом и энергией с веществом природной составляющей окружающей среды и определяемая в своих границах по физико-химическим параметрам. Установленные функции систем «вещество резервуаров озера Байкал – вещество потоков окружающей среды»: комплексообразование, миграция, избирательный транзит и избирательная утилизация или включение в биогеохимические круговороты компонентов, поступивших в резервуары озера из внешней среды с веществом потоков. Внешняя функциональная иерархия вещества вод резервуаров оз. Байкал проявляется в организации движения (миграции) компонентов и проценте их аккумуляции в донных отложениях резервуаров.

Ключевые слова: мегасистема; оз. Байкал; химическое взаимодействие; потоки.

STUDY AND COMPARISON OF FUNCTIONAL PROPERTIES OF THE MATTER FROM SOUTHERN, SELENGINSKY, MIDDLE, USHKANIEOSTROVSKY, NORTHERN RESERVOIRS OF THE LAKE BAIKAL

O.Yu. Astrakhantseva, O.M. Glazunov

Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
1a Favorsky St., Irkutsk, 664033, Russia.

The matter of each reservoir (Southern, Selenginsky, Middle, Ushkanieostrovsky, Northern) can be regarded as a system open for the matter from the environment. The system features integrity in relation to its functional characteristics of matter and energy exchange with the natural environmental matter and it can be determined within its limits by physico-chemical parameters. The following functions of the systems of "lake Baikal reservoir matter – environmental flow matter" have been identified: formation of complexes, migration, selective transit and utilization or inclusion of the components brought to lake reservoirs by the flow matter from external environment in the biogeochemical cycles. External functional hierarchy of Baikal reservoir water matter is manifested in the organization of movement (migration) of components and their accumulation percentage in reservoir sediments.

Keywords: megasystem; lake Baikal; chemical interaction; flows.

Постановка проблемы. Свойства исследуемых природных объектов возникают и обнаруживаются через отношения этих объектов с окружающей средой. Вещество вод озера Байкал обменивается с окружающей средой веществом и энергией, в нем непрерывно протекают химические реакции, происходит поступление реагирующих веществ извне и отвод продуктов реакций. Вопрос глобального осмысления сценария отношений в системе «вещество вод оз. Байкал – вещество окружающей среды» является ключевым в выяснении структурной и организационной сущности этой системы.

Разновеликое взаимодействие гравитационных полей вещества вод озера Байкал и вещества Земли по акватории озера из-за резкой расчлененности его дна является причиной, обуславливающей локализацию физико-химических состояний вещества вод озе-

ра Байкал в виде Южного, Селенгинского, Среднего, Ушканьеостровского, Северного резервуаров и индивидуальность приходной и расходной статей в энергетических балансах и, соответственно, самих энергетических балансов резервуаров [1]. Индивидуальность энергетического потенциала каждого резервуара объясняет индивидуальность отклика вещества резервуаров на поступление компонентов вещества потоков окружающей среды и, соответственно, параметры геохимической среды в резервуарах как результат этих процессов. Взаимодействие вещества вод озера Байкал с веществом потоков окружающей среды – природная стационарная мегасистема пространственно локализованных геохимических состояний вещества озера открытых по отношению к веществу потоков окружающей среды [3]. Модель структуры состояния вещества вод оз. Байкал, равновесного по физи-

¹Астраханцева Ольга Юрьевна, младший научный сотрудник лаборатории физико-химического моделирования, тел.: 89643590806, e-mail: astra@igc.irk.ru

Astrakhantseva Olga, Junior Researcher of the Laboratory of Physico-Chemical Modeling, tel.: 89643590806, e-mail: astra@igc.irk.ru

²Глазунов Олег Михайлович, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории геохимического и ультраосновного магматизма, тел.: (3952) 511460.

Glazunov Oleg, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Chief Researcher of the Laboratory of Geochemical and Ultrabasic Magmatism, tel.: (3952) 511460.



ко-химическим параметрам с веществом окружающей среды, представляет собой различающиеся средне-многолетние состояния геохимических сред, содержащих макро-, микрокомпоненты, биогенные элементы и органическое вещество в подсистемах (вещество прибрежных, поверхностных, глубинных, придонных вод) пяти резервуаров оз. Байкал, характеризующиеся стабильными среднегодовыми параметрами: температурой, давлением, химическим составом, минерализацией и рассчитанными через эти параметры характеристиками кислотно-основных и окислительно-восстановительных состояний геохимических систем, формами существования элементов [5, 6, 11].

Незнание законов и закономерностей развития мегасистемы «вещество резервуаров озера Байкал – вещество потоков окружающей среды» – это блуждание в потемках. Химические балансы вещества резервуаров озера позволяют установить организованность – сложное свойство вещества систем-резервуаров, заключающееся в наличии структуры и функционирования (поведения). Непременной принадлежностью систем являются их элементы (составные части) – в нашем случае это вещество подсистем вещества резервуаров озера – вещество поверхностных, прибрежных, глубинных, придонных вод, т.е. структурные образования, из которых состоит целое и без чего оно не возможно. Функциональность вещества резервуаров озера Байкал – это проявление определенных свойств (функций) при взаимодействии с веществом внешней среды – веществом потоков (реки, взвесь рек, дождь+снег, аэрозоль, подземные воды, минеральные воды, приток озерных вод из других резервуаров озера, поток из донных отложений, поток в донные отложения, сток озерных вод в другие резервуары озера и в р. Ангару). Назначение системы «вещество резервуаров озера Байкал – вещество потоков окружающей среды» в данном случае – движение материи и энергии в бассейне оз. Байкал, миграция, избирательный транзит и избирательная утилизация вещества, поступившего в озеро из внешней среды с веществом потоков. Структурность – это упорядоченность наиболее вероятного (равновесного по физико-химическим параметрам с веществом окружающей среды) состояния вещества подсистем в веществе резервуаров и вещества резервуаров в мегасистеме, т.е. определенный набор и расположение состояний вещества подсистем в веществе резервуаров и состояний вещества резервуаров в веществе мегасистемы со связями между ними. В исследовании функции и структуры вещества систем-резервуаров оз. Байкал существует единство и взаимосвязь. Функциональность вещества каждого резервуара озера объясняется его структурой, т.е. наличием в веществе резервуара признаков пространственных локальных равновесий, в соответствии с которыми вещество подсистем имеет определенное состояние (состояния), которое является для него предпочтительным. Функциональность мегасистемы «вещество резервуаров озера Байкал – вещество потоков окружающей среды» определяется характером реакции вещества подсистем резервуаров озера на внешние воздействия.

Вещество резервуара – конечное множество функциональных элементов (вещества подсистем): вещества поверхностных, прибрежных, глубинных и придонных вод со своими индивидуальными физико-химическими состояниями, обуславливающими движение материи и энергии в веществе вод резервуара. Взаимодействие вещества окружающей среды с веществом элементов системы – подсистемами выявляет целостность, единство, проявляемое в возникновении новых свойств, которыми вещества поверхностных, прибрежных, глубинных, придонных вод сами по себе не обладают – аккумуляция, химические круговороты компонентов, миграция компонентов в донные отложения и из донных отложений, захоронение в донных отложениях. Целостность вещества резервуара означает, что вещество каждой из подсистем вносит вклад в реализацию целевой функции системы-резервуара – движение компонентов: транзит, химический круговорот или утилизация.

Наши исследования направлены на установление внешней (функциональной, поведенческой) иерархии вещества в системе «вещество вод оз. Байкал – вещество химических потоков окружающей среды».

Цель данной статьи – показать различие функциональных характеристик вещества вод Южного, Селенгинского, Среднего, Ушканьеостровского, Северного резервуаров Байкала в мегасистеме «вещество вод озера Байкал – вещество потоков окружающей среды».

Анализ отношений взаимодействия компонентов (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al , Si , Mn^{2+} , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , H^+ , O_2 , As , B , Cr , Cu , Cd , Hg , Pb , Sr , Zn , Co , U , V , Br , Rb , Mo , $\text{C}_{\text{орг}}$, $\text{N}_{\text{орг}}$, $\text{P}_{\text{орг}}$, $\text{S}_{\text{орг}}$, CO_2 , Ti) вещества вод резервуаров оз. Байкал и таковых же компонентов вещества потоков (реки, взвесь рек, дождь+снег, аэрозоль, подземные воды, минеральные воды, приток озерных вод из других резервуаров озера, поток из донных отложений, поток в донные отложения, сток озерных вод в другие резервуары озера и в р. Ангару) раскрывает содержание законов их взаимодействия. Химические балансы резервуаров озера дают возможность рассмотреть системы-резервуары с позиции устойчивого отношения их вещества как целого с лежащими вне их объектами – веществами химических потоков природной составляющей окружающей среды.

Методы исследования. Используются методы изучения макросистем: структурно-функциональный метод (установление устойчивых закономерностей движения вещества при взаимодействии вещества Южного, Селенгинского, Среднего, Ушканьеостровского, Северного резервуаров с веществом потоков природной составляющей окружающей среды) и метод балансовых расчетов.

Используя уравнение $m = C \cdot v$ (2), где m – полная масса элемента, C – среднеемноголетняя концентрация, v – объем водной массы озера, рассчитано годовое содержание – полная масса каждого из 35 компонентов в 10^9 г/год в подсистемах (вещество поверхностных, прибрежных, глубинных, придонных вод) каждого резервуара оз. Байкал [4, 7–10]. Для расчета



химического баланса вещества потоков необходимо знать составляющие приходной и расходной частей вещества каждого резервуара. Приходную часть составляют поступления элементов: с речным стоком, с речной взвесью, с подземными водами, с минеральными водами, с атмосферными осадками, с эоловым привносом, с притоком озерных вод из соседних ре-

Используя данные о поставках абсолютных масс осадочного материала на дно Байкала (в $\text{г}/\text{см}^2$), полученные из работы Ю.А. Богданова (1997), а так же используя значения площадей каждого резервуара [2], нами рассчитаны абсолютные массы осадочного материала, поступающие в донные отложения каждого резервуара за 1 год в $\text{г}/\text{год}$ (табл. 1).

Таблица 1

Количество вещества, поступающее в донные отложения резервуаров оз. Байкал, $\text{г}/\text{год}$

Южный	Селенгинский	Средний	Ушканье-островский	Северный	Оз. Байкал
$2,55 \times 10^{12}$	$1,46 \times 10^{12}$	$2,58 \times 10^{12}$	$5,65 \times 10^{11}$	$5,42 \times 10^{12}$	$1,24 \times 10^{13}$

зервуаров озера, с внутренней нагрузкой – с потоком из донных отложений. Составляющие статьи «Расход»: вынос элемента со стоком озерных вод в соседние резервуары озера или в р. Ангару; выведение из водной массы со взвешенным материалом, формирующим донные отложения, т.е. с потоком в донные отложения. Рассчитаны полные среднегодовые массы элементов в веществе каждого потока, втекающего и вытекающего из резервуаров оз. Байкал [4, 7–10].

Кроме поступления элементов с водосборного бассейна (внешняя нагрузка), элементный режим вещества резервуаров озера Байкал определяют внутриводоемные процессы (внутренняя нагрузка). Элементами внутреннего баланса вещества вод резервуара озера являются: аккумуляция части поступивших с водосбора компонентов, вступления части этих компонентов в реакции комплексообразования и уход их в составе взвешенного материала с потоком в донные отложения (седиментация), а также приход компонентов с потоком из донных отложений.

Для расчета химического баланса компонентов в мегасистеме «вещество вод оз. Байкал – вещество потоков окружающей среды» необходимо знать количественную характеристику вертикального потока компонентов ($\text{г}/\text{год}$) в донные осадки. Поток «поток компонентов в донные отложения» – абсолютные массы материала, поступающие на дно Байкала ($\text{г}/\text{год}$). По вопросу осадконакопления в озере известны работы [13–17, 19–22, 24, 25, 28, 32, 37]. Первое, что необходимо знать для расчета потока компонентов в донные отложения ($\text{г}/\text{год}$) – скорость осадконакопления ($\text{см}/\text{год}$). Сравнены и сопоставлены данные о поставках вещества в Байкал, полученные в разные годы разными авторами с разной долей достоверности. Установлено, что все сведения довольно похожи. Данные [13] обеспечены значительным количеством измерений по всей акватории озера и могут быть признаны более представительными по сравнению с другими работами.

Кроме скорости осадконакопления ($\text{см}/\text{год}$) в работе Ю.А. Богданова с соавторами (1997) определены абсолютные массы осадочного материала в целом и отдельных его компонентов, накапливающихся в донных осадках оз. Байкал, что представляется исключительно важным не только для количественного описания «напряженности» осадочного процесса, но и для исследования баланса вещества в озере.

Для расчета среднесуточных масс отдельных компонентов ($\text{г}/\text{год}$) в потоках в донные отложения для каждого резервуара озера использованы известные по работам [15, 18, 21, 23, 30, 33–35] процентные содержания элементов в донных осадках каждого резервуара. Расчет проводился по формуле $N = C * n / 100$ (3), где N – количество компонента ($\text{г}/\text{год}$), поступающее из водной толщи с потоком в донные отложения резервуаров; n – содержание компонента в % в сухом веществе донных осадков; C – абсолютные массы осадочного материала, накапливающиеся в донных осадках за год в каждом резервуаре ($\text{г}/\text{год}$).

Кроме того, в работе [13] даны потоки SiO_2 , Al_2O_3 , Fe , Ti , Pb , Zn , Cu , Co , Cr , V , Cd ($\text{г}/\text{см}^2$ в 1000 лет) в донные отложения Южной котловины, Селенгинского мелководья, Центральной котловины, Академического хребта и Северной котловины. Используя значения площадей поверхностей каждого из пяти резервуаров Байкала [2], рассчитаны количества этих компонентов, поступающие в донные отложения резервуаров озера за 1 год в $\text{г}/\text{год}$ [12].

Аккумуляция оценивалась по формуле, приведенной в работе [35]: по разности внешнего прихода вещества с потоками и внешнего расхода со стоковыми потоками озерных вод.

Внутренние источники поступления вещества окружающей среды в вещество резервуаров озера – потоки компонентов из донных отложений. Содержание компонентов в потоке «поток компонентов из донных отложений» в каждом резервуаре определен по разности седиментации, в $\text{г}/\text{год}$ и аккумуляции, в $\text{г}/\text{год}$. После оценки всех пунктов расчетных статей составлены таблицы химических балансов резервуаров оз. Байкал [4, 7–10].

Результаты исследования и обсуждение. Химические балансы вещества в резервуарах исследуемой мегасистемы «компоненты вещества резервуаров озера Байкал – компоненты вещества потоков окружающей среды» позволили установить повторяемые из года в год устойчивые закономерности – источники поступления макро-, микрокомпонентов, биогенных элементов и органического вещества, установить элементы-комплексообразователи и пути миграции компонентов в резервуаре (рис. 1, 2, 3), (табл. 2), места их аккумуляции, позволили выявить, одинаковы ли эти взаимодействия или индивидуальны для каждого резервуара.

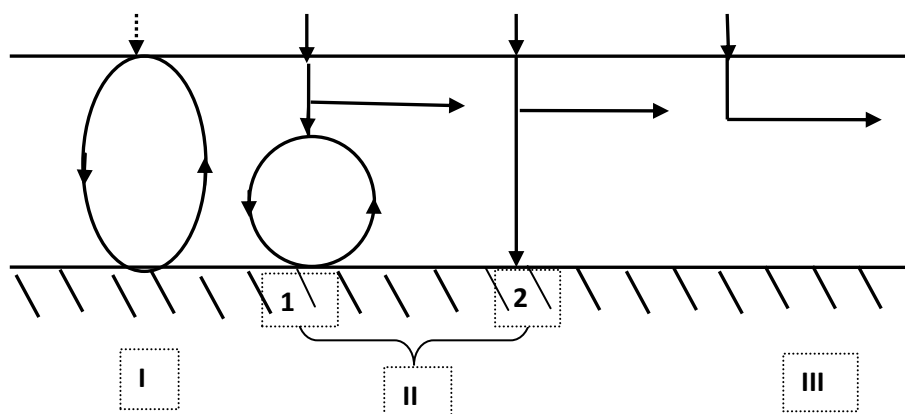


Рис. 1. Пространственная миграция компонентов в водах Южного, Среднего, Ушканьеостровского резервуаров: I – слабоподвижные компоненты, вертикальная миграция, накапливаются в донных отложениях и в водах, участвуют в химических круговоротах; II – умеренно подвижные, частично выносятся со стоком озерных вод из резервуара (горизонтальная миграция), частично накапливаются: 1 – в донных отложениях и в водах, участвуют в химических круговоротах, вертикальная миграция; 2 – в донных отложениях, миграция на дно и захоронение; III – легкоподвижные, выносятся со стоком озерных вод из резервуара, горизонтальная миграция

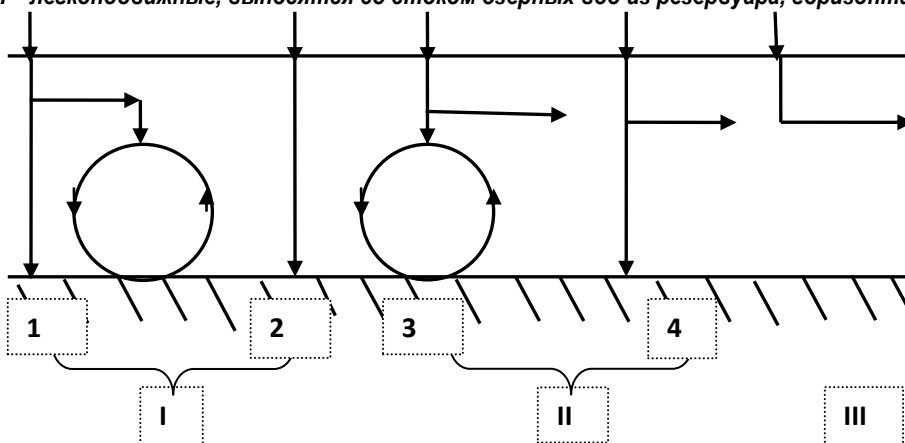


Рис. 2. Пространственная миграция компонентов в водах Селенгинского резервуара: I – слабоподвижные компоненты, находящиеся в водах резервуара в основном в виде взвеси, накапливаются: 1 – в донных отложениях и в водах, часть вещества переходит из твердой фазы в раствор (находится в водах резервуара в виде взвеси и в виде растворенного вещества) и участвует в химических круговоротах; 2 – в донных отложениях; II – умеренно подвижные, находятся в твердой и растворенной формах, частично выносятся со стоком озерных вод из резервуара, частично накапливаются: 3 – в водах и донных отложениях, участвуют в химических круговоротах; 4 – в донных отложениях; III – легкоподвижные, выносятся со стоком озерных вод из резервуара, в резервуаре находятся в растворенной форме

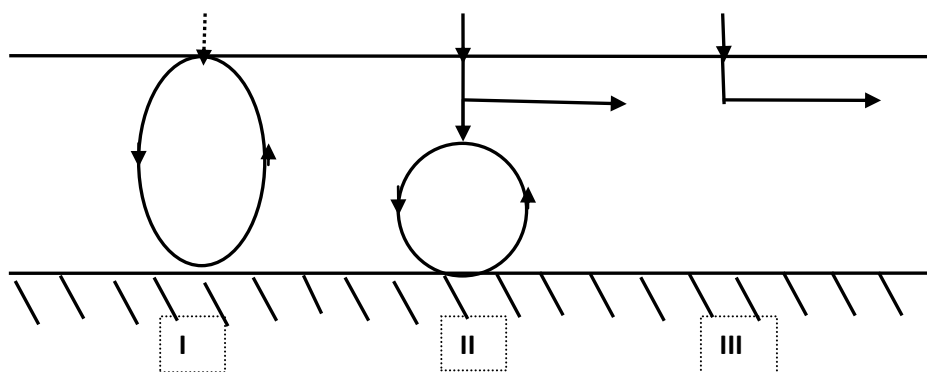


Рис. 3. Пространственная миграция компонентов в водах Северного резервуара: I – слабоподвижные компоненты, находятся в твердой и растворенной формах, передвижение «вниз-вверх» в пределах резервуара, связываются и накапливаются в донных отложениях и в водах, участвуют в химических круговоротах; II – умеренно подвижные, находятся в твердой и растворенной формах, частично выносятся со стоком озерных вод из резервуара (частичная горизонтальная миграция), остальная часть связывается и накапливается в донных отложениях и в водах, участвует в химических круговоротах (передвижение «вниз-вверх»); III – легкоподвижные, в резервуаре находятся в растворенной форме, выносятся со стоком озерных вод из резервуара, горизонтальная миграция



Таблица 2

Группировка компонентов по скорости, направлению водной миграции и местам аккумуляции в резервуарах оз. Байкал

Группа элементов		Южный	Селенгинский	Средний	Ушканье-островский	Северный
I	Слабоподвижные, связываются, миграция вертикальная – «вниз-вверх», накапливаются в водах и донных отложениях резервуара; миграция в донные отложения резервуара и захоронение и вертикальная миграция внутри резервуара; миграция в донные отложения резервуара и захоронение	Al, Si, Mn ²⁺ , Fe _{общ} ⁻ , NO ₃ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , As, Cr, Cu, Pb, Co, V, Rb, P _{орг} , Ti	Fe _{общ} ⁻ , PO ₄ ³⁻ , Mn ²⁺ , As, Co, V, Rb, Ti NO ₃ ⁻ , Al, Si, Cr	Al, Si, Mn ²⁺ , Fe _{общ} ⁻ , NO ₃ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , As, Cr, Cu, Cd, Co, U, V, Rb, Ti	Al, Si, Mn ²⁺ , Fe _{общ} ⁻ , NO ₃ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , As, Cr, Cu, Pb, Co, V, Rb, Ti, P _{орг}	K ⁺ , Al, Si, Mn ²⁺ , Fe _{общ} ⁻ , NO ₃ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , As, Cr, Cu, Cd, Pb, Zn, Co, U, V, Br, Rb, P _{орг} , Ti
II	Умеренно подвижные, частично выносятся из резервуара, частично связываются; миграция горизонтальная из резервуара и вертикальная в резервуаре, накапливаются в водах и донных отложениях; миграция на дно и захоронение и горизонтальная миграция из резервуара	Mg ²⁺ , Cd, Br, Zn, U, N _{орг} K ⁺ , Na ⁺ , C _{орг} , S _{орг}	K ⁺ , Cd, U, Mo, P _{орг} , B Na ⁺ , Mg ²⁺ , Br, Pb, C _{орг} , N _{орг} , S _{орг}	K ⁺ , Na ⁺ , Mg ²⁺ , B, Br, C _{орг} , N _{орг} , S _{орг} Ca ²⁺ , Mo	K ⁺ , Na ⁺ , Mg ²⁺ , Cd, Zn, U, Br, Mo, N _{орг} C _{орг} , S _{орг}	Na ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , B, Mo, C _{орг} , N _{орг} , S _{орг}
III	Легкоподвижные, выносятся со стоком озерных вод, горизонтальная миграция из резервуара	Ca ²⁺ , Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , B, Hg, Sr, Mo	Ca ²⁺ , HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻ , Cu, Hg, Sr, Zn	HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻ , Hg, Sr, Zn	Ca ²⁺ , HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻ , B, Hg, Sr	HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻ , Hg, Sr

В каждом резервуаре установлены компоненты, являющиеся активными с точки зрения химического взаимодействия (табл. 3), присутствующие в водах резервуара во взвешенных и растворенных формах, в растворенных формах, приходящие с потоком из донных отложений и полностью вступающие в реакции комплексообразования; умеренно активные компонен-

ты, поставляемые внешними и внутренним потоками, в разной степени вступающие в реакции комплексообразования; а так же инертные компоненты, не участвующие в реакциях комплексообразования, находящиеся в растворенных формах в водах резервуара. Компоненты сгруппированы по скорости водной миграции, по химической активности (табл. 2, 3).

Таблица 3

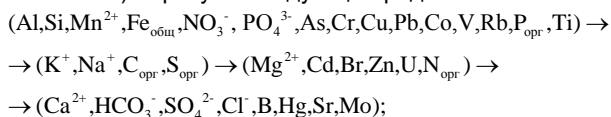
Группировка компонентов по химической активности – способности к комплексообразованию в водах резервуаров оз. Байкал

Группа элементов		Южный	Селенгинский	Средний	Ушканье-островский	Оз. Байкал
I	активные	Al, Si, Mn ²⁺ , Fe _{общ} ⁻ , NO ₃ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , As, Cr, Cu, Pb, Co, V, Rb, P _{орг} , Ti	K ⁺ , Fe _{общ} ⁻ , Mn ²⁺ , NO ₃ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , As, Cr, Co, V, Rb, Ti, Al, Si, Cd, U, Mo, P _{орг}	Al, Si, Mn ²⁺ , Fe _{общ} ⁻ , NO ₃ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , As, Cr, Cu, Pb, Cd, Co, U, V, Rb, P _{орг} , Ti	Al, Si, Mn ²⁺ , Fe _{общ} ⁻ , NO ₃ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , As, Cr, Cu, Pb, Co, V, Rb, Ti, P _{орг}	K ⁺ , Al, Si, Mn ²⁺ , Fe _{общ} ⁻ , NO ₃ ⁻ , As, PO ₄ ³⁻ , Cr, Cu, Cd, Pb, Zn, Co, U, V, Br, Rb, P _{орг} , Ti
II	умеренно активные	Mg ²⁺ , Cd, Br, Zn, U, K ⁺ , Na ⁺ , C _{орг} , N _{орг} , S _{орг}	Na ⁺ , Mg ²⁺ , Br, Pb, C _{орг} , N _{орг} , S _{орг}	K ⁺ , Na ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , B, Br, C _{орг} , N _{орг} , S _{орг} , Mo	K ⁺ , Na ⁺ , Mg ²⁺ , Cd, Zn, U, Br, Mo, C _{орг} , N _{орг} , S _{орг}	Na ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , B, Mo, C _{орг} , N _{орг} , S _{орг}
III	инертные	Ca ²⁺ , HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻ , B, Hg, Sr, Mo	Ca ²⁺ , HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻ , Zn, Cu, B, Hg, Sr	HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻ , Hg, Sr, Zn	Ca ²⁺ , HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻ , B, Hg, Sr	HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻ , Hg, Sr

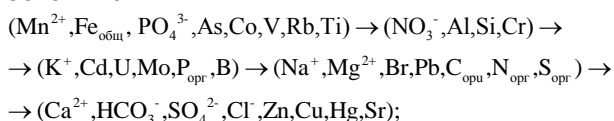


Для каждого резервуара установлены компоненты, составляющие аккумулированное вещество, а также захоранивающиеся в донных отложениях при избирательной утилизации вещества в резервуаре (табл. 2). Установлено, для каких компонентов резервуары проточны, а для каких являются биогеохимическими барьерами (табл. 2).

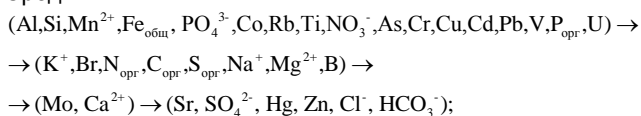
Все компоненты по скорости водной миграции в резервуаре и из резервуара (от минимальной к максимальной) образуют следующий ряд:



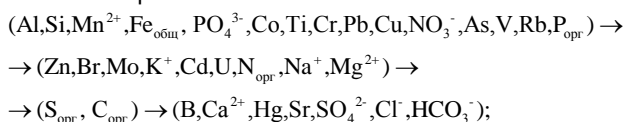
Селенгинский:



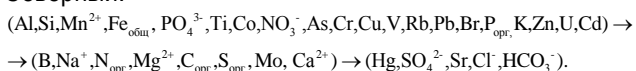
Средний:



Ушканьеостровский:



Северный:



Кроме внешних нагрузок от вещества окружающей среды во всех резервуарах озера, кроме Селенгинского, существуют мощные внутренние источники вещества от окружающей среды – потоки из донных отложений – основные поставщики биогенных элементов, части катионов основных компонентов, целой группы микроэлементов и органического вещества (табл. 4), (рис. 4). Среднегодовое количество вещества в потоке «поток из донных отложений» в Северном резервуаре можно охарактеризовать как самое большое, в Южном, Среднем, Ушканьеостровском резервуарах – как большое и в Селенгинском резервуаре – как ничтожно малое, что отчетливо видно на рис. 4.

Установлена роль потоков «поток компонентов из донных отложений» в поступлении компонентов в воды резервуаров оз. Байкал (табл. 4). Потоки из донных отложений в химических балансах глубоководных резервуаров озера являются основными поставщиками биогенных элементов, фосфора органического, группы микроэлементов. В резервуарах с потоками компонентов в донные отложения уходят практически целиком биогенные элементы, основное количество фосфора органического, половина от общего расхода остального органического вещества, часть катионов макрокомпонентов и основная часть практически всех микроэлементов (кроме В, Hg, Sr, Mo). Следовательно, только часть вещества, поступающего в резервуар с химическими потоками, в виде взвеси попадает в донные отложения озера, и в вещество это частично или полностью входят следующие компоненты: биогенные элементы, органическое вещество, катионы макрокомпонентов, микроэлементы (табл. 4).

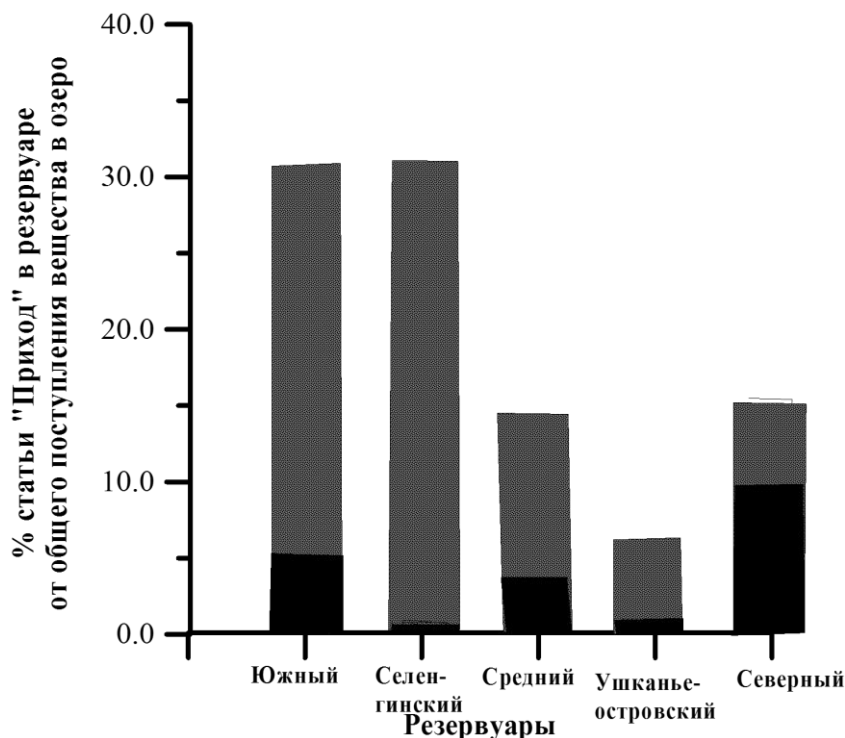


Рис. 4. Внешние и внутренние нагрузки на протяжении озера Байкал (статья «Приход»)



Таблица 4

Содержания основных, микро-, биогенных компонентов и органического вещества в приходных и расходных потоках вещества в резервуарах оз. Байкал, %

Компоненты	Южный	Селенгинский	Средний	Ушканье-островский	Северный
Приход внешний:	100	100	100	100	100
основные компоненты	92,8	83	88,3	93,4	78,1
микроэлементы	0,3	2,6	0,8	0,5	2,1
биогенные элементы	3,4	11	7,4	1,9	14,8
органические вещества	3,5	3,4	3,5	4,2	5
Поток из донных отложений:	100	100	100	100	100
основные компоненты	12,2	36,8	19,4	5,8	23,3
микроэлементы	7,8	3,8	5,1	4,9	2,9
биогенные элементы	79,8	58,9	73	77,6	72,5
органические вещества	0,2	0,5	2,5	0,2	1,3
Сток озерных вод:	100	100	100	100	100
основные компоненты	98,9	95	96	96,8	95,7
микроэлементы	0,1	0,3	0,4	0,4	0,3
биогенные элементы	0,3	2	1,3	1,4	1,3
органические вещества	0,7	2,7	2,3	1,37	2,7
Поток в донные отложения:	100	100	100	100	100
основные компоненты	20,3	19	20,8	15,76	21,3
микроэлементы	5,8	11	4,9	5,7	3,3
биогенные элементы	70,6	66	69,1	74,93	73
органические вещества	3,3	4	5,2	3,5	2,4

Остальные компоненты в растворенном состоянии находятся в водной толще и транзитом постепенно уходят из резервуара со стоком озерных вод в другие резервуары озера или р. Ангару.

Круг компонентов, совершающих биогеохимические круговороты, определен для каждого резервуара оз. Байкал. Общими компонентами для всех резервуаров являются: Mg^{2+} , Al, Si, Mn^{2+} , $Fe_{общ}$, NO_3^- , PO_4^{3-} , As, Cr, Cu, Cd, Pb, Co, U, V, Rb, Ti, $P_{орг}$; кроме того в Южном резервуаре: Zn; в Среднем: K^+ , Na^+ , B, Br, $C_{орг}$, $N_{орг}$, $S_{орг}$; в Ушканьеостровском: K^+ , Na^+ , Mo, $N_{орг}$; в Северном: K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , B, Br, $C_{орг}$, $N_{орг}$, $S_{орг}$, $P_{орг}$. Эти компоненты находятся в водах резервуаров в растворенных и взвешенных формах: в виде взвеси уходят с потоками в донные отложения и в растворенных формах приходят с потоком из донных отложений. В Селенгинском резервуаре в химическом круговороте частично участвуют: K^+ , Mn^{2+} , As, Cd, Co, U, V, Mo, Rb, Ti, PO_4^{3-} , $Fe_{общ}$, $P_{орг}$.

Функциями вещества вод резервуаров оз. Байкал по отношению к компонентам, приносимым химическими потоками окружающей среды (вещество потоков бассейна оз. Байкал и вещество потоков из донных отложений озера), являются: полный или частичный транзит одних элементов (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl⁻, K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , B, Mo, Hg, Sr, $C_{орг}$, $N_{орг}$, $S_{орг}$) и аккумуляция других (части катионов основных компонентов, биогенных элементов, части органического вещества, микроэлементов) с последующей утилизацией в дон-

ных отложениях резервуара (Селенгинский) или включением аккумулированных компонентов в химические круговороты компонентов вещества вод резервуаров озера (остальные резервуары).

Основное количество (по весу) поступившего из окружающей среды вещества уходит из резервуаров со стоком озерных вод, остальное вещество аккумулируется в резервуарах (рис. 5). Захоронение компонентов в каждом из четырех резервуаров избирательное. В Селенгинском резервуаре поступившие с потоком в донные отложения элементы захораниваются практически целиком, в остальных резервуарах из поступающего с потоками в донные отложения вещества захоранивается около десяти процентов, остальное вещество возвращается с потоком из донных отложений (рис. 5).

Установлена геохимическая устойчивость экосистем каждого резервуара при попадании химических элементов и органического вещества в оз. Байкал с техногенным стоком, т.е. способность экосистем к выносу загрязнителей за их пределы или к их утилизации внутри экосистемы. Установлено, какие из элементов, попадающих в озеро с техногенным потоком, будут вынесены с течением времени за его пределы, а какие закрепятся в резервуарах: будут утилизированы в донные осадки или связаны в водах, вызывая негативную реакцию биоты на изменение химического состава вод (табл. 5).

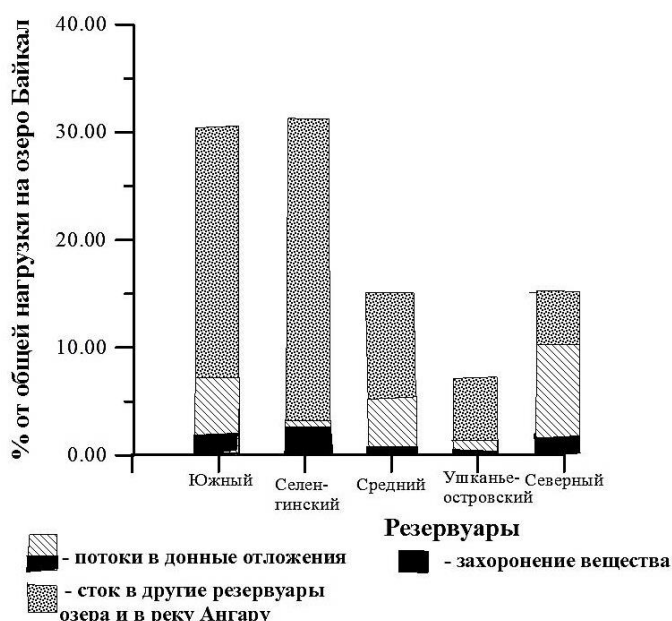


Рис. 5. Расход вещества в резервуарах оз. Байкал со стоком озерных вод в другие резервуары озера и р. Ангару, с потоками в донные отложения и в захоронение

Таблица 5

Классы экологической опасности компонентов и прогноз их поведения в резервуарах в случае воздействия антропогенной нагрузки на оз. Байкал

Компоненты	Южный	Селенгинский	Средний	Ушканье-островский	Северный
K ⁺	У Д III	У ВД II	У ВД II	У ВД II	С ВД I
Na ⁺	У Д III	У Д III	У ВД II	У ВД II	У ВД II
Ca ²⁺	Л IV	Л IV	У Д III	Л IV	У ВД II
Mg ²⁺	У ВД II	У Д III	У ВД II	У ВД II	У ВД II
Al	С ВД I	С Д III	С ВД I	С ВД I	С ВД I
Si	С ВД I	С Д III	С ВД I	С ВД I	С ВД I
Mn ²⁺	С В I	У ВД II	С ВД I	С ВД I	С ВД I
Fe _{общ}	С ВД I	У ВД II	С ВД I	С ВД I	С ВД I
SO ₄ ²⁻	Л IV	Л IV	Л IV	Л IV	Л IV
HCO ₃ ⁻	Л IV	Л IV	Л IV	Л IV	Л IV
Cl ⁻	Л IV	Л IV	Л IV	Л IV	Л IV
NO ₃ ⁻	С ВД I	У Д III	С ВД I	С ВД I	С ВД I
PO ₄ ³⁻	С ВД I	У ВД II	С ВД I	С ВД I	С ВД I
As	С ВД I	У ВД II	С ВД I	С ВД I	С ВД I
B	Л IV	Л IV	У ВД II	Л IV	У В II
Cr	С ВД I	С Д III	С ВД I	С ВД I	С ВД I
Cu	С ВД I	Л IV	С ВД I	С ВД I	С ВД I
Cd	У ВД II	У ВД II	С ВД I	У ВД II	С ВД I
Hg	Л IV	Л IV	Л IV	Л IV	Л IV
Pb	С ВД I	У Д III	У В II	С ВД I	С ВД I
Sr	Л IV	Л IV	Л IV	Л IV	Л IV
Zn	У ВД II	Л IV	Л IV	У ВД II	С ВД I
Co	С ВД I	У ВД II	С ВД I	С ВД I	С ВД I
U	У ВД II	У ВД II	С ВД I	У ВД II	С ВД I
V	С ВД I	У ВД II	С ВД I	С ВД I	С ВД I
Br	У ВД II	У Д III	У ВД II	У ВД II	С ВД I
Rb	С ВД I	У ВД II	С ВД I	С ВД I	С ВД I
Mo	Л IV	У ВД II	У Д III	У ВД II	У ВД II
C _{орг}	У Д III	У Д III	У ВД II	У Д III	У ВД II
N _{орг}	У ВД II	У Д III	У ВД II	У ВД II	У ВД II
P _{орг}	С ВД I	У ВД II	С ВД I	С ВД I	С ВД I
S _{орг}	У Д III	У Д III	У ВД II	У Д III	У ВД II
Ti	С ВД I	У ВД II	С ВД I	С ВД I	С ВД I

Примечание. С – слабоподвижные накапливаются; У – умеренно подвижные частично выносятся, частично накапливаются; Л – легкоподвижные выносятся; В – накапливаются в водах; Д – накапливаются в донных отложениях; ВД – накапливаются в донных отложениях и водах; I, II, III, IV – классы экологической опасности.



Развитие вещества вод оз. Байкал, как системы взаимодействия его с веществом окружающей среды, определяется неоднородностью сил гравитации, направленными к центру Земли, тепловым потоком, химическими потоками. Все эти факторы определяют систему как состоящую из неравновесных друг с другом резервуаров, но равновесных с веществом окружающей среды, т.е. находящуюся в постоянстве своего состояния (стационарную систему). Система «вещество резервуаров озера Байкал – вещество потоков окружающей среды» – конечное множество функциональных элементов и отношений между ними, выделенное из среды в соответствии с целью нашей работы в рамках определенного временного интервала, периода в несколько десятков лет. Вещество вод оз. Байкал иерархично – вещество каждого резервуара может рассматриваться как система, обладающая целостностью в отношении своих функций и определяемая в своих границах.

Исследования физико-химического состояния вещества вод Байкала и химического баланса его вод и потоков показали, что вещество вод озера характеризуется внешней или функциональной и внутренней (структурной) иерархией вещества в мегасистеме «вещество вод оз. Байкал – вещество окружающей среды».

Заключение. Предложенный подход к исследованию химического взаимодействия вещества вод оз. Байкал и вещества потоков окружающей среды как к многорезервуарной системе позволил сделать следующие выводы:

1. Установленные функции систем «вещество резервуаров озера Байкал – вещество потоков окружающей среды»: комплексообразование, миграция, избирательный транзит и избирательная утилизация или включение в биогеохимические круговороты компонентов, поступивших в резервуары озера из внешней среды с веществом потоков. Внешняя функциональная иерархия вещества вод резервуаров оз. Байкал проявляется в организации движения (миграции) компонентов и проценте их аккумуляции в донных отложениях резервуаров.

2. Сходство функций вещества резервуаров озера наблюдается в отношении их пропускной и аккумулирующей способностей относительно поступающих с внутренними и внешними потоками основных элементов, микроэлементов, биогенных элементов и органического вещества, заключающихся в открытости – способности частично или полностью пропускать (транзит) и обмениваться между резервуарами следующими компонентами: HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , В, Мо, Hg, Sr, $\text{C}_{\text{орг}}$, $\text{N}_{\text{орг}}$, $\text{S}_{\text{орг}}$ и закрытости в отношении остальных компонентов (части катионов основных компонентов, биогенных элементов, части органического вещества, микроэлементов), которые связываются (вступают в комплексообразование) и остаются в резервуарах (захораниваются или вступают в химический круговорот). По этим компонентам резервуары полуавтономны, закрыты и не обменива-

ются с другими резервуарами. Различие функций резервуаров заключается в том, как расходуются аккумулярованные компоненты: в Селенгинском резервуаре они захораниваются, в остальных небольшая их часть захоранивается, а большая часть вступает в химический круговорот.

3. В поставке биогенных элементов все резервуары, кроме Селенгинского, находятся на внутреннем обеспечении (потоки из донных отложений), и только Селенгинский резервуар питается внешним привнесением. В зависимости от морфологии внешняя и внутренняя нагрузки на протяжении озера резко меняются и индивидуальны в каждом резервуаре. Выявлены большие внутренние нагрузки – потоки из донных отложений в четырех резервуарах озера – и незначительная в Селенгинском резервуаре. Установлена ведущая роль внутриводоемных процессов в поступлении и утилизации биогенных элементов, $\text{P}_{\text{орг}}$, основных компонентов – катионов и группы микроэлементов в резервуарах оз. Байкал.

4. Утилизация вещества в донные осадки озера избирательна: с внутриводоемными потоками в донные отложения поступают биогенные элементы, $\text{P}_{\text{орг}}$, часть остального органического вещества, часть основных компонентов – катионов и группа микроэлементов. Установлено, что во всех резервуарах Байкала, кроме Селенгинского, процент утилизации (захоронения) поступающего вещества очень низок вследствие того, что вещество, поступившее с потоком в донные отложения, за отсутствием малой части возвращается с потоком из донных отложений. В четырех резервуарах озера утилизация вещества ничтожна (около 10%), при этом существуют мощные химические круговороты компонентов. В Селенгинском резервуаре захоранивается 85% вещества, поступившего с потоком в донные отложения.

5. Химическое взаимодействие вещества вод оз. Байкал и вещества потоков окружающей среды иерархично и структура обмена упорядочена именно таким образом: поведение вещества вод озера при обмене веществом и энергией с веществом потоков окружающей среды индивидуализировано в веществе пяти резервуаров озера. Химические балансы вещества резервуаров озера позволили установить организованность – свойство вещества оз. Байкал, заключающееся в наличии структуры (вещества пяти резервуаров озера с индивидуальными физико-химическими характеристиками и состоянием геохимической среды), и свойство веществ систем-резервуаров, заключающееся в наличии индивидуального функционирования (индивидуального поведения). Вещество мегасистемы «вещество вод оз. Байкал – вещество потоков окружающей среды» иерархично – вещество каждого резервуара может рассматриваться как система, обладающая целостностью в отношении своих функций и определяемая в своих границах по физико-химическим параметрам.

Статья поступила 12.01.2015 г.



Библиографический список

1. Астраханцева О.Ю. Создание физико-химической модели «Мегасистема «Озеро Байкал»». Выделение полуавтономных подсистем в озере Байкал // Бюллетень ВСНЦ СО РАМН. 2003. № 7. С. 124–129.
2. Астраханцева О.Ю. Расчет морфометрических характеристик сложной системы «Озеро Байкал» // Вестник ИрГТУ. 2007. № 4 (32). С. 42–49.
3. Астраханцева О.Ю., Чудненко К.В., Глазунов О.М. Выделение полуавтономных систем в озере Байкал // Вестник ИрГТУ. 2010. № 4 (44). С. 27–37.
4. Астраханцева О.Ю., Чудненко К.В., Глазунов О.М. Химический баланс Южного резервуара оз. Байкал // Вестник ИрГТУ. 2011. № 8 (55). С. 16–28.
5. Астраханцева О.Ю., Чудненко К.В. Равновесные физико-химические модели прибрежных вод резервуаров оз. Байкал // Современные проблемы геологии, геохимии и геоэкологии Дальнего Востока России: мат-лы IV Всерос. конф. молодых ученых (Владивосток, 27 августа – 5 сентября 2012 г.). Владивосток: Дальнаука, 2012. С. 249–258.
6. Астраханцева О.Ю., Чудненко К.В. Равновесные физико-химические модели поверхностных вод резервуаров оз. Байкал // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии: тр. Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 5-летию юбилею Ин-та водных и эколог. проблем СО РАН (Барнаул, 20–24 августа 2012 г.). Т.2. Барнаул: Институт водных и экологических проблем СО РАН, 2012. С. 25–31.
7. Астраханцева О.Ю., Чудненко К.В., Глазунов О.М. Химический баланс Селенгинского резервуара оз. Байкал // Вестник ИрГТУ. 2012. № 1 (60). С. 20–32.
8. Астраханцева О.Ю., Чудненко К.В., Глазунов О.М. Химический баланс Среднего резервуара оз. Байкал // Вестник ИрГТУ. 2012. № 3 (62). С. 28–42.
9. Астраханцева О.Ю., Чудненко К.В., Глазунов О.М. Химический баланс Ушканьеостровского резервуара оз. Байкал // Вестник ИрГТУ. 2012. № 5 (64). С. 36–50.
10. Астраханцева О.Ю., Чудненко К.В., Глазунов О.М. Химический баланс Северного резервуара оз. Байкал // Вестник ИрГТУ. 2013. № 3 (74). С. 35–47.
11. Астраханцева О.Ю., Чудненко К.В. Расчет форм существования компонентов и характера геохимической среды (Eh, pH, минерализация) в подсистемах – глубинных водах резервуаров оз. Байкал через внутренние физико-химические параметры, равновесные с параметрами окружающей среды // Гелиогеофизические исследования. 2014. № 9 (9). С. 30–34.
12. Астраханцева О.Ю., Филиппова Л.А. Исследование вклада потоков (из донных отложений и в донные отложения) в химические балансы Южного, Селенгинского, Среднего, Ушканьеостровского и Северного резервуаров оз. Байкал // Вестник ИрГТУ. 2014. № 10 (93). С. 68–79.
13. Богданов Ю.А., Купцов В.М., Шевченко В.П. [и др.]. Современные потоки химических элементов из водной толщи в донные осадки озера Байкал // Доклады РАН. 1997. Т. 352. № 1. С. 100–104.
14. Ветров В.А., Кузнецова А.И. Химический состав донных отложений озера Байкал: современное состояние и мониторинг // География и природные ресурсы. 1992. № 3. С. 93–102.
15. Ветров В.А., Кузнецова А.И. Микроэлементы в природных средах региона озера Байкал. Новосибирск: Изд-во СО РАН НИЦ ОИ ГГМ, 1997. 236 с.
16. Вильямс Д.Ф., Лин Чин, Карабанов Е.Б., Гвоздков А.Н. Геохимические индикаторы продуктивности и источники органического вещества в поверхностных осадках оз. Байкал // Геология и геофизика. 1993. Т. 34. № 10–11. С. 136–173.
17. Вологина Е.Г., Штурм М., Воробьева С.С. [и др.]. Особенности осадконакопления в озере Байкал в голоцене // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 5. С. 407–421.
18. Вотинцев К.К. Гидрохимия оз. Байкал. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 311 с.
19. Вотинцев К.К. К вопросу о современном осадконакоплении в Байкале // Доклады АН СССР. 1967. Т. 174. № 2. С. 419–422.
20. Вотинцев К.К. Гидрохимия // Проблемы Байкала. Новосибирск: Наука, 1978. С. 124–145.
21. Выхристюк Л.А. Органическое вещество донных осадков Байкала. Новосибирск: Наука, 1980. 80 с.
22. Галазий Г.И., Тарасова Е.Н. О фоновом содержании сульфатов в водах Байкала // География и природные ресурсы. 1993. № 3. С. 71–76.
23. Гвоздков А.Н. Геохимия современных донных осадков озера Байкал: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Иркутск: Институт геохимии, 1998. 209 с.
24. Голдырев Г.С. Осадкообразование и четвертичная история котловины Байкала. Новосибирск: Наука, 1982. 181 с.
25. Дмитриев Г.А., Колокольцева Э.М. Темпы и типы осадконакопления в оз. Байкал // Донные отложения. М.: Наука, 1970.
26. Кожов М.М. Вертикальное распределение планктона и планктоноядных рыб оз. Байкал // Вопросы ихтиологии. Вып. 2. 1954. С. 7–20.
27. Кубо Р. Термодинамика. М.: Мир, 1970. 304 с.
28. Кузьмин М.И., Грачев М.А., Вильямс Д.Ф. [и др.]. Непрерывная летопись палеоклиматов последних пяти миллионов лет озера Байкал // Геология и геофизика. 1998. Т. 39 (2). С. 139–156.
29. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Теория поля. 8-е изд., стереотип. М.: Физматлит, 2001. Т. II. 534 с.
30. Ломоносов И.С., Пампура В.Д., Гапон А.Е. [и др.]. Металлы в воде и донных отложениях Южного Байкала и его притоков // Мониторинг состояния озера Байкал. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. С. 76–94.
31. Мизандронцев И.Б. Осадкообразование // Проблемы Байкала. Новосибирск: Наука, 1978. С. 33–46.
32. Мизандронцев И.Б. Процессы осадкообразования // Литодинамика и осадкообразование Северного Байкала. Новосибирск: Наука, 1984.
33. Пампура В.Д., Кузьмин М.И., Гвоздков А.Н. [и др.]. Геохимия современной седиментации оз. Байкал // Геология и геофизика. 1993. Т. 34. № 10–11. С. 52–67.
34. Тарасова Е.Н. Органическое вещество вод Южного Байкала. Новосибирск: Наука, 1975. 147 с.
35. Тарасова Е.Н., Мещерякова А.И. Современное состояние гидрохимического режима озера Байкал. Новосибирск: Наука, 1992. 142 с.
36. Тарасова Е.Н. Компоненты трофического статуса в водах оз. Байкал, Хубсугул и Телецкое // Сибирский экологический журнал. 1998. № 5. С. 383–390.
37. Edgington D.N., Klamp I.V., Robbins I.V. et al. Sedimentation rates residence times and radionuclide inventori in Lake Baikal from Cs-137 and Rb-210 in sediments cores // Nature. 1991. V. 350.