

На правах рукописи

САКИРКО Мария Владимировна

**Динамика содержания растворенных газов и биогенных элементов в воде
открытой литорали озера Байкал**

Специальность 25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы,
гидрохимия

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Лимнологическом институте Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель

кандидат географических наук
Домышева Валентина Михайловна

Официальные оппоненты:

доктор химических наук, профессор
кафедры экологии ФГБОУ ВПО
РГГМУ

Фрумин Григорий Тевелевич

кандидат географических наук, и.о.
зав. лаборатории гидрохимии и
экотоксикологии ФГБУН ИНОЗ РАН,
Санкт-Петербург

Игнатьева Наталья Викторовна

Ведущая организация:

Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт мониторинга климатических
и экологических систем Сибирского
отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится « 29 » марта 2012 г. в 12 час. на заседании диссертационного совета Д 002.064.01 при Федеральном Государственном Бюджетном Учреждении науки Институте озероведения Российской академии наук по адресу: **196105, Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, 9, lake@limno.org.ru**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального Государственного Бюджетного Учреждения науки Института озероведения Российской академии наук.

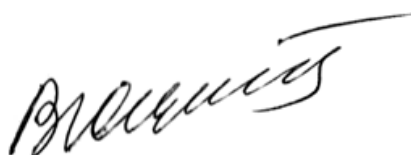
Автореферат разослан « ____ » февраля 2012 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Д 002.064.01,

кандидат военных наук



В.Ю. Цветков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Озеро Байкал, расположенное в Восточной Сибири, является самым древним (25 млн. лет), глубоким (1637 м) и крупным резервуаром чистой, пресной воды на планете. (23 тыс. км³). Озеро внесено в список Участков Мирового Наследия и имеет важное стратегическое значение как крупнейший источник питьевой воды. Тенденция увеличения концентрации углекислого газа в атмосфере и повышения приземной температуры, наблюдающаяся в последние десятилетия, может привести к изменению динамики биогенных элементов, климатическим и прочим изменениям. Отклик на изменения климата будет виден, в первую очередь, в литорали озера Байкал.

Литоральная зона занимает около 7% площади водного зеркала (Фиалков, 1983), но оказывает значительное влияние на функционирование экосистемы озера. Гидрохимическим исследованиям литорали озера Байкал посвящены многие работы (Яснитский, 1930; Бочкарев, 1947, Верецагин, 1927; Вотинцев, 1961; Мизандронцев, 2002, 2003). Однако вопрос о процессах, происходящих в зоне контакта различных природных комплексов – наземного и водного, остается недостаточно изученным. Именно литораль характеризуется большим разнообразием гидрологических и биологических процессов, здесь сказывается влияние водосбора. Первичная продукция литоральной зоны вносит ощутимый вклад в общую продукцию озера, несмотря на меньшую площадь. До начала наших работ в Байкальском регионе измерения углекислого газа в атмосфере практически отсутствовали, а для оценки потока CO₂ в системе вода-атмосфера использовались значения средней фоновой планетарной концентрации газа. В тоже время ранее полученные результаты по газообмену водной поверхности Байкала с атмосферой (Мизандронцев, 1995, 1996), послужили нам методической основой для правильной постановки исследований.

Расширение информации о временной динамике биогенных элементов и растворенных газов в открытой литорали озера на современном этапе важно для более полной гидрохимической характеристики Байкала, для изучения озерных процессов, связанных с режимом биогенных элементов, для

выявления преобладающего направления потока углекислого газа. Повышение антропогенной нагрузки в условиях активного развития туризма на Байкальской природной территории может отразиться на качестве воды литорали озера, как основного источника водоснабжения населенных пунктов. Исследование этого круга проблем и определяет актуальность настоящей работы.

Цель работы состояла в исследовании временной динамики растворенных газов и биогенных элементов, особенностей их режима в открытой литорали озера Байкал, а также оценке преобладающего направления потоков углекислого газа в системе вода–атмосфера на современном этапе.

Для ее достижения были поставлены следующие **задачи**:

- провести систематические исследования временной динамики величины рН, концентрации биогенных элементов, растворенных газов в воде открытой литорали озера, содержания углекислого газа в приземной атмосфере и определить закономерности их суточной, сезонной и межгодовой динамики;
- оценить влияние атмосферных осадков и ветрового воздействия на ритмы суточной изменчивости исследуемых характеристик и на процесс газообмена CO_2 с атмосферой;
- на основе данных о содержании углекислого газа в воде озера и приземной атмосфере оценить преобладающее направление потока CO_2 в открытой литорали Байкала;
- провести синхронные наблюдения в открытой литорали и в пелагиали озера за суточным ходом содержания растворенных газов, биогенных элементов в воде, концентрации углекислого газа в приземной атмосфере и направления его потока в системе вода – атмосфера.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней впервые:

- изучены ритмы суточного хода биогенных элементов и растворенных газов с одновременными измерениями углекислого газа в приземной атмосфере непосредственно над местом исследования в литорали озера;

- показаны сезонные и межгодовые различия суточных ритмов содержания исследуемых компонентов в поверхностной воде литорали;
- уточнена зависимость между внутрисуточной динамикой содержания биогенных элементов, растворенных газов и количественными показателями фитопланктона;
- экспериментально показано, что выпадение атмосферных осадков на поверхность воды Байкала способствует росту концентрации нитратов и выделению углекислого газа из поверхностного слоя воды в атмосферу;
- по натурным данным оценено преобладающее направление потоков углекислого газа в открытой литорали озера;
- выявлены различия суточных ритмов содержания исследуемых компонентов в поверхностной воде литорали и пелагиали озера.

Практическая значимость. Основные результаты работы могут быть использованы при планировании и разработке оптимальных методик мониторинговых исследований состояния вод озера Байкал. Полученные количественные данные многолетних натурных наблюдений могут служить опорными фоновыми величинами при проведении оценок качества воды в условиях возрастающей антропогенной нагрузки в связи с интенсивным хозяйственным и туристическим развитием Байкальского региона. Они также важны для оценки величины и направления потока углекислого газа на границе раздела между водой озера Байкал и атмосферой в рамках активности по реализации Киотского протокола и последующих международных соглашений.

Основные положения и результаты исследования, выносимые на защиту:

1. В открытой литорали Байкала суточный ход содержания биогенных элементов характерен для всех сезонов года. Сезонные особенности концентрации биогенных элементов, растворенных в воде углекислого газа и кислорода, наиболее сильно проявляются в амплитудах суточных ритмов. Внутригодовое изменение концентраций и амплитуд суточного хода исследуемых характеристик значительно превышает их межгодовые вариации.

2. Влияние внешних факторов (ветровое перемешивание, выпадение атмосферных осадков на поверхность воды озера Байкал) приводит к

кратковременному изменению содержания биогенных элементов и повышению концентрации углекислого газа.

3. По данным измеренных *in situ* содержаний углекислого газа в воде озера и приводной атмосфере осуществлена оценка направления потоков CO_2 . В период открытой воды поглощение углекислого газа поверхностью литорали Южного Байкала преобладает над его выходом в атмосферу.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и списка литературы; изложена на 150 страницах, иллюстрирована 68 рисунками и 9 таблицами. Библиографический список содержит 175 наименований.

Автор выражает глубокую **благодарность** к.г.н. В.М. Домышевой за научное руководство, д.г.н. Т.В. Ходжер, д.г.н. И.Б. Мизандронцеву, д.б.н. Н.А. Бондаренко, к.б.н. О.И. Белых, к.б.н. Г.В. Помазкиной, сотрудникам лаборатории гидрохимии и химии атмосферы ЛИН СО РАН за содействие в выполнении исследований и помощь при оформлении диссертационной работы, коллегам из Института Оптики атмосферы СО РАН им. В.Е. Зуева д.ф.-м.н. М.В. Панченко и к.т.н. Д.А. Пестунову за оказанную помощь при выполнении работ и обсуждении результатов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы, выдвинута основная цель работы и поставлены задачи, оценена новизна и практическая значимость исследований, сформулированы основные защищаемые положения.

В **первой главе** рассмотрена история изучения суточной динамики содержания кислорода, углекислого газа и величины рН в воде Байкала. Обсуждены выявленные ранее закономерности временных изменений концентрации растворенных газов и биогенных элементов, отмечено, что исследование динамики биогенных элементов привело к выводу об отсутствии суточного хода их содержания. Описаны особенности литоральной зоны водоема. Под литоральной зоной понимают прибрежную часть водоема, простирающуюся от уреза воды до нижней границы распространения высших водных растений, включая как дно водоема, так и собственно водную массу,

расположенную над ним. Литораль, больше чем другие зоны озера, испытывает динамическое воздействие водных масс, отражающееся на протекании химических, физических и биологических процессов в водоеме. Здесь создаются особые температурные условия, характеризующиеся большой амплитудой суточных и сезонных колебаний температуры воды. Данная зона не испытывает недостатка в инсоляции и отличается от пелагиали более высокими количественными характеристиками фитопланктона, присутствием фитобентоса, макрофитов, высшей водной растительности и, как следствие, высокой интенсивностью продукционно-деструкционных процессов.

Рассмотрен процесс газообмена и описаны различные методы расчета потока газов в системе вода – атмосфера, в том числе и на озере Байкал.

Во **второй главе** дана краткая физико-географическая характеристика района исследования, представлена карта-схема. Измерения проводились на территории Прибайкальского национального парка на западном побережье Южного Байкала в районе пос. Большие Коты. Район исследований с малой плотностью населения и отсутствием автотранспорта может рассматриваться, как фоновый, что подтверждается данными серий измерений аэрозольно-газовых характеристик атмосферы (Ходжер, 1996). Характерное вдольбереговое циркуляционное течение в Байкале со скоростью 0,6-0,7 м/с в период открытой воды (Верболов, 1977) позволяет допустить, что результаты измерений, полученные в месте исследования, регистрируют обобщенную картину для достаточно обширной по протяженности территории литорали озера (Мизандронцев, 2002).

Исходя из целей исследования, была определена методика гидрохимических работ. Во всех наблюдениях длительностью 10-14 дней каждые 3 часа проводилось измерение величины рН, содержания кислорода, углекислого газа, гидрокарбонатов, нитратов, фосфатов и кремния, а также непрерывно фиксировались метеорологические параметры. Описан контроль качества полученных данных, который соответствует требованиям, предъявляемым аккредитованным в СААЛ лабораториям. За период

исследований с 2003 г. по 2011 г. в разные сезоны (табл. 1) отобрано около 2 тыс. проб, выполнено около 14 тыс. анализов.

Таблица 1

Список измерительных циклов

Год	Месяц	Год	Месяц	Год	Месяц
2003	VIII, X	2006	II, VII, XII	2009	II, VI, IX, XII
2004	III, VI, IX	2007	II, VI, VIII, XII	2010	III -VII, IX-XII
2005	III, V, VIII, XII	2008	II, VI, VIII, XII	2011	IV, V

Третья глава посвящена исследованию временной динамики содержания растворенных газов и биогенных элементов в воде литорали озера Байкал. Подробно рассмотрена их суточная, сезонная и межгодовая динамика.

Анализ данных показал, что за период измерений с 2003 г. содержание кислорода в воде литорали Байкала изменялось от 9,2 до 16,5 мг/дм³, что сопоставимо с результатами ранее проведенных исследований (Вотинцев, 1961). Суточная динамика содержания растворенного O₂ наблюдается во все сезоны года. Снижение концентрации кислорода в течение суток регистрируется в утренние часы, рост его содержания в послеполуденное время (рис.1).

По данным наблюдений содержание углекислого газа в воде литорали изменялось от 0,07 до 3,15 мг/дм³. Изменения величины рН, концентрации углекислого газа (рис. 1) в воде литорали оз. Байкал имеют хорошо выраженный суточный ритм. На вторую половину дня приходится максимум рН и минимум концентрации углекислого газа, в ранние утренние часы величина рН минимальна, а содержание СО₂ максимально.

Концентрация нитратов в воде литорали озера в период исследований изменялась в пределах 0,01-0,48 мг/дм³, фосфатов - 0,001-0,058 мг/дм³, кремния - 0,29-0,95 мг/дм³. Впервые показано наличие суточного хода содержания биогенных элементов. Концентрация нитратов и фосфатов имеет четкий суточный ритм во все сезоны года, содержание кремния – в периоды развития диатомовых водорослей (рис. 2).

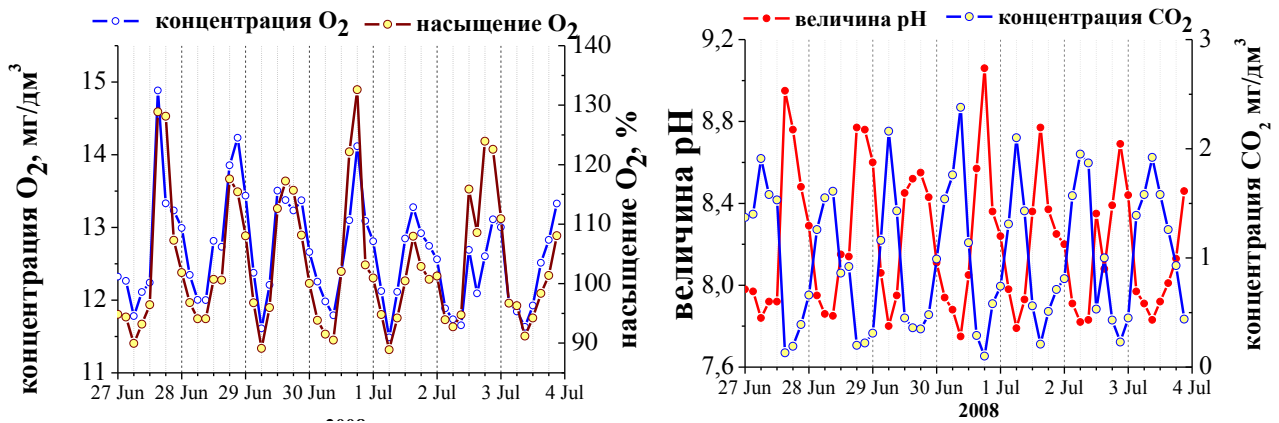


Рис. 1. Суточная изменчивость концентрации и насыщения кислорода, углекислого газа и величины рН в июне-июле 2008 г.

Главным фактором, определяющим суточные колебания концентрации биогенных элементов и растворенных в воде газов, служат процессы фотосинтеза и деструкции органического вещества. Результаты наблюдений убедительно доказывают, что в суточной динамике преобладающим является биологический фактор (рис. 3).

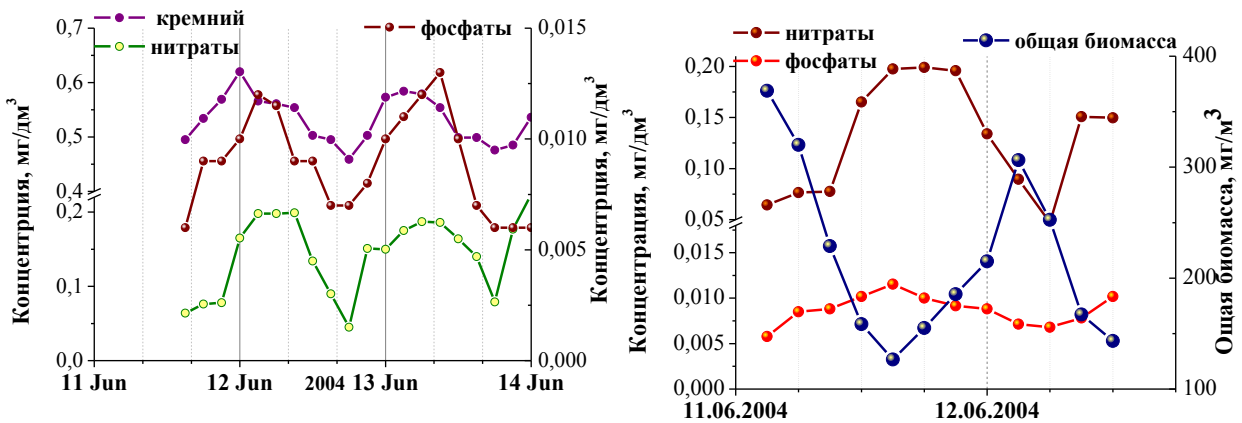


Рис. 2. Суточная изменчивость концентрации фосфатов, нитратов и кремния в июне 2004 г.

Рис. 3. Суточная изменчивость концентрации фосфатов, нитратов и общей биомассы фитопланктона в июне 2004 г.

При рассмотрении сезонной динамики исследуемых компонентов обсуждено разбиение на сезоны как по биологическим (Кожов, 1962), так и по гидрологическим признакам (Шимараев, 1977). Гидрологические и биологические ритмы коррелированы между собой, но имеют свой внутренний сезонный ход и межгодовую изменчивость. Это определяет условность разбиения данных наблюдений по сезонам. В январе на Южном Байкале, как

правило, устанавливается ледовый покров с толщиной льда в месте исследования 60 - 110 см и глубиной снежного покрова, не превышающей 20 см. В подледный период (февраль – начало апреля) концентрация кислорода варьировала в интервале 13-15 мг/дм³, насыщение воды O₂ составляло 97-110%.

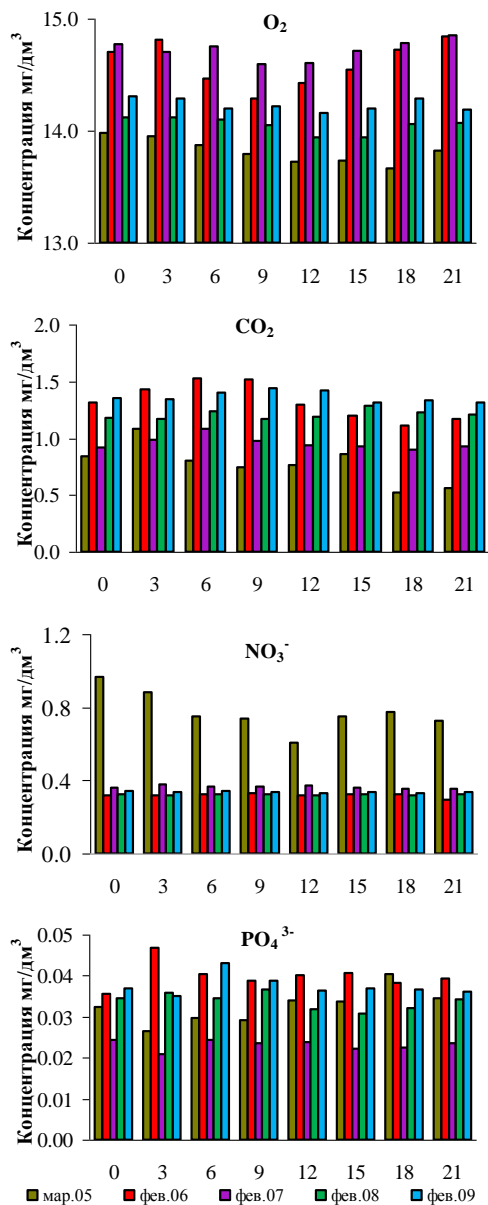


Рис. 4. Среднесуточный ход концентраций кислорода, нитратов, углекислого газа, и фосфатов в подледный

Содержание CO₂ изменялось в пределах 0,12 - 2,33 мг/дм³, NO₃⁻ 0,24-0,41 мг/дм³, PO₄³⁻ - от 0,024 до 0,058 мг/дм³, Si - от 0,47 до 0,85 мг/дм³.

Содержание кислорода и насыщение им воды повышалось, а углекислого газа снижалось по сравнению с предледоставным периодом. Ледовый покров препятствует газообмену с атмосферой, следовательно, к таким изменениям в концентрации растворенных газов в зимний период мог, вероятнее всего, привести начавший процесс фотосинтеза подледного фитопланктона. В феврале амплитуда суточных изменений концентрации O₂, CO₂ и NO₃⁻ в поверхностной воде небольшая. Изменения содержания PO₄³⁻ и Si в течение суток незначительны (рис. 4). Активное таяние снежного покрова, льда озера и поступление в лунку для отбора проб талой воды в марте 2005 г. отразилось на содержании исследуемых компонентов и привело к искажению их суточного хода.

Весенний период, начинающийся со вскрытием льда в мае и продолжающийся до конца июня, совпадает со временем годового максимума солнечной радиации. Быстрый прогрев поверхностных вод, завершение вегетации подледного комплекса диатомовых и развитие других видов водорослей, определяет

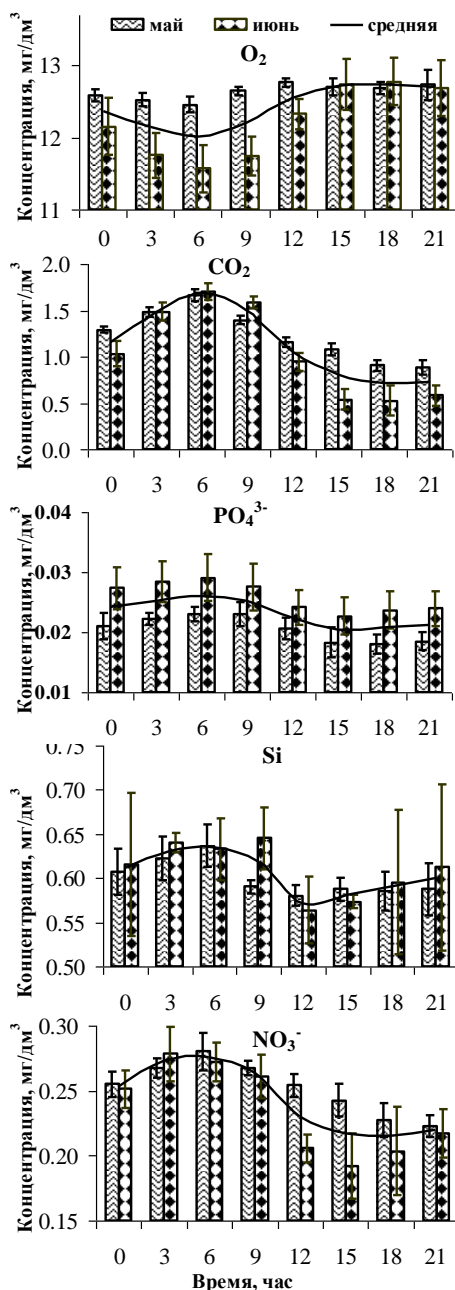


Рис. 5. Среднесуточный ход концентрации кислорода, углекислого газа, нитратов, фосфатов и кремния в весенний период

концентрации кислорода, углекислого газа, нитратов, фосфатов и кремния в весенний период

динамику концентраций растворенных газов и биогенных элементов внутри этого сезона. Среднесуточное содержание кислорода в поверхностной воде максимально в мае и снижается к июню (май - 12,64 мг/дм³, июнь - 12,33 мг/дм³), величина амплитуды суточных изменений O₂ возрастает от мая к июню в 4 раза (рис. 5).

Среднесуточная концентрация CO₂ также постепенно снижается от мая (1,23 мг/дм³) к июню (1,05 мг/дм³), NO₃⁻ - от 0,25 мг/дм³ до 0,22 мг/дм³, а величина амплитуды их суточных изменений возрастает в 1,5 раза. Изменение концентрации фосфатов и величины их амплитуд в течение суток аналогично динамике содержания нитратов в этот период. Завершение вегетации подледного комплекса диатомовых водорослей обеспечивает выраженный суточный ход кремния весной. Время наступления экстремумов содержания исследуемых компонентов 3-6 и 18-21 час.

Летний период на Байкале длится с июля до середины сентября. Для этого времени характерны максимальный прогрев воды и разнообразие видового состава водорослей (пик в их развитии в конце июля – августе, в

основном, за счет пикопланктонных водорослей) (Помазкина, 2010), что обуславливает значительные изменения в содержании биогенных элементов и растворенных газов. Летом минимум абсолютных концентраций O₂ приходится на август, насыщение им воды максимально в июле и снижается к сентябрю. Содержание CO₂ уменьшается от июля к августу и возрастает в начале

сентября. Суточный ход O_2 и CO_2 в поверхностном слое воды отчетливо выражен (рис. 6). Размах концентрации O_2 за сутки составляет 0,4-0,8 мг/дм³, концентрации CO_2 – 0,3-0,8 мг/дм³. Время наступления экстремумов

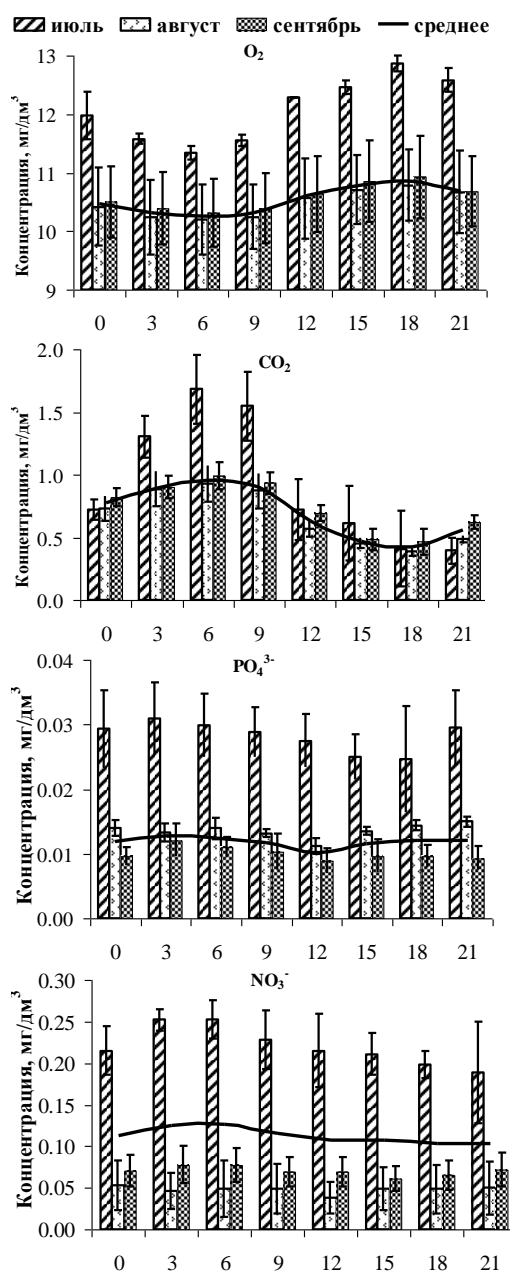


Рис. 6. Среднесуточный ход концентрации кислорода, углекислого газа, нитратов и фосфатов в поверхностной

за счет минерализации их из детрита. Суточная динамика содержания NO_3^- и PO_4^{3-} в августе и начале сентября выражена слабо, лишь в отдельные дни отмечены закономерные суточные изменения, но различия между

концентрации 3-6 и 15-18 часов.

Суточные колебания концентрации O_2 и CO_2 , обусловлены единым механизмом, главным образом, биологическим фактором (рис. 7). Выявлено, что в течение суток происходит не только количественное изменение фитопланктона, но и существенная перестройка его фотосинтетической активности. Как видно из данных, представленных на рис. 7, активное поглощение CO_2 водорослями приводит к тому, что его поток из атмосферы не успевает компенсировать его расход, содержание CO_2 в верхнем слое воды значительно снижается и вынуждает фитопланктон снизить свою фотосинтетическую активность.

Содержание биогенных элементов от июля к августу уменьшается (рис. 6), возможно даже их полное поглощение фитопланктоном и фитобентосом. В свою очередь, низкие концентрации биогенных элементов также ограничивают дальнейшее развитие водорослей. К середине сентября количество нитратов и фосфатов возрастает

максимальными и минимальными значениями по критерию Стьюдента значимы с вероятностью не менее 95%.

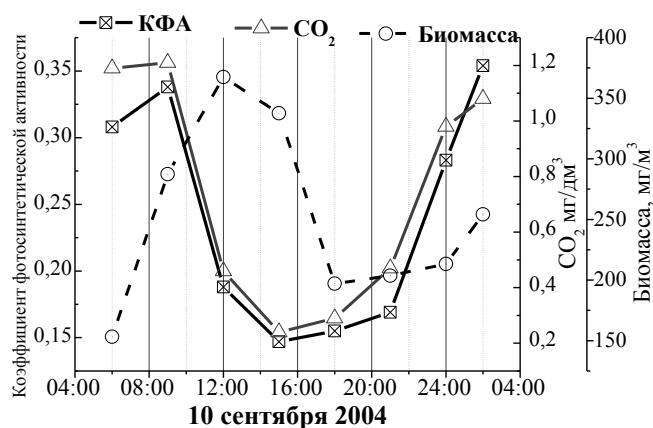


Рис. 7. Суточный ход концентрации CO₂, коэффициента фотосинтетической активности и биомассы водорослей, сентябрь 2004 г.

К осени относится период со второй половины сентября по декабрь включительно. В сентябре и октябре происходит значительное снижение температуры, завершается вегетация летнего комплекса водорослей, но видовой состав их еще весьма разнообразен, в ноябре и декабре в незначительном количестве развивается осенний диатомовый фитопланктон (Бондаренко, 2009).

Снижение активности процесса фотосинтеза осенью могло бы привести к уменьшению концентрации кислорода, но рост растворимости газов при охлаждении воды обуславливает увеличение его содержания от месяца к месяцу. Рост содержания CO₂, NO₃⁻, PO₄³⁻, и Si и снижение насыщения воды O₂ обусловлено двумя процессами. Во-первых, осенью (в конце октября - ноябре) в пелагиали происходит подъем глубинных обогащенных биогенными элементами вод, которые внедряются в литораль в условиях активного ветрового перемешивания. Во-вторых, несмотря на низкую температуру воды, происходит минерализация органического вещества, продуцированного летом.

В декабре перед становлением льда среднесуточное содержание всех исследуемых компонентов максимально: NO₃⁻ - до 0,38 мг/дм³, PO₄³⁻ - до 0,038 мг/дм³, CO₂ - до 1,57 мг/дм³. В результате снижения температуры воды (2,5–0,5°C) абсолютные концентрации O₂ возрастают до 12,11 мг/дм³, насыщение им воды снижается (около 90%). Суточный ход, как растворенных газов, так и биогенных элементов прослеживается на протяжении всего осеннего периода, амплитуды их суточных изменений уменьшаются от сентября к декабрю. Время

наступления экстремальных значений концентраций сдвигается к концу осени на 9 и 15 часов, что связано с сезонным сокращением продолжительности инсоляции.

Сезонную изменчивость суточного хода отчетливо видно при анализе нормированных значений концентраций исследуемых компонентов (каждое измеренное внутри данных суток значение нормируется на соответствующее среднесуточное значение и усредняется за сезон). Анализ нормированных данных показал, что весной размах суточного хода биогенных элементов и растворенных газов максимальный и составляет 10% для O_2 , 106% для CO_2 , 38% для NO_3^- и 24% для PO_4^{3-} . Минимальный размах наблюдается в зимний (подледный) период: до 1% для кислорода, 12% для CO_2 , 3% для NO_3^- и около 8% для PO_4^{3-} . Суточный ход концентрации Si отчетливо выражен только в весенний период и амплитуда его изменений составляет 11% от среднесуточного значения. Отметим, что низкие концентрации нитратов и фосфатов в литорали в летний период при нормировке на среднесуточное значение дают достаточно большой разброс значений до 20%, иногда и более. Влияние перемешивания вод при волнении, а особенно принос вод с пелагиали озера при низких концентрациях NO_3^- и PO_4^{3-} обуславливает хаотичное изменение суточного хода в отдельные летние дни.

Вертикальное распределение концентрации биогенных элементов и растворенных газов в литоральной зоне неоднородно. Основным фактором неоднородности является неравномерное распределение водорослей по глубине, важную роль также играют интенсивность инсоляции и волнение водной поверхности, ледовый покров. Суточный ход концентрации CO_2 , O_2 , NO_3^- и PO_4^{3-} в литорали прослеживается четко на всех глубинах, включая придонные слои озера.

Внутригодовой ход содержания биогенных элементов (по среднемесячным значениям) характеризуется максимумом в декабре, что связано с поступлением вод с пелагиали, где уже произошел подъем глубинных вод Байкала, а также с минерализацией органического вещества (рис. 8). Минимум концентраций биогенных элементов отмечается в августе. Обратим

внимание, что, если изменение содержания O_2 и CO_2 в течение суток противоположно, то годовой ход их концентрации одинаков, что обусловлено изменением растворимости газов с изменением температуры.

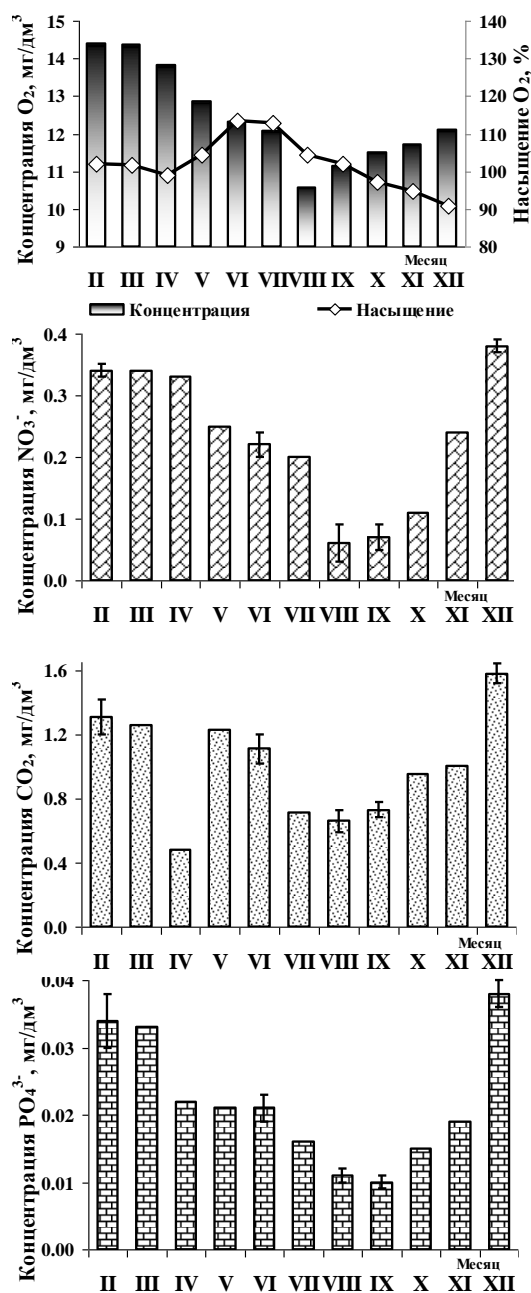


Рис. 8. Ход среднемесячных значений концентраций O_2 , NO_3^- , CO_2 , и PO_4^{3-} в поверхностной воде литорали оз. Байкал

Для кислорода максимум содержания регистрируется в феврале - марте в период подледного развития водорослей. Насыщение им воды возрастает от февраля к июню, затем происходит его снижение к декабрю.

В отличие от годовой динамики концентрации биогенных элементов и растворенных газов в пелагиали (Вотинцев, 1961), в литорали озера отсутствует второй максимум содержания этих компонентов в июле. Июльский пик в пелагиали (Вотинцев, 1961), обусловлен завершением вегетации подледного комплекса и не начавшимся еще развитием летних видов водорослей. В литорали активное развитие бентосных и планктонных водорослей (Бондаренко, 2009) приводит к интенсивному потреблению биогенных элементов и углекислого газа, а рост температуры воды вызывает снижение концентрации растворенных газов в июле.

Очевидно, что комплекс взаимодействующих погодных, биологических и гидрологических факторов, определяющих внутригодовой ход содержания биогенных элементов и растворенных газов в воде литорали, должен

испытывать и определенные межгодовые изменения. Анализ межгодовой динамики по нормированным на среднесуточное значение величинам

концентраций (рис. 9) показывает, что в каждый из месяцев величина суточных изменений больше межгодовых различий суточного хода.

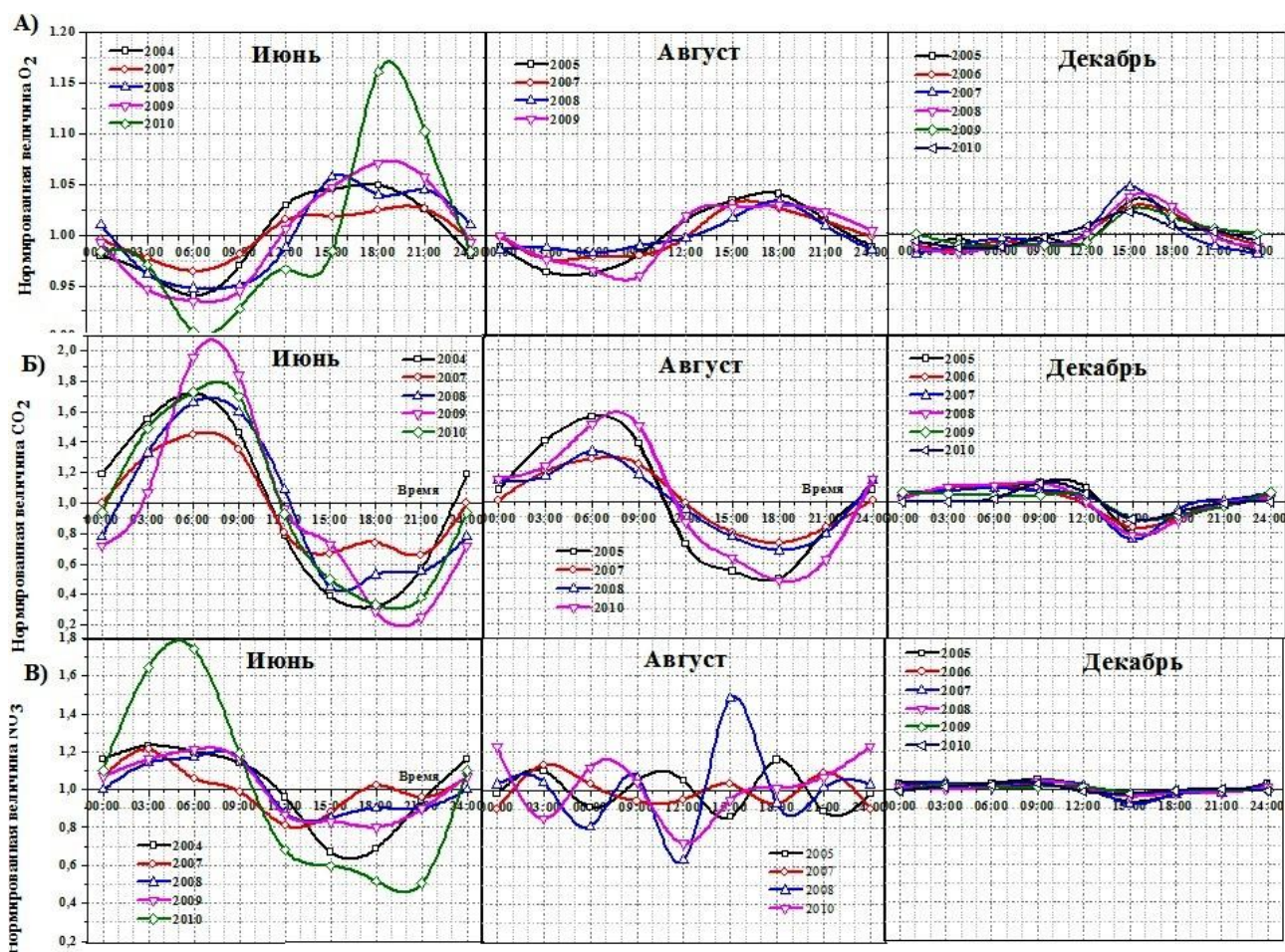


Рис. 9. Суточная динамика нормированных величин содержания кислорода (А), углекислого газа (Б) и нитратов (В) в разные месяцы

Межгодовая изменчивость не сказывается на характерных особенностях суточного хода, присущего данному периоду. Так, например, для максимальной амплитуды суточного хода CO_2 в июне среднеголетнее значение – 1,4, среднеквадратичное отклонение - 0,39, в августе среднеголетнее значение - 0,86 и среднеквадратичное отклонение – 0,28. Сделанные по критерию Стьюдента оценки показывают, что вероятность различия этих характеристик в сравнительно близкие по времени сезоны превышает 95%. Отсутствие значимых различий в суточном ходе разных лет служит определенным подтверждением устойчивости и воспроизводимости исследуемых процессов. Этот факт дает возможность заключить, что внутригодовой ход изменения концентраций биогенных элементов и растворенных газов в поверхностной воде превалирует над наблюдаемыми межгодовыми различиями.

В четвертой главе обсуждаются внешние факторы, влияющие на изменчивость химического состава поверхностной воды.

Показано, что внедрение вод с пелагиали озера, а также ветровое перемешивание приводят к временному искажению суточных ритмов биогенных элементов и растворенных газов в поверхностной воде литорали (рис. 10). Сбой суточного ритма наблюдается в дневное время, когда верхний слой воды литорали обеднен NO_3^- , PO_4^{3-} и CO_2 , и обогащен O_2 по сравнению с водой пелагиали озера.

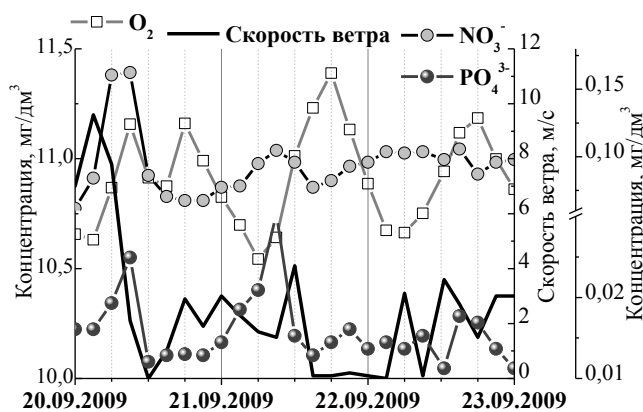


Рис. 10. Изменение скорости ветра и содержания растворенного кислорода, углекислого газа, фосфатов и нитратов в поверхностной воде в сентябре 2009 г.

Выпадение атмосферных осадков влияет на химический состав поверхностной воды. На основе натурных измерений выявлено, что при выпадении на водную поверхность озера значительного количества дождевой воды с величиной рН 5,6 ед. и ниже (Нецветаева, 2004), в результате сдвига карбонатного равновесия в тонком поверхностном слое воды озера происходит достаточно быстрое увеличение концентрации CO_2 . Так, в июне 2004 г. весь период измерений наблюдался четкий ритм суточного хода всех исследуемых компонентов в поверхностной воде. Выпадение осадков в ночь с 13 на 14 июня, совпало с естественным суточным ростом концентрации CO_2 , заметно не повлияло на его содержание в воде, но сдвинуло время экстремума. Поток CO_2 в атмосферу в это время возрос в несколько раз.

Подобное воздействие оказывает и выпадение снега. Снегопад в октябре 2003 г. увеличил содержание CO_2 в воде от 2 до 4,5 мг/дм³ и изменил амплитуду его суточных колебаний (рис. 11). Заметно увеличилась средняя концентрация CO_2 в приводном слое атмосферы и более сильно в полупогруженной камере, которая используется для измерения потоков газа

между поверхность воды и атмосферой (рис.12) (Домышева, 2004; Домышева, 2007).

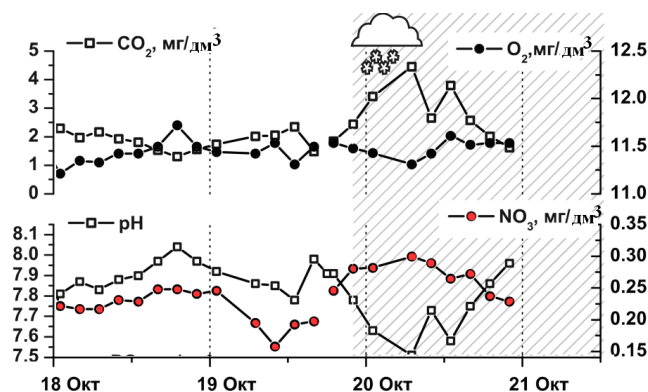


Рис. 11. Временной ход концентрации CO_2 , O_2 , NO_3^- , pH в поверхностной воде, октябрь 2003 г. (период осадков заштрихован)

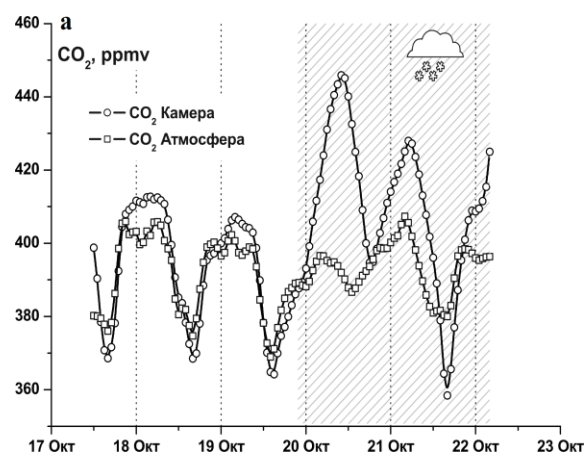


Рис. 12. Временной ход концентрации CO_2 в приводной атмосфере и в камере, октябрь 2003 г. (период осадков заштрихован)

Атмосферные осадки оказывают влияние и на содержание в воде озера нитратов. Содержание NO_3^- в дождевой и снеговой воде значительно выше их концентраций в поверхностной воде Байкала. Экспериментальные данные показали, что с началом выпадения осадков наблюдается постепенный рост концентрации нитратов в поверхностной воде, после их окончания содержание возвращается к исходным значениям. Так, в декабре 2005 г. содержание нитратов в воде озера во время снегопада возросло в 3 раза и составило $1,2 \text{ мг/дм}^3$. Вносимые с осадками другие биогенные элементы не оказывали значительного воздействия на химический состав поверхностной воды, ввиду незначительных различий их концентраций в воде озера и осадках. Отметим, что при кратковременных осадках, особенно выпадающих в дневное время, происходят сбой суточного хода растворенных газов и биогенных элементов.

Степень воздействия осадков на изменение содержания CO_2 и NO_3^- в воде озера и глубина их проникновения зависит как от их интенсивности, так и от химического состава осадков. Вертикальное распределение величины pH характеризуется уменьшением ее значения с глубиной. Выпадение дождя утром 2 августа 2006 г. привело к снижению величины pH в слое 0-50 см, pH в придонном слое (1,1 м) в 6 часов была больше, чем в вышележащих слоях (рис.

13). Усиление дождя в послеобеденное время также изменило вертикальное распределение рН: в 15 часов минимальные значения отмечены в верхнем 20-сантиметровом слое.

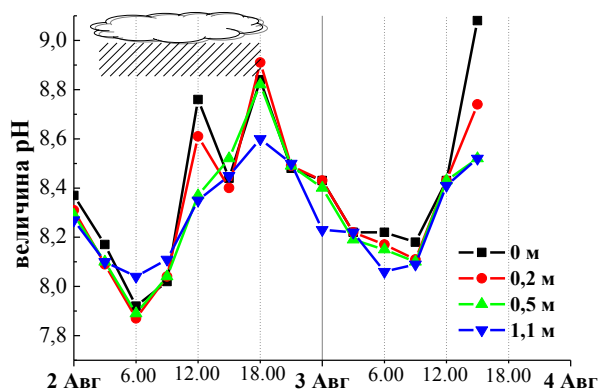


Рис. 13. Суточная динамика величины рН в поверхностной воде оз. Байкал на разных горизонтах, август 2006 г.

Очевидно, что при длительных осадках сход дождевых вод с берегов, а также увеличение стока рек может оказать ощутимое влияние на химический состав воды литорали озера. За период наблюдений такое воздействие ярко проявилось в июне 2008 г. Продолжительные не характерные для этого месяца ливневые дожди (149 мм) увеличили сток впадающего в озеро в 100 м от места исследования ручья. Более теплая вода ручья распространилась по поверхности озера, что привело к снижению содержания гидрокарбонатов (на 10-15%), росту нитратов (на 10-15%) и кремния (в 2 раза) в поверхностной воде озера, но не отразилось на их суточных ритмах: их суточный ход был отчетливо выражен, а амплитуда суточных изменений высока. В обычных условиях сток ручья не влиял на химический состав воды литорали.

Пятая глава посвящена исследованию парциального давления углекислого газа в приводной атмосфере, а также разности парциальных давлений углекислого газа в воде и атмосфере, с целью оценки направления потока CO_2 .

Впервые изучены основные ритмы изменчивости суточного и сезонного хода содержания CO_2 в приводном слое атмосферы над озером Байкал. Содержание CO_2 в атмосфере над литоралью озера подвержено суточной динамике, которая преимущественно обусловлена жизнедеятельностью наземной растительности. На суточные вариации содержания углекислого газа в районе исследований влияет и направление ветра. В штилевых и близких к штилевым условиям основное влияние оказывает прилегающая береговая

растительность, при смене синоптической обстановки и ветре, приносящем воздушные массы с акватории озера (северо-западное и юго-западное направление), отмечалось снижение парциального давления CO_2 в атмосфере на 20-40 мкатм. Сезонные же вариации изменения концентрации атмосферного CO_2 в течение года вполне сопоставимы с данными наблюдений на станциях в Сибири (Аршинов и др. 2009), и обусловлены сезонными ритмами мощности источников и стоков углекислого газа. Внутригодовой ход концентрации углекислого газа в приводной атмосфере характеризуется максимумом в декабре, в период минимальной вегетационной активности (рис. 14), и минимумом в июле – августе, в пик фотосинтеза растительности. Максимальные амплитуды суточного хода отмечены в августе (до 50 мкатм), минимальные - в зимний период (не более 2-3 мкатм).

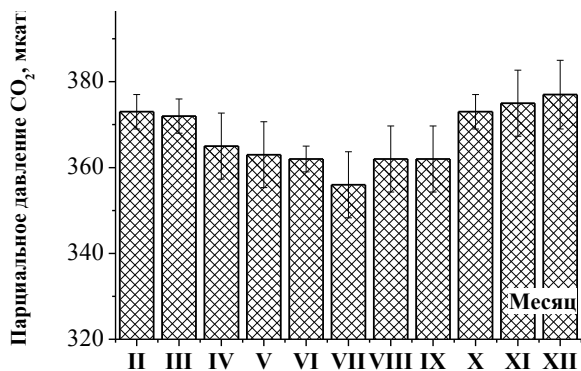


Рис. 14. Средний годовой ход парциального давления углекислого газа в атмосфере и воде литорали озера (2004-2010 гг.)

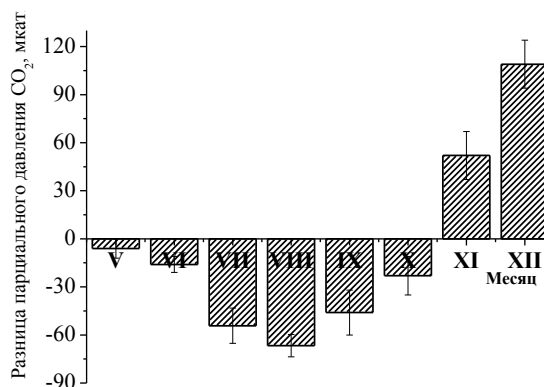


Рис. 15. Средний ход разницы парциальных давлений углекислого газа в воде и атмосфере в период открытой воды (2004-2010 гг.)

Парциальное давление углекислого газа в воде, рассчитано по данным гидрохимических измерений. Суточный ход величины разности парциальных давлений углекислого газа между водой и атмосферой (ΔP_{CO_2}) с минимумом в вечернее время и максимумом в утренние часы в открытой литорали озера наблюдается в течение всего периода открытой воды. Сезонное изменение амплитуды суточных вариаций, а также время наступления экстремумов ΔP_{CO_2} практически аналогично таковым для концентрации углекислого газа. Максимум величины ΔP_{CO_2} приходится на декабрь (рис. 15), что свидетельствует о максимальном выходе CO_2 углекислого газа в атмосферу,

минимум значения ΔP_{CO_2} - на август, что соответствует максимальному поглощению CO_2 водной поверхностью литорали озера. Как видно из рис. 15, в большую часть периода открытой воды поток CO_2 направлен из атмосферы на водную поверхность литорали. Отсюда можно заключить, что в период открытой воды в литоральной зоне Южного Байкала поглощение CO_2 водной поверхностью преобладает над его выходом в атмосферу. Этот вывод хорошо согласуется с данными прямых измерений потоков (Пестунов, 2010).

Специально проведенный эксперимент по синхронному наблюдению в литорали и пелагиали озера позволил выявить, что в воде пелагиали содержание нитратов в 1,5 раза, фосфатов в 3 раза меньше, чем в литорали озера. Среднесуточные значения концентрации CO_2 для литорали составили $0,62 \text{ мг/дм}^3$, для пелагиали – $0,52 \text{ мг/дм}^3$. Суточный размах колебания концентрации CO_2 в литорали в 2 раза больше, чем в пелагиали, и, в среднем, превышает величину $0,3 \text{ мг/дм}^3$. Средние значения парциального давления углекислого газа в придном слое атмосферы в литорали и пелагиали достаточно близки, но в прибрежной зоне ΔP_{CO_2} имеет как отрицательное, так и положительное значения и среднесуточная величина равна минус 86 мкатм. В пелагиали же ΔP_{CO_2} практически постоянна (минус 143 мкатм), что свидетельствует о том, что поглощение CO_2 водной поверхностью происходит круглосуточно. Эксперимент показал, что величина среднего потока CO_2 из атмосферы на водную поверхность пелагиали озера составила 326 мг/м^2 в сутки, что практически в 3 раза больше, чем в литорали (95 мг/м^2 в сутки).

Выводы

1. Впервые показано, что в воде открытой литорали Байкала содержание всех биогенных элементов имеет суточный ход. Максимальные амплитуды суточных ритмов всех исследуемых компонентов характерны для весны, в частности CO_2 - 106%, нитраты - 38% от среднесуточного значения, минимальные - для подледного периода CO_2 - 12%, нитраты - 3% от среднесуточного значения.

2. Амплитуда суточных изменений концентрации биогенных элементов и растворенных газов выше межгодовых вариаций суточного хода для каждого из сезонов.

3. Ветровое перемешивание и внедрение вод с пелагиали озера оказывает существенное влияние на суточные ритмы биогенных элементов и растворенных газов в открытой литорали.

4. Внутригодовой ход среднемесячных значений содержания биогенных элементов в воде открытой литорали Байкала, в отличие от пелагиали, характеризуется наличием одного максимума в предледоставный период, для растворенного кислорода в подледный период.

5. Экспериментально показано, что выпадение атмосферных осадков, имеющих химический состав, отличный от воды Байкала, приводит к сбою суточных ритмов химических компонентов, особенно в дневное время, кратковременно увеличивает содержание нитратов, но наиболее ярко проявляется в увеличении потока концентрации углекислого газа в атмосферу.

6. В период длительных дождевых осадков склоновый сток вносит ощутимые изменения в химический состав воды литорали, которые проявляются в уменьшении содержания гидрокарбонатов, увеличении концентрации кремния и нитратов, но не влияет на суточные ритмы биогенных элементов и растворенных газов.

7. Впервые на основе гидрохимических характеристик и с учетом измеренного *in situ* парциального давления CO_2 в атмосфере оценено преимущественное направление потока углекислого газа через водную поверхность в литоральной зоне Байкала. Выделение углекислого газа в атмосферу происходит в ноябре и декабре, поглощение из атмосферы – с мая по октябрь.

8. Выявлено, что в летний период в открытой литорали озера Байкал интенсивность поглощения углекислого газа из атмосферы в 3 раза меньше, чем в пелагиали.

Основные публикации по теме диссертации

1. Домышева В.М. Влияние атмосферных осадков на процесс газообмена CO_2 с водной поверхностью озера Байкал / В.М. Домышева, М.В. Панченко, Д.А. Пестунов, М.В. Сакирко // ДАН. – 2007. – Т. 414. - №5. – С. 690-693.
2. Заворуев В.В. Суточный ход газообмена CO_2 и интенсивности фотосинтеза в поверхностной воде озера Байкал / В.В. Заворуев, М.В. Панченко, В.М. Домышева, М.В. Сакирко, О.И. Белых, Г.И. Поповская // ДАН. – 2007. – Т. 413. - №3. – С. 403-407.
3. Панченко М.В. Экспериментальные исследования процессов газообмена CO_2 в системе «атмосфера - водная поверхность» оз. Байкал (постановка эксперимента) / М.В. Панченко, В.М. Домышева, Д.А. Пестунов, М.В. Сакирко, В.В. Заворуев, А.Л. Новицкий // Оптика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 20. – № 5. – С. 448-452.
4. Заворуев В.В. Пространственное распределение флуоресцентных характеристик фитопланктона в период формирования весенней гомотермии в оз. Байкал / В.В. Заворуев, В.М. Домышева, М.Н. Шимараев, М.В. Сакирко, Д.А. Пестунов, М.В. Панченко // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 21. – № 5. С. 377-380.
5. Сакирко М.В. Суточные ритмы концентрации диоксида углерода в приземном слое воздуха и в поверхностной воде оз. Байкал в разные гидрологические сезоны / М.В. Сакирко, [и др.] // Метеорология и гидрология. – 2008. – № 2. – С. 79-86.
6. Сакирко М.В. К оценке пространственной изменчивости направления потоков углекислого газа в разные гидрологические сезоны на озере Байкал / М.В. Сакирко, [и др.] // Оптика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 22. – № 6. – С. 596-699.
7. Помазкина Г.В. Структура и динамика фитопланктона в Южном Байкале (Россия) / Г.В. Помазкина, О.И. Белых, В.М. Домышева, М.В. Сакирко, Р.Ю. Гнатовский // Альгология. – 2010. – Т. 20. – № 1. – С. 56-72.
8. Домышева В.М. Экспериментальная оценка стока углекислого газа в системе атмосфера-вода в литорали и пелагиали озера Байкал / В.М. Домышева, М.В. Сакирко, Д.А. Пестунов, М.В. Панченко // ДАН. – 2010. – Т. 431. – № 6. – С. 822-826.
9. Домышева В.М. Сезонный ход процесса газообмена CO_2 в системе «атмосфера вода» в литорали Южного Байкала. 1. Гидрологическая весна. / В.М. Домышева, М.В. Сакирко, Д.А. Пестунов, М.В. Панченко // Оптика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 23. – № 12. – С. 1067-1074.

10. Домышева В.М. Сезонный ход процесса газообмена CO_2 в системе "атмосфера - вода" в литорали Южного Байкала. 2. Гидрологическое лето / В.М. Домышева, М.В. Сакирко, Д.А. Пестунов, М.В. Панченко // Оптика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 24. – № 9. – С. 737-742.