



УДК 550.84 (571.53)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ (СТРУКТУРНОЙ) ИЕРАРХИИ ВЕЩЕСТВА ВОД ОЗЕРА БАЙКАЛ© О.Ю. Астраханцева¹Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
664033, Россия, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а.

Представлен метод выделения из сложного эволюционирующего и иерархического объекта – мегасистемы «вещество вод оз. Байкал – вещество потоков окружающей среды» локализованных систем термодинамического типа. На основе принципов термодинамики структура физико-химического состояния вещества вод оз. Байкал определена как многорезервуарная. В масштабе исторического времени химическое взаимодействие вещества вод оз. Байкал с веществом потоков окружающей среды – природная стационарная мегасистема пространственно локализованных геохимических состояний вещества озера, открытых по отношению к веществу потоков окружающей среды.

Ключевые слова: мегасистема; взаимодействие; окружающая среда; вещество вод; оз. Байкал; потоки; иерархичность.

STUDY OF LAKE BAIKAL WATER MATTER INTERNAL HIERARCHY

O. Yu. Astrakhanseva

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

The paper introduces a method allowing to single out localized systems of the thermodynamic type from a complex evolving and hierarchical object of the megasystem of "Lake Baikal water matter – environmental flow matter". On the basis of thermodynamic principles the structure of physico-chemical states of Lake Baikal water matter is determined to be multi-reservoir. In historical timescale chemical interaction between the Lake Baikal water matter and the environmental flow matter is a natural stationary megasystem of spatially localized geochemical states of the lake matter that are open to the matter of environmental flows.

Keywords: megasystem; interaction; environment; water matter; lake Baikal; flows; hierarchy.

Разработка научно обоснованных, современных теорий и методов управления и защиты объекта Всемирного Наследия – озера Байкал невозможна без тщательного изучения всех характеристик этой сложной системы. Однако познание законов движения макро-, микро-, биогенных элементов и органического вещества в водах озера через его физико-химические параметры, являющиеся результатом взаимодействий вещества вод озера с веществом окружающей среды, не получило должного развития. При этом проблема формирования и эволюции элементного состава вещества вод Байкала является одной из наиболее актуальных, а накопленный большой эмпирический материал по объекту, современные компьютерные технологии делают возможным анализ целостности и однородности структуры химического 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 оз. Байкал с таковыми же компонентами вещества потоков природной составляющей окружающей среды (реки, взвесь рек, дождь + снег, аэрозоль, подземные и минеральные воды, приток озерных вод из других резервуаров озера, потоки из донных отложений и в донные отложения, сток озерных вод в другие резервуары озера и в реку Ангару).

Целью данной работы является исследование внутренней (структурной) иерархии вещества вод оз. Байкал при взаимодействии компонентов вещества вод оз. Байкал с компонентами вещества потоков природной составляющей окружающей среды.

Современное состояние проблемы.

Имеем: средство для исследования физико-химических взаимодействий вещества вод оз. Байкал и вещества окружающей среды (обмен веществом и энергией) – алгоритм физико-химического моделирования эволюции системы локально-равновесных резервуаров, связанных потоками подвижных групп фаз [12, 21], с положенной в его основу теорией стабильных стационарных мегасистем [8]; и универсальный инструмент для решения широкого круга задач физико-химического моделирования – программный комплекс «Селектор». Учитывая, что комплексное изучение системы «вещество вод оз. Байкал – вещество потоков природной составляющей окружающей среды» методом компьютерного физико-химического моделирования еще никем ранее не проводилось, перед исследователями встает задача создания принципов и методов подхода к формированию физико-химических моделей системы «вещество вод озера Байкал – вещество потоков природной составляющей окружающей среды».

¹Астраханцева Ольга Юрьевна, младший научный сотрудник лаборатории физико-химического моделирования, e-mail: astra@igc.irk.ru
Astrakhanseva Olga, Junior Researcher of the Laboratory of Physico-Chemical Modeling, e-mail: astra@igc.irk.ru



Вещество вод оз. Байкал, кроме химического, испытывает еще тепловое и силовое (гравитационное) взаимодействия с веществом окружающей среды, и изменение состояния вещества (движение материи), согласно первому закону термодинамики, происходит вследствие получения из окружающей среды с безмассовыми и массовыми частицами энергии-теплоты Q (с солнечной радиацией, влиянием климата), энергии-работы A (гравитационное взаимодействие) и энергии-массы Z (химическое взаимодействие с веществом потоков окружающей среды): $rU = Q + A + Z$, где rU – изменение внутренней энергии системы. Тепловое, гравитационное и химическое взаимодействия являются частными взаимодействиями, в сумме определяющими общее (термодинамическое) взаимодействие вещества вод озера с веществом окружающей среды.

Химическое взаимодействие вещества вод оз. Байкал с компонентами вещества потоков природной составляющей окружающей среды существует и развивается не произвольным способом, а подчиняется определенным законам природы – наблюдаемым устойчивостям некоторого образца, и закон является только описанием этой устойчивости. Необходимо понимание порядка, который лежит в основе структуры и организации движения вещества в данной системе. Важнейшие структурные элементы системы «вещество вод озера Байкал – вещество потоков природной составляющей окружающей среды» – физико-химическое состояние вещества вод озера и вещества потоков, впадающих в озеро и вытекающих из него; физико-химические условия внешней среды, определяющие это состояние и функциональные связи вещества вод озера с веществом окружающей среды. Химическое взаимодействие компонентов вещества вод Байкала с компонентами вещества потоков природной составляющей окружающей среды может рассматриваться как единство трех объективных начал:

$$Z = B + O + \Phi, \quad (1)$$

где Z – химическое взаимодействие вещества вод озера с веществом потоков, впадающих в озеро и вытекающих из него, т.е. система; B – физико-химические параметры (состояние) вещества вод озера, донных отложений и вещества потоков; O – условия общего (термодинамического) взаимодействия вещества вод оз. Байкал с веществом окружающей среды, определяющие физико-химическое состояние вещества вод оз. Байкал; Φ – функциональные связи вещества вод озера с веществом потоков. Насчет первого слагаемого в формуле (1) следует сказать, что по веществу вод озера, донных отложений и потоков собран большой эмпирический материал, но он не обобщен, нуждается в осмыслении и систематизации. К тому же до сих пор структуру физико-химического состояния вещества вод оз. Байкал воспринимали как однорезервуарную. По второму слагаемому формулы (1) не учитывается роль всех частных взаимодействий вещества вод озера Байкал с веществом окружающей среды, составляющих общее взаимодействие, определяющее физико-химические параметры, энергетический баланс и энергетический потенциал вещества

вод озера, а также характер (целостность или локальность) геохимической среды озера, которая, в свою очередь, обуславливает реакцию вещества вод озера на поступившие с потоками окружающей среды компоненты. И, наконец, третье слагаемое. Здесь неизвестен отклик вещества вод оз. Байкал на поступление конкретных компонентов вещества потоков окружающей среды: происходит транзит этих компонентов или аккумуляция? Также не установлены функциональные характеристики вещества вод озера при взаимодействии с веществом потоков.

В соответствии с названными научными проблемами объект нашего исследования – вещество вод оз. Байкал – биокосное вещество, жидкий минерал H_2O с растворенными и взвешенными химическими компонентами (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al , Si , Mn^{2+} , $Fe_{общ}$, 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 , $C_{орг}$, $N_{орг}$, $P_{орг}$, $S_{орг}$, CO_2 , Ti), химически взаимодействующее с таковыми же компонентами вещества потоков природной составляющей окружающей среды, впадающих в озеро и вытекающих из него (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 реку Ангарау). Предмет нашего исследования – установление организованности в отношении структуры физико-химического состояния вещества вод озера Байкал и целостности функциональных характеристик в рассматриваемом химическом взаимодействии.

Необходимо учитывать, что Байкал – глубокое рифтовое олиготрофное озеро, эволюцией которого управляют физико-химические законы, обусловленные рифтогенной структурой земной коры. Геоэкоцистема Байкала подобна океанской, а не озерной [4]. На это указывает и наличие фронтов океанического типа [22–24]. Отличие озера Байкал от других континентальных озер – сложное строение дна и максимальная средняя глубина (больше 500 м). Следовательно, подход к исследованию структуры макросистемы «вещество вод оз. Байкал – вещество окружающей среды» должен быть особым, индивидуальным, как к сложной системе. Только такой подход даст реально осуществимую возможность перехода на новую технологию переработки накопленного фонда эмпирических данных по озеру Байкал и его потокам.

Методы исследования.

Для установления в веществе вод оз. Байкал пространственно-локализованных зон со стабильными физико-химическими параметрами в масштабе исторического времени разработан и использован теоретический метод исследования: выделения из сложного эволюционирующего и иерархического объекта – вещества вод озера Байкал систем термодинамического типа – аксиоматический метод на основе принципов и методов локально-равновесной термодинамики. Применительно к нашему объекту и предмету исследования этот метод включает следующие шаги:

1) системный подход – познание свойств внутренней среды макросистемы «вещество вод оз. Бай-



кал – вещество окружающей среды» через общее взаимодействие;

2) выявление частных взаимодействий вещества вод оз. Байкал с веществом окружающей среды;

3) применение законов термодинамики к закрытой макросистеме «вещество вод оз. Байкал – вещество потоков окружающей среды»;

4) применение закона транзитивности;

5) применение метода многорезервуарности.

Описание исследования.

В последние годы в мировой науке при проведении фундаментальных и прикладных исследований наметилась тенденция усиления их комплексности и междисциплинарности (рис. 1).

Это связано с пониманием того, что процессы, происходящие в природных объектах и окружающей их среде, влияют друг на друга и тесно взаимосвязаны. Физика позволяет создать упрощенные модели объекта, которые описываются законами термодинамики, электродинамики, квантовой и классической механики. Реальность сложной системы «вещество оз. Байкал – вещество окружающей среды» может быть отражена несколькими моделями, и структура физико-химического состояния вещества вод озера – одна из них. На рис. 1 представлена разработанная методика построения физико-химической структурной (структуры состояния вещества вод оз. Байкал по его стабильным физико-химическим параметрам, характеру геохимической среды – pH, Eh, минерализации) и функциональной балансовой моделей (миграция компонентов в озере при химическом взаимодействии вещества озера с веществом потоков природной составляющей окружающей среды).

На рис. 2 показан метод выделения из сложного открытого иерархического объекта – вещества вод оз. Байкал – зон, равновесных по физико-химическим параметрам с веществом окружающей среды.

Современную термодинамику сложных систем можно рассматривать как метод познания, исследующий преобразование материи и энергии в макросистемах, изучающий физико-химические превращения вещества в системе, связанные с выделением или поглощением тепла веществом системы, совершением работы сжатия или расширения, а также в связи с получением энергии при взаимодействии с веществом потоков, впадающих и вытекающих из системы. Термодинамика изучает поведение и свойства макроскопических тел, называемых в термодинамике системами. Главным предметом рассмотрения являются состояния. Введенное И. Ньютоном понятие «состояние системы» имело фундаментальное значение для всей физики. В термодинамике основными величинами, задающими состояние системы, – термодинамическими параметрами – являются давление, объем, температура и количество вещества. Данные параметры строго определяются лишь для систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия. Следовательно, термодинамические параметры – те параметры, которые характеризуют систему в термодинамическом равновесии. Состояния равновесия обладают свойством не изменяться до тех пор, пока внешние условия остаются неизменными. Термодинамика дает ответ на вопрос, какими будут параметры и свойства системы в равновесном состоянии, и строится на основе фундаментальных принципов (начал), которые являются обобщением многочисленных наблюдений и выполняются независимо от конкретной природы образующих систему тел. Поэтому закономерности в соотношениях между физическими величинами, к каким приводит термодинамика, имеют универсальный характер. Химическая термодинамика устанавливает равновесное (максимально вероятное) состояние природных систем. Система стремится к наиболее вероятному состоянию при данных внешних воздействиях, отсюда необратимость природных процессов.

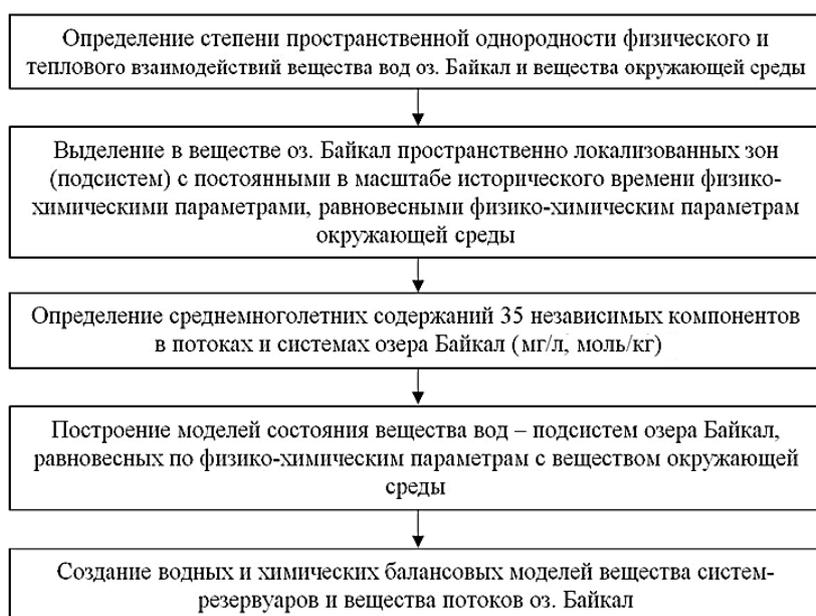


Рис. 1. Блок-схема формирования физико-химической структурной и функциональной моделей взаимодействия вещества вод оз. Байкал с веществом потоков окружающей среды

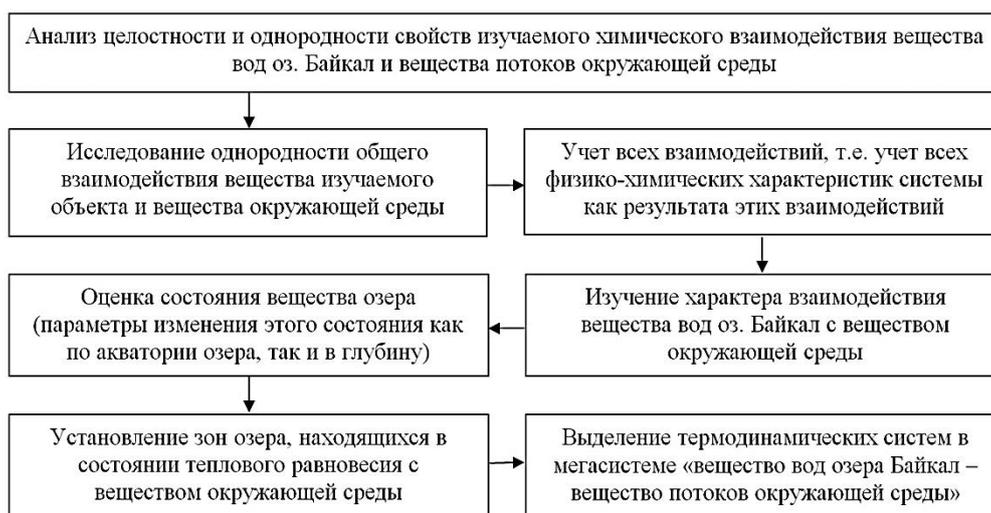


Рис. 2. Выделение в сложном иерархическом объекте – веществе вод оз. Байкал – зон, равновесных по физико-химическим параметрам с веществом окружающей среды

Характер и интенсивность материального (химического) обмена открытой системы «вещество вод оз. Байкал» с веществом потоков окружающей среды во многом определяются свойствами (параметрами) ее внутренней среды, которая является результатом общего (термодинамического) взаимодействия вещества вод оз. Байкал с массовым и безмассовым веществом окружающей среды. К закрытой макросистеме «вещество вод оз. Байкал – вещество окружающей среды» применимы законы термодинамики, которые позволяют оценить физико-химическое состояние ее вещества. Свойства внутренней среды можно определить только в состоянии равновесия (равенства) ее физико-химических параметров с аналогичными параметрами окружающей среды. Для выделения зон – объемов вещества вод озера, физико-химические параметры которых находятся в состоянии равновесия с таковыми же параметрами окружающей среды, т.е. постоянны в масштабе исторического времени, использованы следующие шаги: – *системный подход – познание свойств внутренней среды макросистемы «вещество вод оз. Байкал – вещество окружающей среды» через общее взаимодействие.* Состояние вещества вод оз. Байкал есть отражение характера общего взаимодействия вещества оз. Байкал с веществом окружающей среды, следовательно, анализ целостности и однородности свойств изучаемого взаимодействия зависит от однородности общего взаимодействия массового и безмассового вещества изучаемого объекта с массовым и безмассовым веществом окружающей среды, поэтому подход к данному исследованию означает учет всех взаимодействий, т.е. всех физико-химических характеристик системы как результата этих взаимодействий.

Необходимо установить *виды взаимодействий* в системе «вещество вод оз. Байкал – вещество природной составляющей окружающей среды». Любой физический объект всегда находится в состоянии непрерывного взаимодействия с окружающей средой (теория замкнутой системы) [16], и существование любого объекта и, следовательно, всех его свойств имеет

своей причиной взаимодействие этого объекта с окружающей средой. Свойства вещей возникают и обнаруживаются через отношения этих вещей с окружающей средой. Вещество вод оз. 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 природной составляющей окружающей среды» является ключевым в выяснении структурной и организационной сущности этой системы. В какие взаимодействия вступают вещество вод оз. Байкал и вещество природной составляющей окружающей среды? Озеро Байкал – часть планеты Земля. Как физический объект, вещество озера является наблюдаемым (веществом) и невидимым (полем) проявлениями материи. Вещество является составной сущностью и представляет собой единство материи, энергии и информационного аспекта существования, выражающего меру упорядочения универсума: Вещество = Материя + Энергия + Информация [10]. Поле физическое – это энергонасыщенное состояние материи: Поле = Материя + Энергия. Вещество, как известно, состоит из элементарных частиц, обладающих массой (фермионы), и безмассовых частиц (бозонов) – полей или частиц – переносчиков взаимодействий [7]. Согласно стандартной модели элементарных частиц, вещество, обладающее массой, – это двенадцать фундаментальных квантовых полей спина 1/2, квантами которых являются фундаментальные частицы-фермионы, которые можно объединить в три поколения фермионов: шесть лептонов, шесть кварков и двенадцать соответствующих им античастиц. Существование любого материального объекта возможно только благодаря взаимодействию образующих его элементарных частиц. Кварки и лептоны участвуют в физических взаимодействиях между собой и другими кварками и лептонами. Существование четырех видов фундаментальных физических взаимодействий (сильное, слабое, электро-



магнитное, гравитационное) объясняет все физические явления на микро- и макроуровне. Силовые взаимодействия между фермионами происходят посредством обмена частицами – переносчиками этих взаимодействий – бозонами. В роли бозонов выступают разные частицы, отсюда и различия между этими взаимодействиями. Переносчиками сильного взаимодействия являются глюоны, не обладающие ни массой, ни электрическим зарядом. Электромагнитное взаимодействие происходит посредством обмена квантами электромагнитного излучения, которые называются фотонами, и они также лишены массы. Слабое взаимодействие, напротив, передается массивными векторными или калибровочными бозонами, их вес больше протона в 80–90 раз. Гравитационное взаимодействие передается посредством не обладающих собственной массой гравитонов. Первые три типа взаимодействия объединены, считаются тремя различными проявлениями силы единой природы. Следовательно, под веществом понимают вид материи, обладающий массой покоя. Оно существует в виде физических тел, которые обладают некоторыми общими параметрами (температурой, химическим составом, плотностью, теплоемкостью и т.д.). Физическое поле – особый вид материи, который обеспечивает физическое взаимодействие материальных объектов и систем.

В настоящее время научно доказано и обосновано существование следующих разновидностей физического поля: электромагнитного, гравитационного, поля ядерных сил, волнового (квантового) [14]. Таким образом, ядерные взаимодействия – это взаимодействия между элементарными частицами материи. Ядерные взаимодействия ведут к изменению структуры атомов. Электромагнитные взаимодействия – это взаимодействия между молекулами внутри физических тел, жидкостей и газов. Сюда же относятся и электрический ток, электрическое и электромагнитное поле. Электрические взаимодействия не ведут к изменениям структуры молекул и, тем более, атомов. Они могут менять структуру физических тел: превращать их в жидкости, газы, и наоборот. Гравитационные взаимодействия – это взаимодействие между физическими телами притяжением, но существуют и включающие в себя как притяжение, так и отталкивание. Гравитационные взаимодействия не меняют структуру физических тел, молекул и атомов, но способны изменить структуру земных, планетарных, звездных систем и структуру галактик.

Кроме физических взаимодействий, между веществами существуют тепловое и химическое взаимодействия [13]. При тепловых взаимодействиях между физическими объектами, вернее между элементарными частицами их материй, переносчиками тепловой энергии являются фотоны инфракрасного диапазона. Тепловая энергия – это результат взаимодействия фотонов инфракрасного диапазона с внешними электронами атомов и молекул вещества. Только когда фотоны инфракрасного диапазона излучены или поглощены внешними электронами атомов и молекул вещества, можно говорить об изменении температуры

тела. Энергия Солнца, достигая поверхности Земли, будет тепловой только при взаимодействии вещества Земли с инфракрасным диапазоном солнечной радиации. Молекулы любого вещества при взаимодействии между собой непрерывно излучают и поглощают элементарные частицы, сложное движение которых проявляется так называемым тепловым полем, или просто теплотой.

Химические взаимодействия – это взаимодействия между атомами. Они ведут к изменениям структуры молекул, но структуру атомов изменить не могут.

Таким образом, взаимодействие или движение вещества в системе «вещество вод оз. Байкал – вещество природной составляющей окружающей среды», кроме химического и теплового, происходит посредством полей (гравитационного, электромагнитного, сильного, ядерного, и слабого) и характеризуется энергией взаимодействия. При этом роль ядерных и электромагнитных сил во взаимодействии крупных тел сводится практически к нулю. Ядерные силы очень быстро убывают с расстоянием. Электростатические силы, действующие между крупными телами, равны нулю, так как положительные и отрицательные электрические заряды, входящие в состав больших тел, взаимно компенсируют друг друга. Гравитационные силы неизменно вырастают при переходе к большим объектам (планеты, звезды), и гравитационное взаимодействие ощутимо на очень больших расстояниях, обладает, как говорят, дальностью действия [14].

Вещество озера Байкал испытывает химическое, тепловое и силовое (гравитационное) воздействия, и изменение состояния вещества (движение материи), согласно частному случаю закона сохранения энергии – первому закону термодинамики, происходит вследствие получения из окружающей среды с безмассовыми и массовыми частицами энергии-теплоты Q , энергии-работы A и энергии-массы Z . Эта сумма составляет статью «Приход» в энергетическом балансе вещества вод озера и не зависит от способа и пути перехода из состояния 1 в состояние 2 [11]:

$$U_1 - U_2 = rU = Q + A + Z, \quad (2)$$

где rU – изменение внутренней энергии системы, или

$$U_2 - U_1 = {}^1_2\delta dQ - {}^1_2\delta pdv + S {}^1_2\delta m_k dN_k, \quad (3)$$

где v – объем системы; p – давление окружающей среды (термостата); N_k – число молекул или молей (n_k) k -го компонента системы; m_k – химический потенциал (отнесенный к молекуле либо к молю) k -го компонента окружающей среды. Система совершает циклический процесс. Из первого начала термодинамики следует:

$$dS = dQ/T, \quad dS = 1/T \cdot (dU - dA - dZ), \quad (4)$$

отсюда соотношение Гиббса:

$$rU = TdS - pdv + S_k \delta m_k dN_k, \quad (5)$$

где p и m_k – параметры системы, равные соответствующим значениям для окружающей среды, поскольку система находится с ней в равновесии.

Внутренняя энергия одной подсистемы (оз. Байкал) меняется за счет обмена с другой подсистемой (окужающая среда) с помощью неких механизмов взаимодействия. Тепло, работа и энергия массы представляют собой количество энергии, получаемой



через соответствующие контакты. Термодинамическим контактом называют такую связь между системами, которая допускает тепловое взаимодействие, материальное взаимодействие или взаимодействие любой другой физической природы. Это соотношение относится к системе, состоящей из двух подсистем: собственно системе (веществу озера Байкал) и окружающей среде (вещество атмосферы, плюс вещество потоков химических элементов, плюс силовое воздействие безмассового вещества гравитационного поля Земли). Состояние (физико-химические параметры, функцией которых является внутренняя энергия) одной подсистемы (в нашем случае – вещество вод оз. Байкал), меняется за счет обмена веществом и энергией с другой подсистемой (вещество окружающей среды), и это называется взаимодействием этих подсистем. Взаимодействия – обмен массовым и безмассовым веществом. Безмассовое вещество, или частицы, представляется полями с целочисленным спином, не подчиняющиеся принципу Паули. Это означает, что они могут иметь много частиц в одном и том же состоянии. Слабое и сильное взаимодействия являются короткодействующими, они проявляются на расстояниях, значительно меньших размера атомного ядра. Дальнедействующими полями, т.е. полями, произведенными большим числом складывающихся вместе материальных частиц и выявляемыми на макроскопическом уровне, являются электромагнитное и гравитационное. Гравитационное поле оказалось первым, для которого была разработана теория – закон всемирного тяготения (Ньютон, XVII в.). Этому закону подчиняется сила тяготения: всякое тело притягивает любое другое тело с силой, пропорциональной массам этих тел:

$$F = G \cdot m_1 \cdot m_2 / R^2, \quad (6)$$

где F – сила взаимного гравитационного притяжения между двумя телами с массами m_1 и m_2 , разделенными расстоянием R , пропорциональная обеим массам и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними; G – гравитационная постоянная, равная $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$.

Несмотря на существенные различия мега-, макро- и микромиров, закон сохранения и превращения энергии, частные законы сохранения (массы, заряда, импульса и т.д.), закон всемирного тяготения и другие действуют во всех этих мирах, образуя единую сеть Вселенной. Гравитационная сила имеет универсальный характер. Всякая частица находится под действием гравитационной силы, величина которой зависит от массы или энергии частицы. Всякий объект во Вселенной притягивает любой объект с силой, пропорциональной его массе. Тела Вселенной совместно создают данную «среду обитания», пользуясь которой, физические тела во Вселенной движутся так, как если бы они притягивались друг к другу с некоторой силой. Планета Земля имеет огромную массу и, следовательно, создает значительное гравитационное поле. Гравитационные силы действуют на больших расстояниях и всегда являются силами притяжения, поэтому результаты их взаимодействия всегда суммируются. Следовательно, если имеется достаточное количество частиц вещества, то гравитационные силы могут

стать больше всех остальных сил. Вот почему эволюция Вселенной определяется именно гравитацией. Масса вещества вод оз. Байкал и масса вещества Земли вступают во взаимодействие своим веществом через частицы – переносчики – гравитоны, которые создают механическое взаимодействие – притяжения между веществом вод озера и веществом Земли, влияющей на состояние, т.е. на изменение внутреннего энергетического потенциала вещества вод озера и вещества Земли и, соответственно, на их эволюцию. Следовательно, гравитационное поле Земли оказывает влияние на состояние (физико-химические параметры) вещества (жидкий минерал H_2O с растворенными и взвешенными химическими компонентами плюс живое вещество) вследствие изменения потенциальной энергии молекул вещества (работы сжатия).

Таким образом, энергия, поставляемая в вещество вод оз. Байкал с массовым веществом потоков при химическом взаимодействии является только частью энергетического баланса вещества вод оз. Байкал. Оз. Байкал является партнером Земли по массе при силовом воздействии друг на друга, т.е. испытывает физическое, гравитационное взаимодействие с Землей (система «гравитационное поле оз. Байкал – гравитационное поле Земли»); партнером с химическими потоками (реки, взвесь рек, подземные, минеральные воды, дождь и снег, внутриводоемные потоки – из донных отложений и в донные отложения, стоковые потоки озерных вод в другие резервуары озера и реку Ангару) в плане материального обмена – химического обмена веществом и энергией (система «вещество вод оз. Байкал – вещество потоков окружающей среды»); партнером с атмосферой по обмену веществом (фотоны) и тепловой энергией (система «безмассовые частицы-фотоны вод оз. Байкал – безмассовые частицы-фотоны атмосферы»).

Необходимо выяснить, однородны ли тепловое, химическое и гравитационное взаимодействия вещества вод оз. Байкал и вещества окружающей среды на протяжении озера и по вертикали его вод. Однородность взаимодействия обуславливает целостность структуры системы, неоднородность – ее иерархичность.

Массовые частицы вещества – химические компоненты, биогенные элементы, органическое вещество – ведут себя в соответствии со своими свойствами и характеристиками той геохимической среды, в которой они находятся. Следовательно, установление целостности структуры физико-химического состояния или наличия пространственной иерархии – локализации физико-химических параметров вещества вод оз. Байкал в элементарных объемах – очень важная часть в понимании того, в какие условия попадет вещество окружающей среды. В анализе физико-химического состояния вод оз. Байкал на предмет пространственной однородности или пространственной иерархичности нам помогут законы науки, которая является частью физики, а именно – термодинамики.

Использование методов равновесной термодинамики открывает новые перспективы в области исследования оз. Байкал. Одна из главнейших особенно-



стей природных процессов состоит в том, что они осуществляются в условиях локального или мозаичного равновесия. Природные системы, т.е. так называемые открытые, могут находиться в стационарном неравновесном состоянии. Иерархичность пространственно-временной и энергетической структуры нашего мира, дискретность строения природных структур позволяют выделять системы, поведение которых описывается равновесными и неравновесными моделями. В крупнейшем и глубочайшем математически выраженном обобщении о неоднородных равновесиях, созданном Дж. Гиббсом (1876–1878), огромная область явлений, в том числе и геохимических, была охвачена законами термодинамики [6]. Дж. Гиббс предложил математические способы отыскания критериев равновесия геохимических систем, например, минимума их свободной энергии. Метод многорезервуарности предполагает рациональное выделение систем с различными условиями протекания процессов. Применение методов химической термодинамики для решения геохимических задач позволяет рассчитать геохимическое состояние системы через термодинамические параметры. Р. Гаррелз предложил метод термодинамического анализа водных минеральных систем [27]. Предметом исследования равновесной термодинамики являются закрытые макросистемы. Физико-химические системы стремятся перейти в состояние с максимальной вероятностью его осуществления, что эквивалентно равновесию системы. Основной постулат термодинамики: любая изолированная система с течением времени приходит в равновесное состояние и самопроизвольно не может из него выйти. Закрытость или открытость природной системы «вещество вод оз. Байкал – вещество окружающей среды» зависит от того, с какой стороны исследователю на нее смотрит. Если как на физическое, химическое или тепловое взаимодействие с окружающей средой, т.е. систему «вещество вод оз. Байкал – вещество окружающей среды», то это будет закрытая система, в которой, согласно закону сохранения и превращения энергии (а, следовательно, и массы вещества), внутренняя энергия (и количество вещества) в системе остаются неизменными и имеют постоянную величину. В результате обмена массовым и безмассовым веществом энергия переходит из вещества вод оз. Байкал в вещество окружающей среды и обратно, при этом изменяются параметры и объекта, и среды. По отношению же к веществу окружающей среды – атмосфере, веществу потоков или гравитационному полю вещество оз. Байкал является открытой системой. Следовательно, термодинамическая система – это прежде всего взаимодействие, обмен веществом и энергией между подсистемами, т.е. закрытая или замкнутая на себе система. Кроме того, существует термодинамическое равновесие между подсистемами – объектом и средой, и это макросистема (большое количество частиц). Таким образом, речь идет о *применении закона термического равновесия*.

Выделение термодинамических систем в структурах реального мира позволяет описывать поведение эволюционирующих объектов. Первое начало термо-

динамики – нулевой закон – вводит новую физическую величину – температуру, которую можно использовать для определения состояния термодинамических систем и выявления равновесия между ними, а также для выявления неоднородности воздействия на вещество объекта вещества окружающей среды. Понятие температуры вводят, если тело, или объект исследования, находится в состоянии термодинамического равновесия с окружающей средой. Из закона термического равновесия следует, что при равновесии внутренние параметры объекта являются функциями внешних параметров, т.е. параметров окружающей среды и температуры объекта. Закон можно сформулировать и в таком виде: при термодинамическом равновесии все внутренние параметры являются функциями внешних параметров и внутренней энергии. Следовательно, состояние теплового равновесия с окружающей средой в физической системе указывает на состояние общего (физического, теплового и химического) равновесия объекта с окружающей средой. Теперь понятно, что в системе «вещество вод оз. Байкал – вещество окружающей среды» показателем равновесного состояния в открытом по отношению к внешней среде объекте – веществе вод оз. Байкал – является термическое равновесие.

Тепловой энергетический баланс вещества вод оз. Байкал как результат общего взаимодействия с окружающим его пространством исследован в работе [1], где установлено, что величина теплосодержания вещества вод оз. Байкал по акватории распределена именно таким образом: в пяти локализованных частях-резервуарах (Южном, Селенгинском, Среднем, Ушаньеостровском, Северном) (рис. 3), и, следовательно, мы можем говорить о *применении закона транзитивности*. Установленное состояние теплового равновесия вещества вод оз. Байкал с веществом окружающей среды в работе [2] в виде локализованных пяти частей-резервуаров, согласно нулевому закону термодинамики, указывает на локализацию состояния термодинамического равновесия вещества вод оз. Байкал с веществом окружающей среды в виде пяти частей-резервуаров, ограниченных физико-химическими рамками, которое, в свою очередь, указывает на локальное состояние частных (физического, теплового и химического) равновесий вещества этих резервуаров с веществом окружающей среды и на стабильные в масштабах исторического времени физико-химические характеристики вещества в данных резервуарах: температуру, давление, объем, энтропию; на постоянство тепловых, химических и силовых балансовых характеристик по обмену массовым и безмассовым веществом с веществом окружающей среды. Следовательно, согласно закону транзитивности, состояние локального теплового равновесия вещества вод пяти крупных районов (резервуаров) оз. Байкал с веществом окружающей среды указывает на локальные состояния физического и химического равновесий вещества вод резервуаров с веществом окружающей среды (рис. 3).

Применение закона термического равновесия доказывается неравенство внешних условий (о окружающей

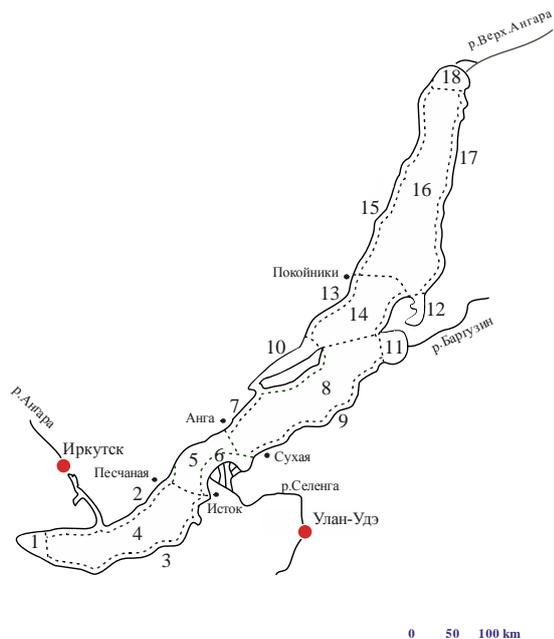


Рис. 3. Схема районов оз. Байкал (на основании распределения величины теплосодержания вещества вод оз. Байкал по акватории озера) [1]: Южный Байкал: 1 – южная оконечность; 2 – северо-западный прибрежный район; 3 – юго-восточный прибрежный район; 4 – центральный район. Селенгинский район: 5 – северо-западный прибрежный район; 6 – юго-восточный прибрежный район. Средний Байкал: 7 – северо-западный прибрежный район; 8 – центральный район; 9 – юго-восточный прибрежный район; 10 – Малое Море; 11 – Баргузинский залив; 12 – Чивыркуйский залив. Ушканьостровский район: 13 – северо-западный прибрежный район; 14 – центральный район. Северный Байкал: 15 – северо-западный прибрежный район; 16 – центральный район; 17 – юго-восточный прибрежный район; 18 – северная оконечность

среды) в резервуарах озера Байкал по различию температурных характеристик вод резервуаров. Каким фактором вызвано это неравенство внешних условий и внутренних состояний резервуаров? Геохимический тип состава вещества вод озера определяют климатические и геолого-структурные факторы. Климат контролирует биологическую продуктивность озера и условия формирования вещества в нем. М.М. Кожов составил схему районирования оз. Байкал по горизонтальному распределению планктона [9], в которой прибрежные воды и места впадения крупных рек в озеро отделяются от открытых вод, но биологическая продуктивность открытых вод оз. Байкал одинакова на всем протяжении озера (рис. 4). Следовательно, влияние климата однородно по акватории озера, и не климат является причиной различия (неоднородности) теплового или энергетического обмена, а другой фактор – геолого-структурный, т.е. резкая расчлененность дна озера, которая обуславливает резкое различие глубин и объемов вод озера по его акватории и, соответственно, неоднородность градиентов масс вещества вод озера и гидростатических давлений. Резкая расчлененность дна озера и, соответственно, разновеликость масс вещества вод оз. Байкал по его аква-

тории обуславливают неоднородность, разновеликость взаимодействия гравитационного поля вещества вод озера Байкал и гравитационного поля Земли. Приход тепловой энергии с фотонами к веществу вод оз. Байкал будет однородным по акватории, но масса вещества в резервуарах, т.е. количество частиц, получающих эти фотоны, и, соответственно, изменение внутренней энергии как аддитивной величины в резервуарах – будут разными. Кроме того, вследствие неоднородности силового поля – гравитации по акватории озера, силовое взаимодействие в резервуарах также будет различаться. На вещество вод оз. Байкал, особенно глубинных и придонных, оказывает силовое воздействие поле гравитации в виде сжатия. В этом случае к веществу вод оз. Байкал происходит поступление энергии в виде энергии-сжатия и расход энергии в виде энергии-расширения.

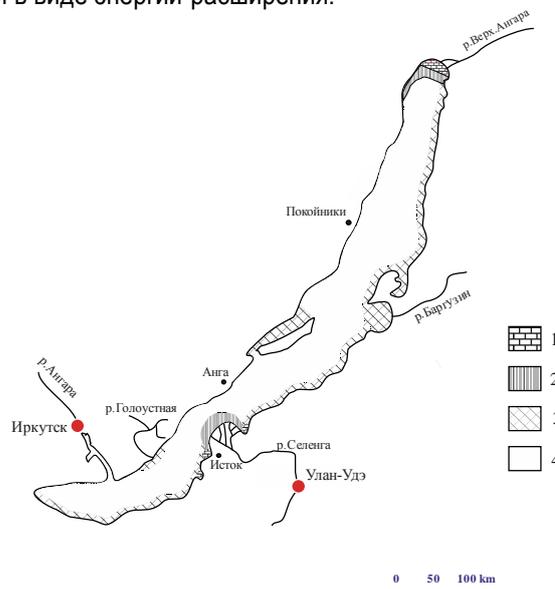


Рис. 4. Районирование оз. Байкал по горизонтальному распределению планктона [Кожов, 1954]: 1 – Участки прибрежно-соровой зоны (закрытые и защищенные губы, бухты, заливы и предустьевые участки крупных притоков оз. Байкал. Под сорами подразумеваются отчлененные от Байкала прибрежные мелководные участки, воды которых полностью изолированы от вод открытого Байкала). 2 – Мелководные районы, расположенные перед впадением крупных рек. 3 – Обширные заливы, губы и другие относительно мелководные участки вдоль открытого побережья. 4 – Глубоководные районы

Согласно первому закону термодинамики о неизменности внутренней энергии в замкнутых системах для циклического процесса движения вещества, в водах озера Байкал имеет место соотношение:

$$A + Q + Z = rU = 0, \quad (6)$$

где rU – годовое изменение внутренней энергии; A – энергия-работа; Q – энергия-теплота; Z – энергия-масса. Энергия-работа, энергия-теплота и энергия-масса оставляют пункты статей «Приход» и «Расход» в энергетических балансах вещества резервуаров оз. Байкал. Формула (6) представляет собой результат годового получения и расхода энергии. По формуле (6) над системой совершают работу A (притяжение),



(и) или система производит работу, равную A , над окружающей средой (расширение) и получает от окружающей среды, в свою очередь, $Q + Z$, т.е. энергию теплоты и энергию массы. Совершаемая веществом оз. Байкал работа равна разности между изменением ее внутренней энергии и количеством энергии сжатия, энергии-теплоты и энергии-массы, переданными системе:

$$rA = rU - rQ - rZ, \quad (7)$$

или

$$rQ + rZ = rU - rA, \quad (8)$$

Количество энергии-теплоты и энергии-массы, переданное системе, идет на изменение внутренней энергии системы и на совершение системой работы. Отсюда: работа расширения веществом вод оз. Байкал может совершаться за счет изменения внутренней энергии или за счет сообщения системе некоторого количества энергии-теплоты и энергии-массы. Следовательно, то тепло и та энергия, которые получают резервуары с солнечной радиацией и веществом потоков окружающей среды, идет на совершение работы расширения веществом вод озера Байкал против сил сжатия. А поскольку градиенты силового взаимодействия в резервуарах разные, то и расход энергии тоже будет разным, и итоговое изменение внутренней энергии тоже будет индивидуальным.

Разновеликость гравитационного взаимодействия вещества вод оз. Байкал и вещества Земли по акватории озера из-за морфологических характеристик (резкого пересечения дна и, соответственно, разновеликости масс озера по его акватории) обуславливает индивидуальность статей «Приход» и «Расход» в энергетических балансах резервуаров и, соответственно, самих энергетических балансов. Энергия, которую получают резервуары с солнечной радиацией, с силами притяжения и веществом потоков, идет на изменение внутренней энергии и совершение работы расширения веществом вод резервуаров против гравитационных сил сжатия. Вещество вод каждого резервуара оз. Байкал имеет свой, индивидуальный энергетический потенциал, т.е. способность осуществлять химические реакции при поступлении в вещество вод резервуаров вещества потоков, и индивидуальные параметры геохимической среды как результат индивидуальности этих процессов.

Теперь понятно, почему температура вод резервуаров озера различается при равномерном поступлении солнечной радиации к водам озера по акватории. Происходит это из-за разного энергетического потенциала резервуара, функцией которого температура является.

Геологический фактор – рельеф или резкая расчлененность дна оз. Байкал – является причиной иерархичности вещества вод озера или локализации его на зоны с различающимися индивидуальными физико-химическими характеристиками. Все подсистемы вещества вод оз. Байкал имеют индивидуальные термодинамические параметры, которые, в свою очередь, определяют последующий индивидуальный тип преобразования органического и минеральных веществ в резервуарах. Геохимическая направлен-

ность преобразования органического вещества и типа выветривания горных пород, в свою очередь, обуславливает индивидуальность характера геохимических сред в веществе вод этих резервуаров. Характер геохимической среды в веществе резервуара контролирует и определяет продукт взаимодействия вещества вод резервуара и вещества выпадающих в него потоков – новообразованное вещество. Именно поэтому мы можем говорить о *применении метода многорезервуарности* (рис. 5).

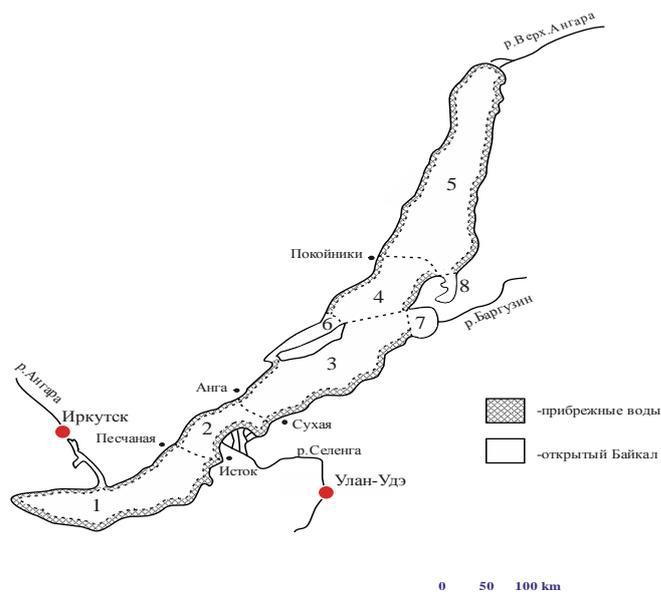


Рис. 5. Схема зональности геохимических состояний вещества вод оз. Байкал:

- 1 – Южный резервуар; 2 – Селенгинский; 3 – Средний;
 - 4 – Ушканьеостровский; 5 – Северный; 6 – Малое море;
 - 7 – Баргузинский залив; 8 – Чивыркуйский залив.
- Резервуары 1–5 – разделены на прибрежные воды и открытый Байкал

Использована теория И. Пригожина (1960) о стационарном неравновесном состоянии системы. Классическая неравновесная термодинамика рассматривает термодинамические переменные как локальные в пространстве величины (на любую природную систему в пространстве всегда действует, как минимум, одно силовое поле – поле тяготения). Заслугой неравновесной термодинамики является установление того факта, что самоорганизация является общим свойством открытых систем. При этом именно неравновесность служит источником упорядоченности. Этот вывод послужил отправной точкой для идей, выдвинутых представителями Брюссельской школы во главе с И. Пригожиным. По теории И. Пригожина (1960), стационарное неравновесное состояние системы можно охарактеризовать теми же параметрами, что и равновесное: температурой, давлением, химическими потенциалами компонентов системы, но не с постоянными для всей системы значениями, а зависящими от координат и времени.

На основе принципов термодинамики структура физико-химического состояния вещества вод оз. Бай-

кал определена как многорезервуарная. В веществе вод оз. Байкал рационально выделены зоны-резервуары с различными условиями протекания процессов и с наиболее вероятными, с точки зрения характера геохимической среды, стабильными физико-химическими параметрами, равновесными таковым же параметрам окружающей среды: 1 – Южный; 2 – Селенгинский; 3 – Средний; 4 – Ушканьеостровский; 5 – Северный резервуар. Из отдельных заливов – Малое Море, Баргузинский и Чивыркуйский заливы. Вещество вод каждого резервуара разделено на прибрежные и открытые зоны (рис. 5).

Многие исследователи делили вертикальную структуру вод оз. Байкал на три области: поверхностную, глубинную, придонную; по температурным признакам [3, 5, 17, 27]; по динамическим скоростям течений [2, 5]; по гидрохимическим [19, 20], гидробиологи-

ческим показателям [18]; по оптической структуре вод на примере показателя ослабления светового излучения [23, 24]. Доля каждой из зон составляет примерно 0,3, 0,5 и 0,2 от полной глубины соответственно [2, 24, 25]. Соотношение размеров прибрежной зоны и открытой части озера приблизительно 1:10 [15]. Открытый Байкал – воды озера за пределами прибрежной полосы (рис. 5, 6).

Следовательно, модель движения вещества (компонентов) в глобальной мегасистеме «вещество вод оз. Байкал – вещество потоков природной составляющей окружающей среды» представляется как совокупность последовательно связанных потоками водного раствора химических реакторов-резервуаров (рис. 7). Учитывая схему течений в резервуарах оз. Байкал (рис. 8), [23, 25], вещество каждого резервуара можно представить как химический реактор (рис. 9).

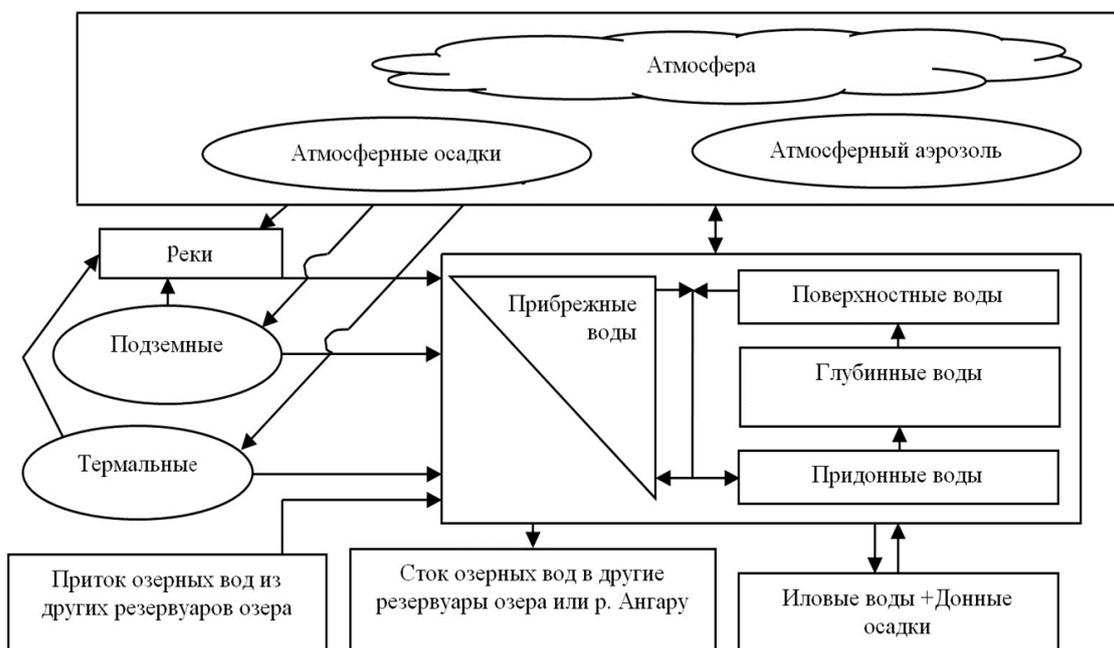


Рис. 6. Схема химического взаимодействия в системе «вещество вод резервуара оз. Байкал – вещество окружающей среды (потоки)»

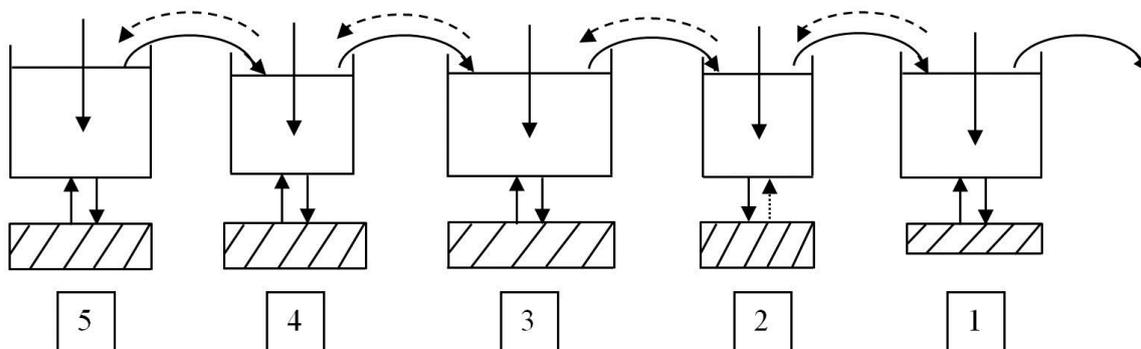


Рис. 7. Схема протекания процесса взаимодействия вещества вод оз. Байкал и вещества потоков в глобальной мегасистеме «вещество оз. Байкал – вещество потоков окружающей среды» как совокупность последовательно связанных потоками водного раствора химических реакторов-резервуаров: 1 – вещество Южного; 2 – вещество Селенгинского; 3 – вещество Среднего; 4 – вещество Ушканьеостровского; 5 – вещество Северного резервуара

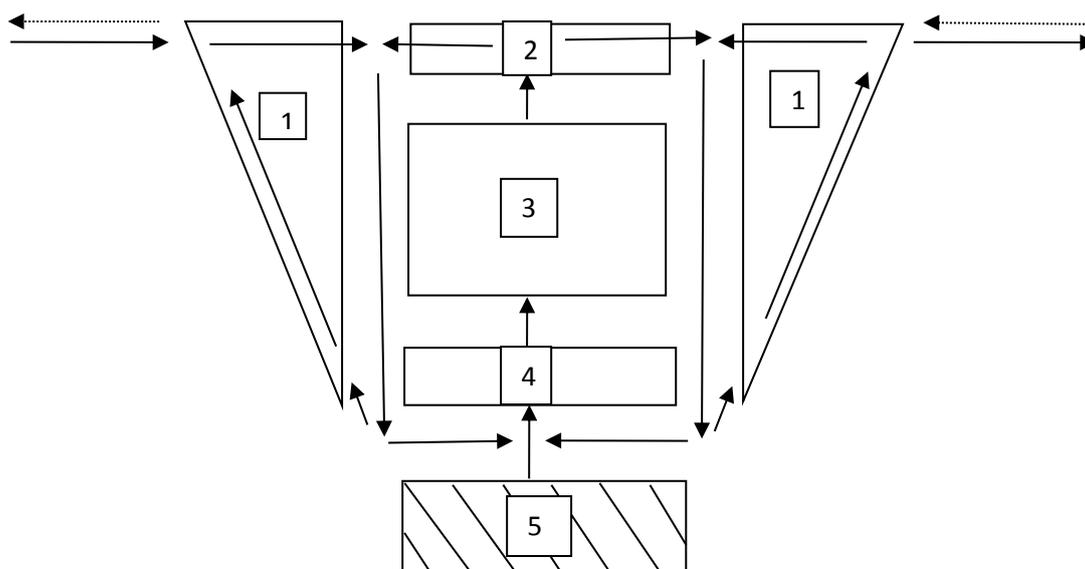


Рис. 8. Схема течений в резервуарах оз. Байкал [23, 25]: 1 – прибрежные воды; 2 – поверхностные; 3 – глубинные; 4 – придонные воды; 5 – донные отложения

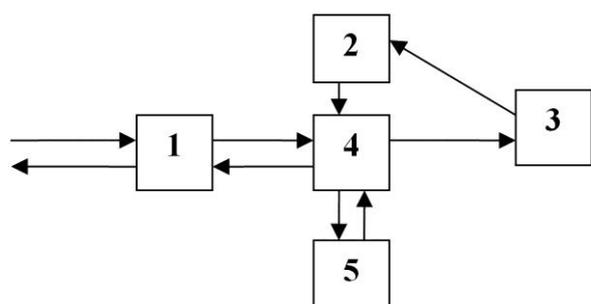


Рис. 9. Схема взаимодействия вещества подсистем и вещества потоков в системе «вещество резервуара оз. Байкал – вещество потоков окружающей среды» как химический реактор: 1 – вещество прибрежных вод; 2 – вещество поверхностных вод; 3 – вещество глубинных вод; 4 – вещество придонных вод; 5 – вещество донных отложений

Развитие вещества вод оз. Байкал определяется внешними условиями: неоднородностью сил гравитации, направленными к центру Земли (неоднородностью градиента давления); тепловым потоком (температура, климат); химическими потоками (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 реку Ангару). Все эти факторы определяют исследуемую систему, как состоящую из резервуаров, неравновесных друг с другом, но равновесных с веществом окружающей среды, т.е. как стационарную систему (находящуюся в постоянстве своего состояния). Гравитационное и тепловое взаимодействия окружающей среды с веществом подсистем резервуаров различаются по вертикали озера, следовательно, и физико-химические свойства подсистем, которые зависят от этих взаимодействий, т.е. условия протекания процессов, разные. Мегасистема «вещество вод

оз. Байкал – вещество окружающей среды» упорядочена или самоорганизована в вещество подсистем с различающимися состояниями, со стабильными в масштабе исторического времени индивидуальными физико-химическими характеристиками, условиями формирования конечных продуктов химических реакций и энергетическим балансом, обменивающимися потоками вещества и энергии (прибрежные, поверхностные, глубинные, придонные воды) вещества пяти резервуаров озера, находящихся в равновесии по физико-химическим параметрам с веществом внешней среды: «вещество вод Южного резервуара – вещество окружающей среды», «вещество вод Селенгинского резервуара – вещество окружающей среды», «вещество вод Среднего резервуара – вещество окружающей среды», «вещество вод Ушканьеостровского резервуара – вещество окружающей среды», «вещество вод Северного резервуара – вещество окружающей среды» (см. рис. 5, 6).

Разработка метода выделения из сложного эволюционирующего и иерархического объекта – части физического мира – системы «вещество вод озера Байкал – вещество потоков окружающей среды» систем термодинамического типа и введение составной системы «мегасистема «вещество вод озера Байкал – вещество потоков окружающей среды», когда рассматриваются состояния ограниченных равновесий и использованы представления локально-равновесной термодинамики, позволило сделать следующие выводы:

1. В масштабе исторического времени, т.е. в плане повторяющихся из года в год природных закономерностей состояния и движения вещества, химическое взаимодействие вещества вод оз. Байкал с веществом потоков окружающей среды – природная стационарная мегасистема пространственно локализованных геохимических состояний вещества озера,



открытых по отношению к веществу потоков окружающей среды.

2. Анализ целостности и однородности свойств изучаемого химического взаимодействия вещества вод оз. Байкал с веществом потоков окружающей среды зависит от однородности общего – термодинамического (физического, теплового, химического) взаимодействия вещества вод озера с веществом окружающей среды, и подход к данному исследованию означает учет всех физико-химических характеристик системы как результата всех взаимодействий.

3. Иерархичность гравитационного взаимодействия вещества вод оз. Байкал и вещества Земли обуславливает иерархичность общего – термодинамического взаимодействия вещества вод оз. Байкал с веществом окружающей среды и иерархичность их частных – теплового и химического взаимодействий.

4. Разновеликое взаимодействие гравитационных полей вещества вод озера Байкал и вещества Земли по акватории озера из-за его морфологических характеристик – резкой расчлененности дна – обуславлива-

ет индивидуальность приходной и расходной статей в энергетических балансах и, соответственно, самих энергетических балансов резервуаров. 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.

5. Разновеликость гравитационного взаимодействия вещества вод оз. Байкал и вещества Земли по акватории озера является тем фактором, который определяет структуру физико-химического состояния вещества вод озера как многорезервуарную – состоящую из пяти резервуаров, неравновесных друг с другом по физико-химическим параметрам, но равновесных по этим параметрам с веществом окружающей среды, т.е. как находящуюся в постоянстве своего состояния (стационарную) мегасистему.

Статья поступила 18.03.2015 г.

Библиографический список

1. Верболов В.И., Сокольников В.М., Шимараев М.Н. Гидрометеорологический режим и тепловой баланс оз. Байкал. М.: Наука, 1965. 373 с.
2. Верболов В.И. Проблема изучения гидродинамики глубокого водоема (на примере Байкала) // Круговорот вещества и энергии в водоемах. Гидрология и климат. Листвянка-на-Байкале, 1977. С. 199–203.
3. Верещагин Г.Ю. Основные черты вертикального распределения водных масс на Байкале // Академику В.И. Вернадскому к 50-летию научной и педагогической деятельности. Часть вторая. М., 1936. С. 1207–1230.
4. Верховина В.А. Автореф. дис. ... доктора тех. наук. ИрГТУ. Формирование качества пресных вод крупнейших и рифтовых озер мира и их рациональное использование (на примере озер Байкал и Ньяса), 2002. 344с.
5. Вотинцев К.К. Некоторые итоги гидрохимических исследований оз. Байкал // Изв. Сиб. отд. АН СССР. 1958. № 2. С. 6–12.
6. Гиббс Дж. В. Термодинамика. Статистическая механика. М.: Наука, 1982. 584 с.
7. Емельянов В.М. Стандартная модель и ее расширения. М.: Физматлит, 2007. 584 с.
8. Карпов И.К. Физико-химическое моделирование на ЭВМ в геохимии. Новосибирск: Наука, 1981. 247 с.
9. Кожов М.М. Вертикальное распределение планктона и планктоноядных рыб оз. Байкал // Вопросы ихтиологии. 1954. Вып. 2. С. 7–20.
10. Косинов Н.В. Проблема вакуума в контексте нерешенных проблем физики // Физический вакуум и природа. 2000. № 3.
11. Кубо Р. Термодинамика. М.: Мир, 1970. 304 с.
12. Кулик Д.А., Чудненко К.В., Карпов И.К. Алгоритм физико-химического моделирования эволюции системы локально-равновесных резервуаров, связанных потоками подвижных групп фаз // Геохимия. 1992. № 6. С. 858–879.
13. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Статистическая физика. Ч. 1. Изд. 3-е, испр. М.: Наука, 1976. 584 с. (Т. V).
14. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Теория поля. Изд. 8-е, стереотипное. М.: Физматлит, 2001. 534 с. (Т. II).
15. Ли М.Е., Неуймин Г.Г., Шерстянкин П.П. Некоторые черты динамики вод Байкала по материалам гидрооптических наблюдений. Течения и диффузия вод Байкала. Л.: Наука, 1970. С. 136–145.
16. Мельников В.И. Теория замкнутой системы. Норильск: Изд-во Норильского индустриального института, 2003. 148 с.
17. Россоломо Л.А. Температурный режим озера Байкал: труды Байкальской лимнол. станции. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 561 с.
18. Тарасова Е.Н., Вотинцев К.К. Взвешенное органическое вещество и доля взвешенного органического углерода в водах Байкала. Взаимодействие между водой и седиментами в озерах и водохранилищах. Л.: Наука, 1984. С. 61–72.
19. Толмачев В.А. О сезонных колебаниях растворимого кислорода на Больших глубинах Байкала // Докл. АН СССР. 1957. № 2. Т. 113. С. 395–398.
20. Толмачев В.А. Некоторые гидрохимические показатели внутреннего водообмена в Байкале // Докл. АН СССР. № 3. Т. 113. С. 639–642.
21. Чудненко К.В. Автореф. дис. ... доктора г.-м. наук. ИрГТУ. Теория и программное обеспечение метода минимизации термодинамических потенциалов для решения геохимических задач, 2007. 385 с.
22. Шерстянкин П.П. Присклоновые фронты показателя ослабления света на Байкале в зимний период // Докл. АН СССР. 1991. № 5. Т. 321. С. 1087–1090.
23. Шерстянкин П.П. Оптические структуры и фронты океанического типа на Байкале: в форме науч. доклада. ИО РАН, М., 1993. 37 с.
24. Шерстянкин П.П. Байкал, питьевая вода, устойчивое развитие: сегодня и в XXI веке // Химия в интересах устойчивого развития. 1997. № 5. С. 443–451.
25. Шерстянкин П.П., Куимова Л.Н. Термобарическая устойчивость и неустойчивость глубоких природных вод озера Байкал // Докл. АН СССР. 2002. № 2. Т. 385. С. 247–251.
26. Шимараев М.Н. Элементы теплового режима озера Байкал. Новосибирск: Наука, 1977. 148 с.
27. Garrels R. Mineral equilibria at low temperature and pressure. New York: Harper, 1960. 306 p.