

На правах рукописи



Сизова Людмила Николаевна

**ВЛИЯНИЕ КРУПНОМАСШТАБНОЙ АТМОСФЕРНОЙ  
ЦИРКУЛЯЦИИ НА ЭЛЕМЕНТЫ ЛЕДОВО-ТЕРМИЧЕСКОГО  
И ВОДНОГО РЕЖИМА ОЗЕРА БАЙКАЛ**

Специальность 25.00.27 - гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Москва - 2017 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук

***Научный руководитель***

доктор географических наук,  
главный научный сотрудник  
Шимараев Михаил Николаевич

***Официальные оппоненты:***

доктор географических наук, профессор  
Эдельштейн Константин Константинович  
Московский государственный университет  
имени М.В. Ломоносова, г. Москва

доктор географических наук,  
профессор  
Гармаев Ендон Жамьянович  
Байкальский институт природопользования  
Сибирского отделения Российской  
академии наук, г. Улан-Удэ

***Ведущая организация:***

Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки Институт  
водных и экологических проблем  
Сибирского отделения Российской  
академии наук, г. Барнаул

Защита состоится 10 ноября 2017 г. в \_\_\_\_\_ часов \_\_\_\_\_ минут на заседании диссертационного совета Д 002.046.04 при Институте географии Российской академии наук по адресу: 119017, г. Москва, Старомонетный переулок, 29.  
Телефон +7495-959-00-32, e-mail: direct@igras.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на интернет-сайте Института географии Российской академии наук: <http://www.igras.ru/defences>

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат географических наук



И.С. Зайцева

## ***Общая характеристика работы***

***Актуальность работы.*** Основной особенностью современных изменений климата является глобальное потепление, усилившееся во второй половине XX столетия. Эти изменения нашли отражение в колебаниях экосистем глубоких озер (Scheffer at al., 2001; O'Reilly at al., 2003; Kumagai at al., 2003; Руховец и др., 2006; Anneville at al., 2007; Goldman at al., 2013; Филатов и др., 2014; O'Reilly at all, 2015).

Байкал - одно из величайших озер нашей планеты, занимающее первое место по объему пресных вод (23 000 км<sup>3</sup>). Озеро и прибрежные территории отличаются уникальным разнообразием флоры и фауны, многие виды эндемичны. С включением озера в список Мирового природного наследия ЮНЕСКО (1996 г.) повысился и его международный статус, в связи, с чем возросла актуальность исследований как всего озера и его экосистемы, так и отдельных характеристик водоема, в том числе элементов ледово-термического и водного режима оз. Байкал.

Изменение гидрологических характеристик оз. Байкал проявляется в колебании ледовых явлений, температуры верхних слоев воды, суммарного речного притока в оз. Байкал, а также отдельных притоков. В свою очередь, ледово-термический и водный режим являются важными факторами, определяющими изменения биологических компонентов экосистемы озера, возможности рационального использования энергетических, биологических, рекреационных ресурсов оз. Байкал. Важной в научном и практическом отношении задачей является выявление связи изменений климатических характеристик и гидрологических процессов с колебаниями крупномасштабной циркуляции атмосферы в Северном полушарии (Hurrell, 1995; Li, Wang, 2003; Tood, Maskau, 2003; Попова, Шмакин, 2006).

Ранее для оз. Байкал рассматривалось влияние отдельных показателей крупномасштабной атмосферной циркуляции только на температуру воздуха зимой и ледовый режим Южного Байкала у п. Листвянка (до 1994-2007 гг.) (Livingstone, 1999; Tood, Maskau, 2003) и на температуру воды (Шимараев, 2007).

Недостаточность знаний о современных изменениях элементов ледово-термического и водного режима оз. Байкал, о влиянии крупномасштабной атмосферной циркуляции Северного полушария (Northern Hemisphere Teleconnection Patterns (Barnston, Livezey, 1987)) на климатические и гидрологические показатели в регионе не только зимой, но и в другие сезоны года определили актуальность постановки работы, цели и задачи исследования.

***Цель диссертационной работы:*** исследовать влияние крупномасштабной атмосферной циркуляции Северного полушария на элементы ледово-термического и водного режима оз. Байкал.

***Задачи исследования:***

- на фоне глобального изменения климата определить изменения элементов ледово-термического и водного режима оз. Байкал в период инструментальных наблюдений;

- проанализировать влияние крупномасштабной атмосферной циркуляции Северного полушария на годовые и сезонные значения метеорологических элементов;

- оценить влияние показателей крупномасштабной атмосферной циркуляции Северного полушария и температуры воздуха на ледовые явления и температуру поверхности воды в месяцы теплого периода;

- выявить особенности влияния физико-географических факторов на формирование стока трех основных притоков в оз. Байкал. Оценить вклад циркуляции атмосферы, температуры воздуха и атмосферных осадков в изменение этих показателей.

**Объект исследований** - озеро Байкал.

**Предмет исследования** - изменения ледово-термического и водного режима оз. Байкал под влиянием крупномасштабной атмосферной циркуляции Северного полушария.

**Фактический материал.** Работа основана на использовании многолетних (1950-2015 гг.) месячных, сезонных и годовых значений температуры воздуха, атмосферных осадков и температуры поверхности воды, сроков замерзания, вскрытия и максимальной толщины льда по данным 8-12 байкальских станций. Величины суммарного речного притока в оз. Байкал и стока рек Селенга (пункт измерений разъезд Мостовой), Баргузин (с. Баргузин), Верхняя Ангара (с. Верхняя Заимка) приняты по данным за 1901-2014 гг. и 1933-2014 гг. При описании изменений крупномасштабной циркуляции атмосферы Северного полушария использовались циркуляционные индексы с 1950 по 2015 гг. Значения индекса сибирского максимума высокого давления (Sh) для этого периода рассчитаны автором.

**Методы исследования.** Анализ влияния крупномасштабной атмосферной циркуляции на элементы ледово-термического и водного режима оз. Байкал выполнен с применением метода пошагового включения предикторов в пакете статистических программ STATISTICA. Определялись коэффициенты парной корреляции ( $r$ ), детерминации ( $R^2$ ) и множественной корреляции ( $R$ ), найдена стандартная ошибка ( $S$ ) - среднеквадратическое отклонение от модели. Тренды во временных рядах выделялись методом наименьших квадратов. Использовалась  $t$ -статистика Стьюдента при 5 % уровне значимости. Определен сравнительный вклад отдельных показателей циркуляции в изменчивость характеристик. По полученным уравнениям множественной линейной регрессии восстановлены ежегодные значения характеристик, которые сопоставлены с данными фактических наблюдений.

**Научная новизна:**

- впервые для оз. Байкал и отдельных его районов проведена оценка влияния крупномасштабной циркуляции атмосферы Северного полушария (Northern Hemisphere Teleconnection Patterns (Barnston, Livezey, 1987)) на элементы ледово-термического и водного режима в 1950 - 2015 гг. в отдельные сезоны и в целом за год;

- показано, что в изменении зимней температуры воздуха, сроков замерзания и максимальной толщины льда в среднем за 1950-2015 гг. вклад SCAND и Sh значительно превосходил вклад АО и NAO. Исключение составляет только период 1970-1995 гг., когда основной вклад вносился АО и NAO. Изменение соотношения между этими показателями во времени явилось причиной цикличности в изменении температуры воздуха и ледовых характеристик;

- впервые показано, что причиной различий в тенденциях изменения стока основных притоков оз. Байкал является разная реакция их водности на потепление из-за различий природных условий в их бассейнах.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Полученные результаты дополняют представления о современном проявлении глобальных изменений климата в Байкальском регионе. Результаты могут быть использованы и при дальнейших исследованиях изменчивости состояния экосистемы озера в современный период и в будущем. Обширные данные, полученные в результате многолетних исследований и приведенные в диссертации, могут служить справочным материалом для многих специалистов. Использование аппарата множественной линейной регрессии для описания связи гидрометеорологических характеристик с механизмами циркуляции атмосферы позволяет воспроизводить межгодовые изменения, тренд и отдельные случаи аномалий этих характеристик. Отдельные из полученных уравнений множественной линейной регрессии (для сроков замерзания, толщины льда) имеют прогностическое значение.

Результаты исследований получены в рамках планов Лимнологического института, при выполнении базовых проектов СО РАН VII.62.1.5. «Физическая лимнология Байкала: воздействие современных изменений климата и потоков газа из донных отложений на пространственно-временную структуру физических характеристик водной толщи», № гос. рег. 01201052122, VIII.76.1.5. «Изменение абиотических и биотических характеристик экосистемы озера Байкал под влиянием природных и антропогенных факторов», № гос. рег. 01201353446, проектов РФФИ № 09-05-0022-а «Реакция Байкала на изменения климата в современный период», № 12-05-31268 мол\_а «Изменчивость гидрологических процессов на Байкале под влиянием климатических воздействий» (руководитель).

**Достоверность полученных результатов** обоснована использованием большого объема исходных гидрометеорологических данных (1950-2015 гг.), применением апробированных методов исследования, сравнением результатов применения уравнений множественной линейной регрессии с данными наблюдений.

**Апробация работы.** Основные результаты исследования докладывались на 18 научных мероприятиях: ежегодной научно-теоретической конференции аспирантов и студентов (Иркутск, 2009); ежегодной международной научно-практической конференции "География: проблемы науки и образования" (Санкт-Петербург, 2010); 3-й всероссийской конференции с международным участием "Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов" (Барнаул, 2010); пятой Верещагинской Байкальской конференции (Иркутск, 2010); 10-й международной научно-практической конференции "Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности" (Санкт-Петербург, 2010); XVII научной конференции молодых географов Сибири и Дальнего Востока "Природа и общество: взгляд из прошлого в будущее" (Иркутск, 2011); XVII международном симпозиуме "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы" (Томск, 2011); XII конференции молодых ученых "Взаимодействие полей и излучения с веществом" (Иркутск, 2011); девятом Сибирском совещании по климатозоологическому мониторингу (Томск, 2011); V международной научной конференции молодых ученых и талантливых студентов "Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность" (Москва, 2011); III Всероссийской научной конференции с

международным участием "Экологический риск и экологическая безопасность" (Иркутск, 2012); Всероссийской конференции "Солнечная активность и природа глобальных и региональных климатических изменений" (Иркутск, 2012); международной конференции "Региональный отклик окружающей среды на глобальные изменения в Северо-Восточной и Центральной Азии" (Иркутск, 2012); международной научно-практической конференции "Социально-экономические и экологические проблемы и перспективы международного сотрудничества России-Китая-Монголии" (Чита, 2012); VII Всероссийском Гидрологическом съезде (Санкт-Петербург, 2013); 9<sup>th</sup> Symposium of European Freshwater Sciences - SEFS 9 (Geneva, 2015); шестой Верещагинской Байкальской конференции (Иркутск, 2015).

**Публикации.** По теме диссертационного исследования опубликована 21 работа, в том числе из списка, рекомендованного ВАК, опубликованы 3 статьи, перечень которых приведен в конце автореферата.

**Личный вклад автора.** Автор принимал непосредственное участие в подготовке и обработке исходных материалов, анализе и обобщении полученных результатов.

В диссертации используются результаты работ, полученные в соавторстве с М.Н. Шимараевым, Л.Н. Куимовой, В.Н. Синюковичем.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

1. Характеристики ледово-термического режима Байкала испытывали в последние 60-70, в отдельных случаях для ледовых явлений, в последние 120 лет, колебания, связанные с вековыми и внутривековыми изменениями характеристик климата.

2. Изменение во времени соотношения между активностью АО, NAO и активностью SCAND, Sh является причиной внутривековых колебаний ледово-термических процессов.

3. Суммарный приток в оз. Байкал и сток основных рек испытывают влияние, как циркуляции атмосферы, так и местных природно-климатических условий. Причиной различий в тенденциях изменения стока основных притоков оз. Байкал является разная реакция их водности на потепление из-за различий орографии, почв, растительности, климата в их бассейнах.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 135 страниц, включая 4 таблицы, 58 рисунков, 147 наименований из списка литературы.

Автор выражает глубокую признательность и искреннюю благодарность за помощь в проведении исследований, обсуждении и анализе полученных результатов: научному руководителю д.г.н. М.Н. Шимараеву, с.н.с. В.Л. Потемкину, к.г.н. В.Н. Синюковичу, к.г.н. Н.Г. Гранину, к.г.н. Е.С. Троицкой, гл. спец. Л.Н. Куимовой, сотрудникам лаборатории гидрологии и гидрофизики, работникам Иркутского и Забайкальского управлений по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

**Во введении** определены актуальность, цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, даны сведения об исходных данных, использованных в работе.

**В первой главе** «Основные физико-географические особенности оз. Байкал» приводится географическое положение, орография, морфометрия, климатические условия региона и гидрологическая характеристика оз. Байкал.

**Во второй главе** «Материалы и методы исследования» приведены исходные материалы (климатическая и гидрологическая информация, показатели крупномасштабной атмосферной циркуляции Северного полушария) и методы (модель множественной линейной регрессии, оценка ее качества и метод наименьших квадратов).

При описании изменений крупномасштабной циркуляции атмосферы использовались циркуляционные индексы Teleconnection Patterns, рассчитанные для периода 1950-2015 гг. в Центре прогнозирования климата Национального управления по исследованию океана и атмосферы США (NOAA) (Национальное управление..., 2016). Эти циркуляционные индексы получены путем разложения по естественным ортогональным функциям колебаний поля геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа (1000 гПа для АО) для внетропической зоны Северного полушария. Они характеризуют ряд циркуляционных мод (механизмов циркуляции) атмосферы (Barnston, Livezey, 1987), широко используемых для изучения крупномасштабной циркуляции и долгосрочного прогноза погоды. Для анализа приняты индексы следующих циркуляционных механизмов: арктическое (АО) и северо-атлантическое (NAO) колебания, восточно-атлантический (EA), восточно-атлантический-западно-российский (EAWR), полярно-евразийский (POL), западно-тихоокеанский (WP), скандинавский (SCAND), тихоокеанско-северо-американский (PNA). Также использован индекс сибирского максимума высокого давления (Sh), рассчитанный автором путем осреднения и стандартизации данных по приземному давлению в период с декабря по февраль в 1950-2015 гг. по данным 7 метеостанций для территории  $40-65^{\circ}$  с.ш.,  $80-120^{\circ}$  в.д.

**В третьей главе** рассмотрены современные изменения климатических и гидрологических характеристик.

Региональные изменения *температуры воздуха* в Восточной Сибири, в том числе в регионе оз. Байкал, в целом отражают положительную тенденцию изменения температуры Северного полушария на протяжении второй половины XIX - начала XXI века (рис. 1). За период наблюдений по данным метеостанции Бабушкин (1896-2015 гг.) годовая температура увеличилась на  $1,4^{\circ}\text{C}$  за 100 лет.

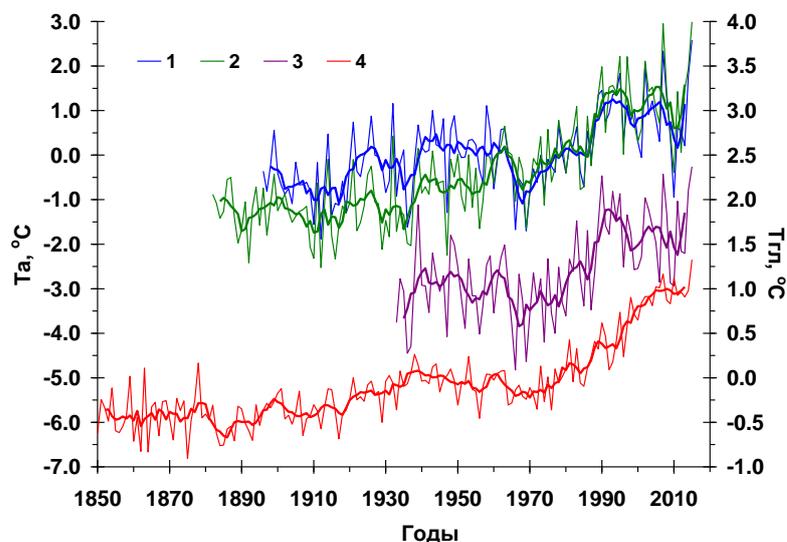


Рис. 1. Годовая температура воздуха на метеостанциях Бабушкин (1), Иркутск (2), Нижнеангарск (3) ( $T_a$ ) и в Северном полушарии ( $T_{гл}$ ) (4) от начала постоянных измерений до 2015 г. Текущие и 5-летние сглаженные значения

Темпы потепления в районе оз. Байкал в 2 раза превосходили темпы роста температуры воздуха Северного полушария (тренд годовых значений которой за последние 100 лет составил  $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), но были ниже, чем над окружающей сушей (в г. Иркутск тренд температуры составил  $2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  за 100 лет), что могло быть следствием значительной тепловой инерции огромной водной массы озера ( $23000\text{ км}^3$ ), влияние которой на окружающее пространство ограничивается пределами горного обрамления озера (Верболов и др., 1965).

Помимо векового тренда особенностью хода температуры Северного полушария и температуры в районе оз. Байкал является ее понижение от 1950-х к началу 1970-х годов и значительное повышение в последующем, которое происходило в целом для полушария до 2015 г. На Байкале рост температуры сменился после 1995 г. ее снижением до 2010 г. Такой характер изменения температуры фиксируется на юге и севере озера (станция Нижнеангарск), а также в г. Иркутске.

Анализ показывает, что в изменении годовой температуры в районе оз. Байкал хорошо выделяются короткие (2-7 лет) и длительные (внутривековые) циклы, продолжительностью около 20 лет, с выраженными фазами повышения и понижения (рис. 1). В XX столетии наблюдаются 2 полных цикла (1912-1936 гг. и 1937-1969 гг.) и фазы двух неполных циклов - понижения с 1896 до 1911 гг. и подъема с 1971 г. до 1995 гг. Фаза подъема в конце столетия отличается от аналогичных фаз в полных циклах аномально большой продолжительностью (около 25 лет) и величиной роста температуры воздуха (на  $2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (Шимараев и др., 2002). В период 1996-2010 гг. тренд температуры воздуха становится отрицательным. В 2011-2015 гг. наметилась тенденция повышения температуры. Несмотря на наблюдаемые тенденции в 2002, 2007 и 2015 гг. отмечались максимальные значения годовой температуры воздуха за весь период наблюдений.

Наибольшее потепление приходилось на зиму и весну (на  $1,8$  и  $1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  за 100 лет), летом и осенью скорость его была меньше ( $1,3$  и  $1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  за 100 лет), тренды температуры достаточно устойчивы - их достоверность превышает 5 % - ный уровень значимости. Внутривековая цикличность проявляется во все сезоны. Вместе с тем близость характеристик циклов (их границы, продолжительность самих циклов и фаз повышения и понижения) отмечается только для годовых, весенних и летних температур. Осенью и зимой циклы менее выражены, границы их не совпадают с циклами, отмеченными для весны и лета.

Наиболее заметное потепление с начала 1970-х до середины 1990-х годов оказалось общим для всех сезонов и месяцев. Потепление в зимние месяцы в этот период, как и в целом за все столетие, внесло наибольший вклад в повышение средней годовой температуры воздуха.

Общей тенденцией изменения *атмосферных осадков* на акваторию оз. Байкал на фоне значительного роста температуры воздуха было увеличение с небольшим положительным трендом, что характерно для всех регионов Сибири (Доклад..., 2011). В тоже время в бассейнах рек Баргузин и Селенга в 1966-2015 гг. отмечался небольшой отрицательный тренд годовых атмосферных осадков, тогда как в бассейне р. Верхняя Ангара имел место слабый положительный тренд.

Глобальное потепление оказало заметное влияние на *ледовый режим озера*. Данные непрерывных наблюдений с 1869 по 2015 гг. в п. Листвянка, указывают на начавшееся еще в 70-е годы XIX века и продолжавшееся в XX веке "смягчение"

ледовых условий. Оно проявлялось в тенденции запаздывания наступления ледостава и все более раннего вскрытия озера.

Величины трендов за период 1869-2015 гг., значимость которых не ниже 5 %, составили для сроков замерзания 11 суток, для сроков вскрытия - 8 суток за 100 лет, продолжительность безледного периода возросла, а периода ледостава сократилась на 18 суток. По данным наблюдений с 1949 по 2015 гг., смягчение суровости зим приводило к уменьшению максимальной толщины льда со средней скоростью около 0,18 см за год.

Величина «векового» тренда *суммарного годового речного притока* в оз. Байкал за период инструментальных измерений с 1933 до 2014 гг. составила минус 3,5 км<sup>3</sup> за 100 лет (тренд статистически незначим). Как и для температуры воздуха, в изменении суммарного притока выделяются внутривековые циклы длительностью 20-35 лет (Афанасьев, 1960) - 1904-1929, 1930-1958, 1959-1979, 1980-2014 гг. За тот же период отрицательный тренд притока отмечается для р. Селенга (-8,3 км<sup>3</sup> за 100 лет, тренд на уровне 5 %), положительный для р. Верхняя Ангара (2 км<sup>3</sup> за 100 лет,  $p < 0,01$ ). Для р. Баргузин тренд незначим и мал (-0,1 за 100 лет). Для стока р. Селенга наиболее значимыми являются 26-27-летние и 11-летние циклы (Афанасьев, 1960).

При сравнении циклов притока воды и температуры воздуха выявлена их противофазность в период до 1970-х годов (Шимараев и др., 2002). Фазе подъема или понижения одной величины соответствует противоположное по знаку изменение другой, а годы наступления противоположных экстремальных (минимальных и максимальных) значений достаточно близки. Наиболее вероятным объяснением этой закономерности является внутривековая цикличность процессов зонального западного переноса воздушных масс в теплый период года, на который приходится около 80 % годовой суммы атмосферных осадков, и притока воды в озеро. Усиление этого типа атмосферных процессов должно сопровождаться увеличением количества осадков и понижением температуры воздуха, а ослабление - усилением континентальности климата с повышением температуры воздуха и уменьшением количества атмосферных осадков. После 1970 г. до начала 1990-х гг. эта закономерность нарушалась, но после 1990 г. она снова восстановилась.

По наблюдениям в последние 60-70 лет постепенно возрастала температура поверхности  $T_n$  и верхних слоев воды оз. Байкал в теплую часть года. Положительный тренд  $T_n$  в 1952-2014 гг. составил 0,3 °C за 10 лет ( $p < 0,001$ ).

**В четвертой главе** рассмотрена изменчивость климатических характеристик под влиянием крупномасштабной циркуляции атмосферы.

*Циркуляция атмосферы и температура воздуха ( $T_a$ )*

Зимой (декабрь-февраль) температура воздуха находится в прямой зависимости от АО ( $r=0,56$ ), NAO ( $r=0,45$ ) и EAWR ( $r=0,32$ ) и в обратной - от SCAND ( $r=-0,59$ ) и Sh ( $r=-0,58$ ). Уравнение множественной линейной регрессии имеет следующий вид

$$T_{a \text{ XII-II}} = -15,4 - 1,3 \text{SCAND} - 1,0 \text{Sh} + 0,8 \text{NAO}.$$

Оно учитывает 61 % изменчивости  $T_a$  с основным вкладом SCAND (58 %), Sh (29 %) и NAO (13 %), и воспроизводит разные по продолжительности

колебания  $T_a$ , включая большинство лет с ее аномальными значениями (рис. 2) при величине стандартной ошибки  $S = \pm 1,4$  °C.

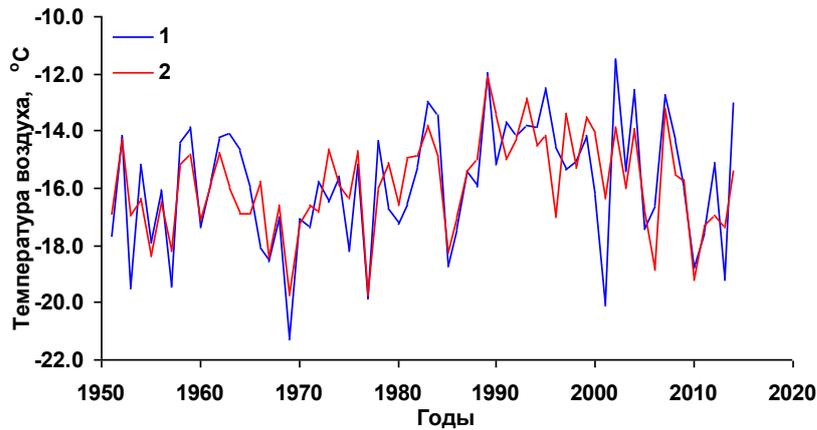


Рис. 2. Температура воздуха зимой, осредненная по данным байкальских метеостанций, по наблюдениям (1) и расчетам по регрессионной зависимости (2)

*Оценка применимости уравнения множественной линейной регрессии на примере зимней температуры воздуха на метеостанции Бабушкин*

Для периода с 1950 по 2000 гг. получено уравнение множественной линейной регрессии, которое учитывает 68 % изменчивости  $T_a$  ( $R^2=0,68$ ) (красная кривая, рис. 3) с основным вкладом SCAND (56 %) и Sh (34 %):

$$T_{a \text{ XII-II}} = -13,2 - 1,4 \text{SCAND} - 1,1 \text{Sh} + 0,5 \text{NAO}.$$

Далее в указанное уравнение были подставлены уже известные данные индексов циркуляции в период с 2001 по 2015 гг. (зеленая кривая) (рис. 3). Коэффициент корреляции между прогнозной  $T_a$  для этого периода и полученной по измерениям фактической температуре составил 0,79 (при среднем отклонении  $\pm 0,4$  °C).

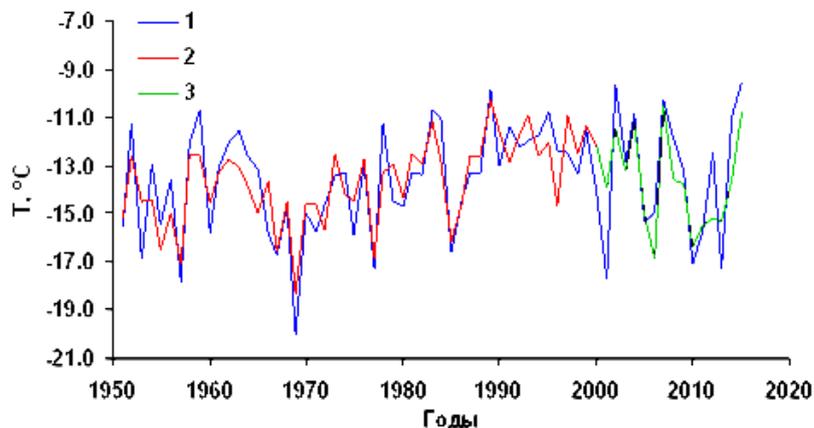


Рис. 3. Средняя в декабре-феврале температура воздуха на метеостанции Бабушкин по наблюдениям (1), расчетам по регрессионной зависимости (2) и прогнозная по уравнению множественной регрессии за 1950-2000 гг. (3)

Весной (март-май) основное влияние на изменение  $T_a$  оказывает АО ( $r=0,56$ ), ее доля в учитываемой уравнением изменчивости  $T_a$  равна 56 %. Менее тесной становится связь с SCAND ( $r=-0,38$ ) и с Sh ( $r=-0,20$ ) с вкладом 9 % и 8 % соответственно. Уравнение множественной регрессии объясняет 59 % изменений  $T_a$  при величине  $S=\pm 0,8$  °C.

Летом (июнь-август) связь  $T_a$  с показателями циркуляции атмосферы существенно ослаблена. Значимое влияние на ее изменения оказывают только EA ( $r=0,33$ , вклад 65 %) и SCAND ( $r=-0,28$ , вклад 21 %). Уравнение регрессии объясняет только 17 % изменений  $T_a$  и позволяет описать лишь ее долговременную тенденцию в 1950-2015 гг. при  $S=\pm 0,8$  °C.

Осенью (сентябрь-ноябрь) влияние атмосферных процессов на  $T_a$  усиливается. Уравнение регрессии учитывает 38 % колебаний температуры воздуха, которые зависят в основном от активности АО ( $r=0,52$ , вклад 71 %) и SCAND ( $r=-0,44$ , вклад 19 %). Несмотря на значимую корреляцию с индексом POL ( $r=0,34$ ), его вклад в изменчивость  $T_a$  отсутствует. Межгодовые колебания рассчитанных по уравнению значений температуры воздуха достаточно близки к колебаниям ее фактических значений при  $S=\pm 0,8$  °C.

Основную роль в изменчивости годовой температуры играют механизмы циркуляции, характеризующие глобальный западно-восточный перенос или его региональные проявления АО, NAO, EA ( $r=0,39\div 0,59$ ) и блокирующие этот перенос SCAND, Sh ( $r=-0,44\div -0,49$ ). Уравнение регрессии ( $R=0,81$ ,  $S=\pm 0,5$  °C) учитывает 66 % изменчивости  $T_a$ .

Таким образом, учитываемые Teleconnection Patterns показатели циркуляционных процессов описывают 38-66 % изменений годовой температуры и температуры зимой, весной и осенью. Летом вклад циркуляции в изменение температуры снижается до 17 % и более значительную роль играет, по-видимому, радиационный прогрев, эффект которого ослабевает при усилении зональной циркуляции (Шимараев, 2008). К основным циркуляционным показателям, влияющим на повышение годовой и сезонной (кроме летней) температуры в регионе оз. Байкал, относятся АО и NAO, а её понижение - SCAND и Sh. Влияние и вклад других показателей циркуляции статистически незначимы.

Вклад циркуляции в изменение температуры воздуха в течение рассматриваемого периода не остается постоянным. В период возрастания активности зонального переноса (1970-1995 гг.) теснота связи зимней  $T_a$  с NAO ( $r=0,70$ ) и АО ( $r=0,64$ ) усилилась, вклад NAO в изменение  $T_a$  возрос до 68 %. Теснота связи  $T_a$  с SCAND и Sh практически не изменилась ( $r=-0,56\div -0,61$ ), но вклад SCAND понизился до 5 %, а Sh до 27 %. Влияние других показателей циркуляции оказалось статистически незначимым. Уравнение множественной регрессии для этого периода учитывает изменения температуры воздуха полнее и точнее ( $R^2=0,74$ ,  $S=\pm 1,1$  °C), чем уравнение для всего периода 1950-2015 гг.

#### *Циркуляция атмосферы и атмосферные осадки (Ос)*

Наряду с многолетним трендом атмосферные осадки в 1950-2014 гг. испытывали колебания разной продолжительности.

Зимой и летом значимой связи атмосферных осадков с механизмами циркуляции не обнаружено. Уравнения множественной линейной регрессии статистически незначимы.

Весной значимое влияние на атмосферные осадки оказывает только SCAND ( $r=-0,32$ ), доля которого в учитываемой уравнением изменчивости  $O_c$  равна 77 %. Уравнение множественной регрессии объясняет всего 14 % изменений осадков при величине  $S=\pm 12$  мм.

Осенью уравнение регрессии учитывает 22 % колебаний  $O_c$ , которые зависят в основном от активности POL ( $r=-0,31$ , вклад 45 %) и PNA ( $r=-0,27$ , вклад 37 %). Уравнение линейной регрессии позволяет описать лишь долговременную тенденцию колебаний  $O_c$  в 1950-2014 гг. при  $S=\pm 19$  мм.

Основной вклад в изменения атмосферных осадков теплого периода с мая по октябрь вносит АО - 35 % ( $r=0,26$ ), WP - 31 %, SCAND - 18 % и EAWR - 16 %. Уравнение регрессии учитывает 19 % изменчивости  $O_c$  ( $S=\pm 45$  мм) (рис. 4) и имеет следующий вид

$$O_c_{v-X} = 284,0 + 44,7AO - 21,1WP - 25,1SCAND + 14,4EAWR.$$

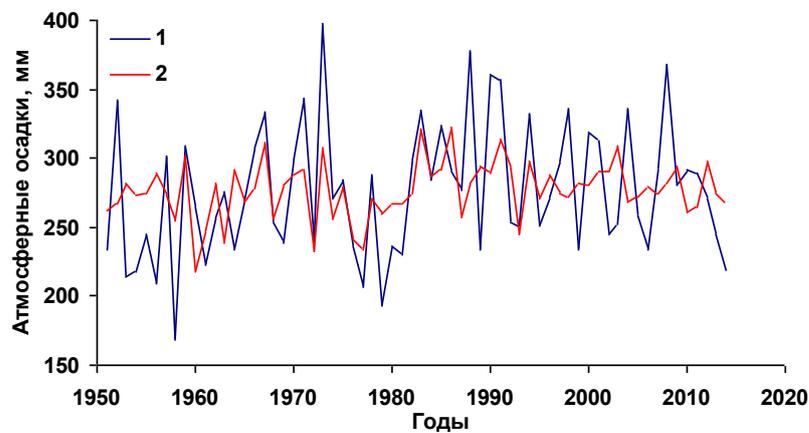


Рис. 4. Атмосферные осадки в мае-октябре, осредненные по данным байкальских метеостанций, по наблюдениям (1) и расчетам по регрессионной зависимости (2)

Значимое влияние на изменчивость годовых атмосферных осадков оказывают АО ( $r=0,30$ ) и SCAND ( $r=-0,29$ ). Уравнение множественной линейной регрессии ( $R=0,40$ ,  $S=\pm 53$  мм) учитывает 16 % изменчивости  $O_c$ .

**В пятой главе** рассмотрена изменчивость гидрологических характеристик под влиянием крупномасштабной циркуляции атмосферы.

#### *Ледовые явления, температура воздуха и циркуляция атмосферы*

Температура воздуха в месяцы холодного полугодия является основным фактором, влияющим на ледовые явления. Сроки замерзания ( $D_{зам}$ , в отклонениях от 1 декабря до даты замерзания) тесно связаны с температурой воздуха ( $T_a$ ) ноября-декабря, определяющей интенсивность потерь тепла с водной поверхности и скорость выхолаживания верхнего слоя воды в предледоставный период (Верболов и др., 1965). Для периода 1896-2015 гг. в Южном Байкале изменения температуры воздуха объясняют около 62 % изменчивости  $D_{зам}$  (рис. 5). Связь между ними описывается уравнением

$$D_{зам} = 4,6T_a + 77,9 \quad (R^2 = 0,62, p < 0,001, S \pm 7 \text{ дней}).$$

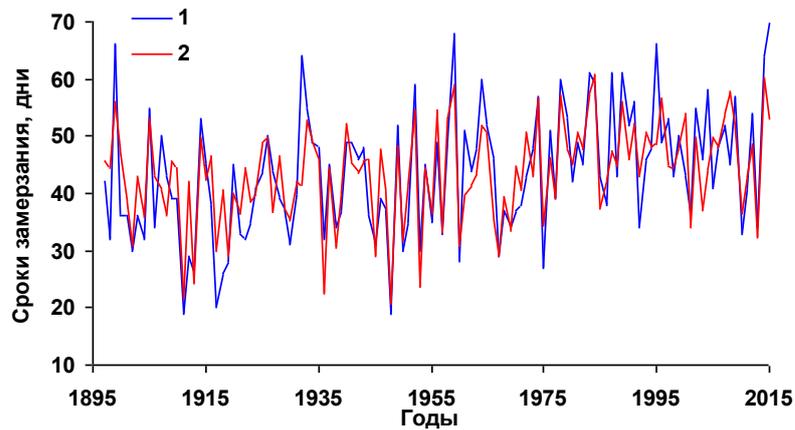


Рис. 5. Сроки замерзания (в отклонениях от 1 декабря) в Южном Байкале п. Листвянка по наблюдениям (1) и расчетам по регрессионной зависимости (2) с учетом температуры воздуха ноября-декабря

Еще более значительно влияние температуры воздуха на максимальную толщину льда, учитываемое уравнением

$$H_{\text{макс}} = -4,8T_a + 9,8 \quad (R^2 = 0,79, S \pm 6 \text{ см}),$$

где  $T_a$  - средняя температура воздуха в январе-феврале.

Температурные условия весны влияют на сроки вскрытия ледяного покрова ( $D_{\text{вскр}}$ , в отклонениях от 1 мая до даты вскрытия), однако корреляция сроков вскрытия с температурой воздуха февраля-апреля не очень высока ( $r = -0,60$ ), что связано с влиянием на взлом и разрушение ледяного покрова не только теплового, но и динамического фактора (ветер) (Kouraev et al., 2007; Шимараев, 2008). Связь между сроками вскрытия и температурой воздуха описывается уравнением

$$D_{\text{вскр}} = -3,0T_a - 25,1 \quad (R^2 = 0,36, p < 0,001, S \pm 6 \text{ дней}).$$

Изменчивость сроков замерзания сопоставлена с процессами циркуляции предшествующими замерзанию (ноябрь-декабрь предыдущего года).

Для Южного Байкала (п. Листвянка, станций Маритуй, порт Байкал, Большое Голоустное, Танхой, Бабушкин) и центральной части озера (станции Узур, Солнечная, Большой Ушканий) обнаруживается значимая положительная связь сроков замерзания с АО ( $r = 0,40 \div 0,42$ ), EAWR ( $r = 0,31 \div 0,37$ ) и отрицательная с SCAND ( $r = -0,52 \div -0,68$ ). Годы позднего замерзания соответствуют возрастанию активности зонального переноса воздушных масс из Атлантики (АО, EAWR), а годы раннего замерзания - усилению SCAND. Уравнения регрессии объясняют 38÷56 % изменчивости  $D_{\text{зам}}$  с величиной стандартного отклонения  $S = \pm 7$  дней. Основной вклад (72-82 %) в учитываемую уравнениями изменчивость сроков замерзания вносит SCAND.

В северной части Байкала (станции Байкальское, Нижнеангарск, Томпа) процессы циркуляции объясняют 34 % изменений сроков замерзания ( $S = \pm 7$  дней).

Связь с отдельными механизмами циркуляции значима только с SCAND ( $r=-0,49$ ) вклад, которого в учитываемую изменчивость  $D_{\text{зам}}$  составляет 72 %.

Межгодовая и внутривековая изменчивость толщины ледяного покрова ( $H_{\text{л}}$ ) сопоставлена с процессами циркуляции в декабре-феврале. В Южном и Среднем Байкале отмечается значимая обратная связь толщины льда с АО ( $r=-0,50 \div -0,55$ ), NAO ( $r=-0,38 \div -0,42$ ) и EAWR ( $r=-0,27 \div -0,29$ ), и прямая связь с SCAND и Sh ( $r=0,36 \div 0,50$ ). Наибольший вклад в изменчивость толщины льда во всех частях озера вносит АО (68÷72 %). Уравнение регрессии для Южного Байкала ( $R^2=0,42$ ,  $S=\pm 9,5$  см) учитывает влияние циркуляции на изменения толщины льда точнее, чем для Среднего Байкала ( $R^2=0,37$ ,  $S=\pm 10,7$  см). В Северном Байкале уравнение регрессии объясняет 27 % изменений толщины льда при  $S=\pm 14,5$  см.

Аналогичный анализ для отдельных станций показал, что связь  $H_{\text{л}}$  с показателями циркуляции ослаблена для участков с преобладанием постоянно заснеженного льда. Причиной этого является снижение теплопроводности ледово-снежного покрова и, как следствие, замедленная реакция толщины льда на вызываемые процессами циркуляции изменения температуры воздуха. Для менее заснеженных участков у западного побережья Южного Байкала у п. Листвянка (рис. 6) и станции Большое Голоустное уравнения регрессии учитывают 47-59 % изменчивости  $H_{\text{л}}$  с погрешностью  $\pm 11,5$  см и хорошо описывают тренд, межгодовые колебания, годы с аномально большой толщиной льда (1969, 1977, 1985, 2001 и 2010 гг.)

$$H_{\text{л}}=81,9+8,0Sh+7,0SCAND-5,0NAO.$$

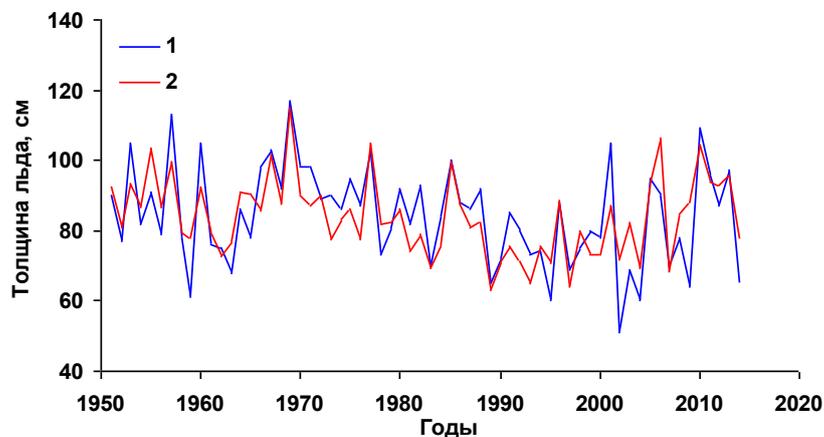


Рис. 6. Толщина льда в Южном Байкале, п. Листвянка по наблюдениям (1) и расчетам по регрессионной зависимости (2) с учетом индексов декабря-февраля

Для станций восточного побережья Южного Байкала, а также центральной и, особенно, северной части озера, где толстый снег обычно полностью покрывает лед, вклад процессов циркуляции в изменение  $H_{\text{л}}$  снижается до 23-33 %.

В период 1970-1995 гг. отмечается повышенное влияние зональной циркуляции (АО) на изменение толщины льда. Ее вклад в учитываемую уравнениями изменчивость составил в отдельных частях озера около 73 %, тогда как для SCAND он понизился до 3 % в южной части, а для других частей озера отсутствовал. Величина  $R^2$  для этого периода возросла по сравнению

с 1950-2014 гг. с 42 до 64 % в южной, с 37 до 70 % в средней и с 27 до 52 % в северной части озера, величина  $S$  уменьшилась от 9,5-14,5 до 7,6-11,6 см.

Изменение сроков вскрытия ледяного покрова  $D_{\text{вскр}}$  определяется на 44-52 % процессами циркуляции атмосферы в декабре-марте.

Для выделенных участков озера и отдельных станций заметное влияние на  $D_{\text{вскр}}$  оказывают NAO и AO ( $r=-0,49 \div -0,65$ ), EA ( $r=-0,26 \div -0,39$ ), SCAND и Sh ( $r=0,30 \div 0,46$ ). Вклад NAO в учитываемую уравнениями изменчивость  $D_{\text{вскр}}$  составляет 67-82 % и намного превышает вклад EA (2-19 %), SCAND (5-11 %) и Sh (4-24 %). Учет индексов этих механизмов в уравнениях регрессии позволяет описать тренд и межгодовые колебания (рис. 7) и большинство лет с аномальными сроками вскрытия при  $S=\pm 5,9-6,4$  дня

$$D_{\text{вскр}}=9,6-6,4\text{NAO}-1,8\text{EA}+2,2\text{SCAND}+1,5\text{Sh}.$$

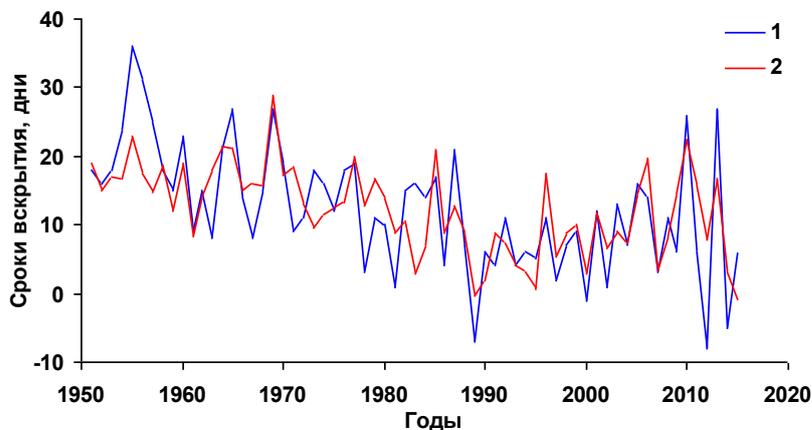


Рис. 7. Сроки вскрытия (в отклонениях от 1 мая) в Среднем Байкале, станция Большой Ушканий о-в по наблюдениям (1) и расчетам по регрессионной зависимости (2) с учетом индексов декабря-марта

Таким образом, ледовый режим озера в современный период отражает общий характер изменений климата в Байкальском регионе. Сохраняется связанный с потеплением устойчивый и умеренный по величине тренд запаздывания времени замерзания и более раннего наступления вскрытия. Одновременно с этим скорость изменения этих показателей ледового режима существенно меняется и даже меняет знак приращения на ветвях роста и спада внутривековых и особенно, малых (4-7 лет) циклов климата, вызываемых колебаниями процессов циркуляции атмосферы. Влияние циркуляции усилено для мало заснеженных районов и ослаблено для районов озера с устойчивым снежным покровом на льду.

#### *Температура поверхности воды ( $T_в$ ) и циркуляция атмосферы*

Активное прогревание оз. Байкал начинается в мае сразу после вскрытия ледяного покрова, когда резко возрастает радиационный прогрев водной толщи. В это время поток солнечной радиации к поверхности озера близок к максимальному за год, альbedo водной поверхности мало (6 %). Поэтому время вскрытия, зависящее от зимних процессов циркуляции атмосферы, является фактором, влияющим на температуру верхнего слоя воды  $T_в$  весной и в последующие летние

месяцы (Шимараев, 2007). Наличие такой физической связи объясняет влияние зимних процессов циркуляции атмосферы на температуру воды в период нагревания оз. Байкал (май-сентябрь).

Расчеты парной корреляции  $T_B$  для отдельных станций и выделенных частей озера со средними в декабре-марте механизмами циркуляции свидетельствуют о значимой положительной связи  $T_B$  с NAO ( $r=0,28 \div 0,54$ ), АО ( $r=0,37 \div 0,53$ ) во всех частях озера, в Южном и Среднем Байкале также с EA ( $r=0,29 \div 0,36$ ), в Северном Байкале с EAWR ( $r=0,26$ ). Отрицательная связь обнаружена с SCAND ( $r=-0,27 \div -0,39$ ) во всех частях озера и в Среднем и Южном Байкале с Sh ( $r=-0,30$ ). Уравнения множественной регрессии описывают 31 % изменчивости  $T_B$  в Южном, 48 % в Среднем и 22 % в Северном Байкале с величиной  $S=\pm 0,7-0,9$  °C. Преобладающий вклад в изменение температуры поверхности воды в южной части озера вносит АО (62 %), в средней NAO (61 %), в северной SCAND (70 %).

Из отдельных станций можно выделить Большой Ушканий о-в и Исток Ангары. Для островной станции в открытой части озера характерно ослабленное, по сравнению с прибрежными участками, влияние локальных ветров и прибрежной динамики вод на изменчивость температуры воды. Процессы циркуляции объясняют 49 % колебаний температуры с  $S=\pm 0,7$  °C. Значимое воздействие оказывают NAO ( $r=0,56$ , вклад 63 %) и АО ( $r=0,55$ ), EA ( $r=0,38$ , вклад 22 %), SCAND ( $r=-0,38$ , вклад 11 %) и Sh ( $r=-0,36$ ). Учет механизмов циркуляции позволяет детально отразить наблюдавшиеся в 1950 - 2014 гг. коротко- и долгопериодные колебания  $T_e$  (рис. 8)

$$T_e = 9,4 + 0,3NAO + 0,5EA - 0,3SCAND + 0,3AO, (R^2 = 0,49).$$

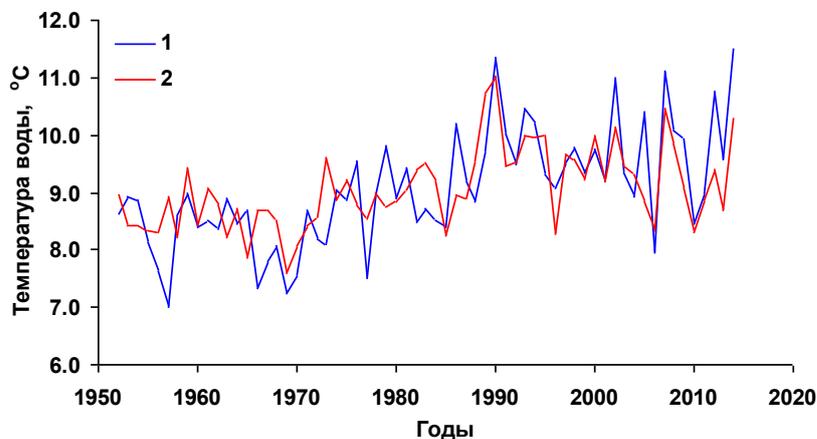


Рис. 8. Средняя в июне-октябре температура поверхности воды в Среднем Байкале, станция Большой Ушканий о-в по наблюдениям (1) и расчетам по регрессионной зависимости (2) с учетом индексов декабря-марта

Для станции Исток Ангары, сток которой формируется поступлением вод из озера с глубин не менее 50 м, основное влияние на изменение температуры оказывает NAO и АО ( $r=0,43 \div 0,49$ ) и в меньшей степени EA ( $r=0,30$ ). Из-за сложной динамики вод этого района, воздействия на температуру частых сгонно-нагонных явлений при ветрах из долины р. Ангара влияние процессов циркуляции, хотя статистически значимо, но объясняет только 36 % изменений  $T_e$  ( $S=\pm 0,8$  °C).

Как и для станции Большой Ушканий, основной вклад в эти изменения (66 %) принадлежит НАО, который намного превышает вклад ЕА (20 %).

*Атмосферные осадки, суммарный годовой речной приток в оз. Байкал и годовые расходы воды основных притоков*

Суммарный годовой приток и сток основных притоков оз. Байкал тесно связан с количеством выпавших атмосферных осадков. Коэффициент корреляции между годовым притоком и осадками в разные сезоны года, свидетельствует о значимом влиянии на приток как годовых, так и летних осадков. Осадки объясняют от 12 (для р. Верхняя Ангара) до 62 % (для р. Баргузин) изменений суммарного годового стока рек.

Несмотря на близость характера колебаний атмосферных осадков и притока, знак их многолетнего тренда совпадает не для всей части бассейна. Так, при положительном тренде годовых осадков для всего бассейна оз. Байкал положительный тренд стока отмечается для рек Верхняя Ангара и Баргузин, а тренд стока р. Селенга и суммарного притока воды в озеро оказывается отрицательным (рис. 9).

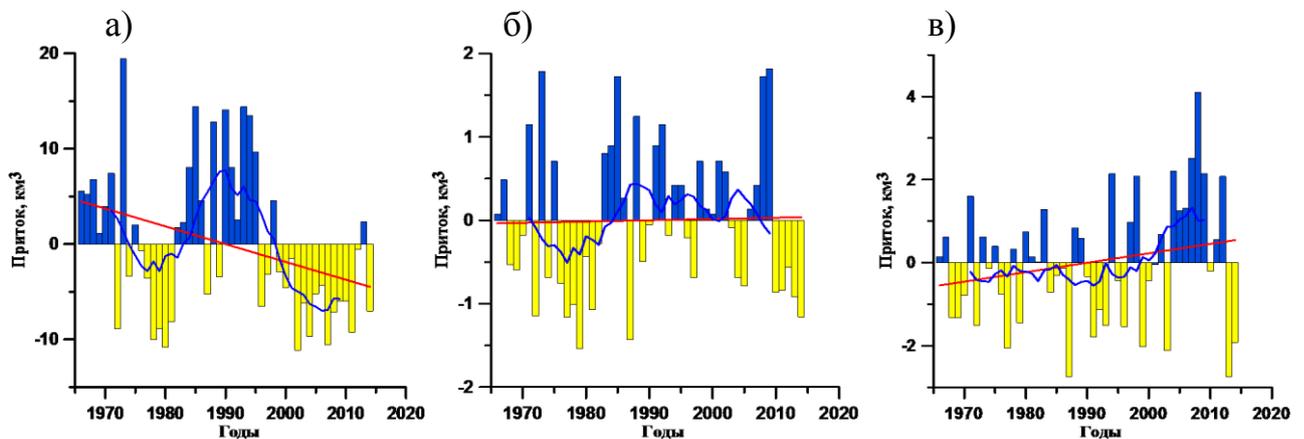


Рис. 9. Годовой сток р. Селенга (а), р. Баргузин (б) и р. Верхняя Ангара (в) в отклонениях от среднего в 1966-2014 гг. Сглаженные кривые соответствуют 11-летнему скользящему осреднению, прямая - линия тренда

*Особенности связи речного притока с атмосферными осадками и температурой воздуха в период 1966-2014 гг.*

Очевидно, что на изменение стока, кроме атмосферных осадков, должны влиять и другие климатические характеристики, в частности температура воздуха. Для выявления роли температуры и осадков оценен их сравнительный вклад в изменчивость притока. Положительная связь с температурой наблюдается для стока рек Верхняя Ангара и Баргузин, отрицательная - для стока р. Селенга и суммарного притока. Влияние температуры на суммарный приток с территории всего бассейна и сток р. Баргузин чрезвычайно мало и ее вклад в изменчивость притока статистически незначим. Для р. Селенга этот вклад составляет 8 %, а для р. Верхняя Ангара он повышается до 87 %. Причиной повышения роли температуры воздуха для р. Верхняя Ангара может быть постепенное таяние ледников в ее бассейне, как и для гор юга Восточной Сибири и Монголии (Плюснин и др., 2012), а также таяние многолетнемерзлых пород, что ведет, очевидно, к повышению стока при росте температуры. В работе (Мяч и др., 2011)

предполагается, что начавшаяся с середины 1990-х гг. деградация оледенения в пещерах-ледниках оз. Байкал будет продолжаться и в дальнейшем.

Можно предположить, что причиной различий в тенденциях изменения стока является разная реакция на потепление водности рек, бассейны которых находятся в неодинаковых природных условиях. Выделены два типа бассейнов. Территория бассейна р. Селенга, с площадью более 80 % от водосборной площади оз. Байкал, включает участки с очень сухим, сухим и умеренно влажным климатом, и в целом испытывает дефицит влаги (Бирюкова, 2001). Очевидно, что потепление ведет к постепенному возрастанию этого дефицита из-за роста потерь влаги на испарение и приводит, в конечном итоге, к уменьшению водного стока р. Селенга (первый тип). Наоборот, для р. Верхняя Ангара, р. Баргузин (второй тип), бассейны, которых находятся в пределах горного обрамления котловины оз. Байкал с умеренным увлажнением, многолетней мерзлотой, повышенным зимним снегонакоплением потепление может способствовать вовлечению в питание рек дополнительной влаги. Влияние этих факторов проявляется, по-видимому, сильнее всего для р. Верхняя Ангара.

#### *Суммарный годовой речной приток оз. Байкал и циркуляция атмосферы*

При использовании средних годовых значений индексов циркуляции для установления их связи с суммарным годовым притоком в озеро уравнение регрессии оказалось статистически незначимо. Поэтому было рассмотрено влияние на суммарный годовой речной приток в оз. Байкал механизмов атмосферной циркуляции в различные сезоны года.

Преобладающее влияние на суммарный приток оказывают процессы циркуляции в период с июня по октябрь с основным вкладом АО 30 % ( $r=0,32$ ), EAWR 41 % ( $r=0,36$ ) и SCAND ( $r=-0,19$ ) 20 %. Уравнение регрессии хорошо воспроизводит наблюдаемые колебания притока в 1950-2014 гг. (рис. 10)

$$Pr=62,6+7,5EAWR+14,2AO-4,5SCAND, (R^2=0,32, S\pm 8,7 \text{ км}^3).$$

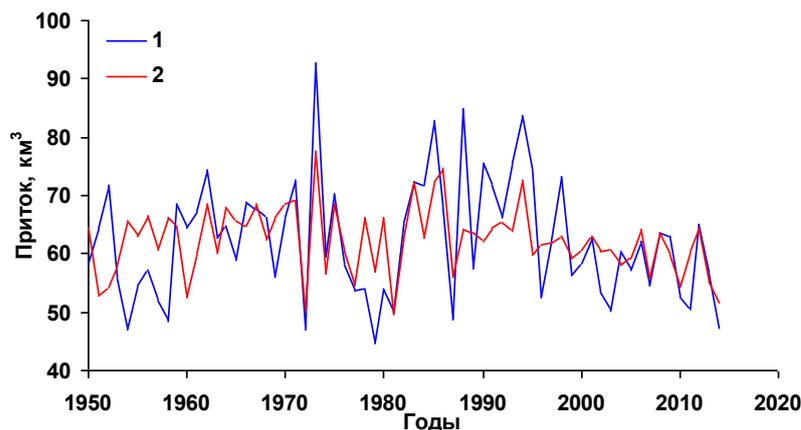


Рис.10. Суммарный годовой речной приток в оз. Байкал по наблюдениям (1) и расчетам по регрессионной зависимости (2) с учетом индексов в июне-октябре

#### *Циркуляция и годовые расходы основных притоков оз. Байкал*

Наибольшее влияние на годовой сток р. Селенга оказывают процессы циркуляции в период с июня по октябрь, позволяющие объяснить около 28 %

изменчивости стока, с преобладающим вкладом EAWR 68 % ( $r=0,43$ ), SCAND 19 % и АО 13 %. Воздействие остальных показателей атмосферной циркуляции, оказалось менее значимым.

Более тесно связан с циркуляцией атмосферы годовой сток р. Баргузин. Уравнение, составленное отдельно с индексами циркуляции за июнь-октябрь учитывает 41 % изменчивости годового стока ( $R=0,64$ ). Из отдельных механизмов циркуляции наибольшее воздействие на сток оказывает WP с вкладом 27 % ( $r=-0,33$ ), АО (вклад 25 %,  $r=0,28$ ) и EAWR (вклад 24 %,  $r=0,24$ ).

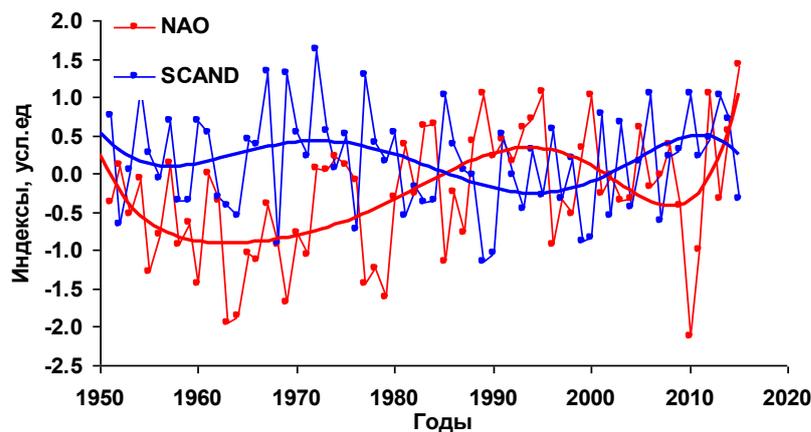
Слабее всего реагирует на изменения циркуляции атмосферы сток р. Верхняя Ангара. Влияние циркуляции учитывается только уравнением, включающим средние за июнь-октябрь показатели циркуляции, позволяющие описать около 16 % изменчивости годового речного стока. Наибольшее влияние на годовой сток оказывает EA (вклад 42 %,  $r=0,25$ ), NAO (вклад 27 %) и АО (вклад 18 %).

На изменение годовых значений показателей циркуляции заметнее реагирует сток р. Баргузин ( $R^2=0,22$ ), в меньшей степени сток р. Селенга ( $R^2=0,15$ ) и р. Верхняя Ангара ( $R^2=0,07$ ). Однако связь усиливается при лаге в 1-2 года для р. Селенга ( $R^2=0,18 \div 0,22$ ) и в 2-3 года для р. Верхняя Ангара ( $R^2=0,18 \div 0,21$ ).

#### *Оценка тенденции возможных изменений ледово-термического режима*

Предполагается, что вековой тренд изменений характеристик климата и ледово-термических процессов оз. Байкал в XX столетии, сохранится и в XXI столетии.

Основной причиной коротко- и долгопериодных (внутривековых) колебаний температуры воздуха и характеристик ледово-термического режима оз. Байкал можно считать изменения крупномасштабной циркуляции атмосферы в Северном полушарии. В последние 60-70 лет они характеризовались изменением соотношения между активностью показателей зональной циркуляции и показателей, блокирующих их действие. При этом выделяются три периода (рис. 11), которые можно интерпретировать как периоды внутривекового колебания.



*Рис. 11.* Циркуляционные показатели NAO и SCAND в декабре-феврале. Текущие значения и их полиномиальная аппроксимация

С середины 1950-х до начала 1970-х (первый период) происходило уменьшение показателей зональной циркуляции с одновременным возрастанием

SCAND и Sh. Этим условиям соответствовали холодные зимы с низкой температурой воздуха и ростом продолжительности зимнего ледостава. В 1970-1995 гг. (второй период) постоянное увеличение АО и NAO при одновременном уменьшении SCAND и Sh привело к исключительно сильному потеплению зимой и значительному смягчению ледовых условий. После 1995 и до 2010 гг. (третий период) вновь происходило уменьшение АО и NAO с одновременным возрастанием SCAND и Sh. Начиная с 2010 г. соотношение между активностью зонального переноса и блокирующих его механизмов постепенно ослабевает, что нашло отражение в тенденции повышения годовой, зимней и весенней температур воздуха, и увеличения продолжительности безледного периода.

С учетом наблюдавшейся продолжительности периодов подъема и понижения процессов циркуляции и их влиянии на ледово-термический режим озера, можно ожидать, что в ближайшие годы на фоне глобального потепления должна наблюдаться фаза роста очередного внутривекового цикла климата. На оз. Байкал она приведет к тенденции повышения годовой, зимней и весенней температур воздуха. Это отразится на ледовых явлениях (более позднем замерзании, раннем вскрытии, некотором уменьшении максимальной толщины льда, сокращением продолжительности зимнего ледостава), и на увеличении температуры поверхности воды летом.

### ***Заключение***

Крупномасштабные изменения атмосферной циркуляции в Северном полушарии в последние 60-70 лет явились основной причиной коротко - и долгопериодных (внутривековых) колебаний климатических и гидрологических характеристик и процессов на оз. Байкал.

1. Долго - и короткопериодные колебания температуры на оз. Байкал, включая аномальные годы, вызывались изменением циркуляции атмосферы. К основным циркуляционным механизмам, влияющим на повышение годовой и сезонной (кроме летней) температуры воздуха, относятся АО и NAO, а на их понижение - SCAND и Sh. Наряду с этим заметна роль зимой EAWR, весной EA и WP, летом EA.

2. Атмосферные осадки связаны с отдельными показателями атмосферной циркуляции. Весной обнаруживается значимая связь осадков с SCAND ( $r=-0,32$ ), осенью с POL и PNA ( $r=-0,27$ ÷ $-0,31$ ), в период с мая по октябрь с АО ( $r=0,26$ ) и в целом для года с АО ( $r=0,30$ ) и SCAND ( $r=-0,29$ ). Уравнения регрессии для этих периодов описывают около 14-22 % изменчивости осадков.

3. Зимой и весной АО, NAO, SCAND и Sh вносят основной вклад в изменение характеристик ледового режима, объясняя не менее 80 % от ее величины, учитываемой уравнением линейной регрессии. На изменение сроков замерзания преобладающее влияние оказывают колебания индексов SCAND и Sh, тогда как их влияние на сроки вскрытия озера и толщину льда становится второстепенным, уступая первое место колебаниям индексов зонального переноса. Показано, что связь толщины льда с индексами циркуляции существенно ослабевает для заснеженных участков акватории Байкала. Использование индексов циркуляционных механизмов в уравнениях множественной регрессии для сроков замерзания и вскрытия имеет прогнозное значение, так как

заблаговременность уравнений составляет 2-3 месяца (для  $D_{\text{зам}}$  используются индексы ноября-декабря, а для  $D_{\text{вскр}}$  декабря-марта).

4. Процессы циркуляции атмосферы в зимний период, влияющие на толщину льда и сроки разрушения ледяного покрова, оказывают косвенно значимое воздействие на температуру верхних слоев воды в теплую часть года. При этом преобладающий вклад в ее изменение вносят индексы зональной циркуляции (АО и NAO).

5. Соотношение между вкладом основных циркуляционных механизмов в колебания температуры воздуха зимой и отдельных характеристик ледовых явлений менялось во времени. Если в среднем за 1950-2015 гг. вклад SCAND и Sh значительно превосходил вклад АО и NAO, то в период усиления активности зонального переноса (1970-1995 гг.) АО и NAO играло основную роль в изменении температуры воздуха зимой, а также сроков замерзания и максимальной толщины льда. Уравнения множественной регрессии для этого периода учитывали изменение этих характеристик более полно и точнее, чем для периода 1950-2015 гг.

6. Показано, что преобладающее влияние на суммарный приток воды в оз. Байкал и сток основных притоков оказывают процессы циркуляции в период с июня по октябрь ( $R^2=0,32$ ,  $S\pm 8,7 \text{ км}^3$ ). Основную роль в изменении годового суммарного речного притока и годового стока р. Селенга играют индексы EAWR, годового стока р. Баргузин - индексы WP, р. Верхняя Ангара - индексы EA. Процессы циркуляции атмосферы позволяют объяснить около 28 % годового стока р. Селенга, 41% стока р. Баргузин и всего 16 % стока р. Верхняя Ангара.

Неоднозначна для рек бассейна и роль метеорологических факторов. Изменение атмосферных осадков объясняет 51 % колебаний годового суммарного притока в озеро, 12 % годового стока р. Верхняя Ангара, 34 % р. Селенга, и 62 % колебаний притока р. Баргузин. Влияние температуры воздуха на суммарный приток со всего бассейна и сток р. Баргузин чрезвычайно мало и ее вклад в изменчивость притока статистически незначим. Для р. Селенга этот вклад повышается до 8 %, а для р. Верхняя Ангара он достигает 87 %.

7. Причиной различий в тенденциях изменения стока основных притоков оз. Байкал является разная реакция их водности на потепление из-за различий природных условий в их бассейнах. В бассейне р. Селенга, с преобладанием территорий с дефицитом влажности (более 80 % площади), потепление приводит к постепенному возрастанию этого дефицита из-за роста потерь влаги на испарение, что вызывает, в конечном итоге, уменьшение водного стока р. Селенга. Наоборот, для р. Верхняя Ангара, р. Баргузин и ряда других рек, бассейны которых находятся в пределах горного обрамления котловины оз. Байкал с умеренным увлажнением, распространением многолетней мерзлоты, повышенным зимним снегонакоплением потепление может способствовать вовлечению в питание рек дополнительной влаги. Это особенно заметно для р. Верхняя Ангара.

#### ***Список публикаций по теме диссертационной работы:***

*- статьи в изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Зональная циркуляция атмосферы, климат и гидрологические процессы на Байкале (1968-2007 гг.) // География и природные ресурсы. - 2010. - № 3. - С. 62-68 (соавтор М.Н. Шимараев).

2. Влияние циркуляции атмосферы на ледово-термические процессы на Байкале в 1950-2010 гг. // География и природные ресурсы. - 2013. - № 2. - С. 74-82 (соавторы Л.Н. Куимова, М.Н. Шимараев).

3. Особенности современных изменений притока воды в оз. Байкал // География и природные ресурсы. - 2013. - № 4. - С. 57-63 (соавторы В.Н. Синюкович, М.Н. Шимараев, Н.Н. Курбатова).

- *прочие публикации:*

1. Влияние северо-атлантической и арктической осцилляций на климат и гидрологические процессы в районе оз. Байкал во второй половине XX-начале XXI столетия // Вестник Ирк-го университета: Материалы ежегод. науч.-теор. конф. аспирантов и студентов. - Иркутск: Изд-во Ирк. Гос. ун-та, 2009. - С. 65.

2. Циркуляция атмосферы и гидроклиматические процессы на Байкале // География: проблемы науки и образования. Материалы ежегод. международной науч.-практич. конф. (22-24 апреля 2010). - Санкт-Петербург: СПб.: Полиграф-Ресурс, 2010. - С. 412-417 (соавтор М.Н. Шимараев).

3. Циркуляционные факторы климата и показатели увлажненности в регионе Байкала в современный период // Материалы 3-ей Всероссийской конференции с международным участием. «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов» г. Барнаул, 24-28 августа 2010г.; г. Барнаул: изд-во АРТ, 2010. - С. 645-647 (соавтор М.Н. Шимараев).

4. О циркуляционных механизмах современных колебаний климатических и гидрологических характеристик Байкала // Пятая Верещагинская Байкальская конференция, Международная научная школа для молодежи «Экология крупных водоемов и их бассейнов», 16 объединенный семинар по проблемам изучения региональных осадений из атмосферы: тезисы докладов и стендовых сообщений (Иркутск 4-9 октября 2010 г.); г. Иркутск: Изд-во Аспринт, 2010. - С. 251-253 (соавтор М.Н. Шимараев).

5. Циркуляция атмосферы и ледово-термические процессы на Байкале // Высокие технологии и фундаментальные исследования. Сборник трудов 10-й международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» 9-11 декабря 2010 г.; под ред. А.П. Кудинова. СПб.: изд-во Политехн. ун-та, 2010. - Т. 2. - С. 337-339 (соавтор М.Н. Шимараев).

6. О влиянии циркуляции атмосферы на гидроклиматические характеристики на Байкале // Материалы XVII научной конференции молодых географов Сибири и Дальнего Востока «Природа и общество: взгляд из прошлого в будущее». Иркутск, 11-16 апреля 2011г.; Иркутск: Изд-во ин-та Географии СО РАН, 2011. - С. 45-47 (соавтор М.Н. Шимараев).

7. Современные изменения климата на Байкале и циркуляция атмосферы // Международная Байкальская научная школа по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде». XII конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом»; 2011. - С. 95-96.

8. О влиянии циркуляции атмосферы на гидроклиматические процессы на Байкале в последние 60 лет // XVII международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Сборник трудов (электронный ресурс); Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2011. - С. 67-70 (соавтор М.Н. Шимараев).

9. Циркуляция атмосферы, климат и гидрологические процессы на Байкале в последние 60 лет // Девятое Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу. г. Томск. 3-6 октября 2011г.; под. ред. М.В. Кабанова. Томск: Аграф-Пресс, 2011. - С. 142-144 (соавторы М.Н. Шимараев, Л.Н. Куимова).

10. Вклад циркуляции атмосферы в изменение гидроклиматических условий на Байкале // V Международная научная конференция молодых ученых и талантливых студентов «Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность», г. Москва, 2011. С. 77-80.

11. О климатических причинах современных изменений поверхностного притока оз. Байкал // Материалы III Всероссийской научной конференции с международным участием. «Экологический риск и экологическая безопасность», г. Иркутск, 24-27 апреля 2012г.; г. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2012. - Т.1. - С. 126-129 (соавторы В.Н. Синюкович, М.Н. Шимараев, Н.Н. Курбатова).

12. Циркуляция атмосферы и внутривековая изменчивость ледово-термического режима Байкала // Всероссийская конференция «Солнечная активность и природа глобальных и региональных климатических изменений», 2012. - С. 13-14 (соавтор М.Н. Шимараев).

13. Климат, атмосферные осадки и речной приток в Байкал в современный период // Материалы международной научной конференции «Региональный отклик окружающей среды на глобальные изменения в Северо-восточной и Центральной Азии»; Изд-во ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2012. - Т.2. - С. 140-142 (соавтор М.Н. Шимараев).

14. Циркуляция атмосферы и современные тенденции изменения речного притока озера Байкал // Природоохранное сотрудничество в трансграничных экологических регионах: Россия-Китай-Монголия. Вып.3. Часть 2. Материалы конференции «Социально-экономические и экологические проблемы и перспективы международного сотрудничества России - Китая-Монголии», г. Чита, 21-23 ноября 2012 г.; г. Чита: Поиск, 2012. - С. 135-139 (соавтор М.Н. Шимараев).

15. О характере современных изменений притока воды в озеро Байкал // VII Всероссийский Гидрологический съезд (электронный ресурс), г. Санкт-Петербург, 19-21 ноября 2013 г. (соавторы В.Н. Синюкович, М.Н. Шимараев, Н.Н. Курбатова).

16. Влияние циркуляции атмосферы на современные условия увлажненности в бассейне озера Байкал // VII Всероссийский Гидрологический съезд (электронный ресурс), г. Санкт-Петербург, 19-21 ноября 2013 г. (соавторы М.Н. Шимараев, В.Н. Синюкович).

17. Ice-thermal and water regime of Lake Baikal during 1950-2014 // 9th Symposium of European Freshwater Sciences - SEFS 9. Unimail, Geneva, Switzerland, 5 - 10 July, 2015. - P. 275 (соавторы М. Shimaraev, V. Sinyukovich, E. Troitskaya, L. Kuimova).

18. Изменение ледово-термического и водного режима озера Байкал в 1950-2014 гг. // Шестая Международная Верещагинская Байкальская конференция. 4-й Байкальский Микробиологический симпозиум с международным участием «Микроорганизмы и вирусы в водных экосистемах» (Иркутск 7-12 сентября, 2015г.); г. Иркутск: Изд-во Аспринт, 2015. - С. 34 (соавторы М.Н. Шимараев, В.Н. Синюкович, Л.Н. Куимова, Е.С. Троицкая).

