

На правах рукописи



МАРЧЕНКО Ольга Юрьевна

**УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ
ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ВОДНОСТИ В БАССЕЙНЕ РЕКИ СЕЛЕНГИ**

Специальность 25.00.27 – Гидрология суши,
водные ресурсы, гидрохимия

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН)

Научный руководитель:

БЕРЕЖНЫХ Тамара Васильевна
кандидат географических наук

Официальные оппоненты:

БОЛГОВ Михаил Васильевич
доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных проблем Российской академии наук, и.о. заместителя директора по связям с неакадемическими организациями

ЕЛИСЕЕВ Алексей Викторович
доктор физико-математических наук
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова Российской академии наук, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН

Защита диссертации состоится «13» июня 2013 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д002.040.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте водных проблем РАН по адресу: 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института водных проблем РАН

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью) просим направлять по адресу: 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3. Институт водных проблем РАН, ученому секретарю диссертационного совета Д002.040.01

Автореферат разослан “29” апреля 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук, профессор



Джамалов Р.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В энергобалансе Сибири доля энергии, вырабатываемой на ГЭС, составляет около 50%. Основой гидроэнергетики региона является Ангарский каскад гидроэлектростанций, включающий Иркутскую, Братскую и Усть-Илимскую ГЭС. Потенциальные возможности выработки электроэнергии определяются гидроэнергетическим потенциалом – величиной, зависящей от гидравлической мощности речного потока. Гидропотенциал Ангарского каскада на 66,2% определяется притоком в оз. Байкал, на 30,0% – притоком в Братское водохранилище и на 3,8% – притоком в Усть-Илимское вдх. Колебания притока в оз. Байкал существенно влияют на эффективность использования всех последующих ступеней каскада, в том числе его новой четвертой ступени – Богучанской ГЭС.

Для эффективного управления энергосистемами большое значение имеет долгосрочный прогноз вариаций гидроэнергетического потенциала (ГП). Разработанная в ИСЭМ СО РАН система прогнозирования ГИПСАР неплохо зарекомендовала себя в практике работы ОАО «Иркутскэнерго», тем не менее, ее возможности можно было бы расширить, если учесть в системе прогнозирования закономерности межгодовых вариаций гидрометеорологических характеристик, контролирующих баланс водных ресурсов региона.

Наибольший вклад в изменчивость гидропотенциала каскада вносят периоды экстремально высокой и низкой водности. В эти периоды не только снижается эффективность использованию ГП, но также возникают риски для эксплуатации ГЭС и отраслей народного хозяйства, связанных с водопользованием и водопотреблением (водоснабжение, навигация, рыбное хозяйство). На протяжении последних 16 лет формирование ГП Ангарского каскада происходит в условиях маловодья. Маловодье 1996-2011 гг. является наиболее продолжительным в притоке в оз. Байкал за 110-летний ряд наблюдений. Из-за большой продолжительности маловодья дефицит ГП составил уже 47,2 млрд. кВт•ч.

Недостаточная изученность условий формирования многоводных и маловодных периодов, характерных для большинства крупных рек, и особенно рек-притоков водохранилищ ГЭС в Сибири, где маловодья могут длиться 10 и более лет, затрудняет надежное прогнозирование притока в водохранилища. Для понимания причин возникновения маловодий необходимо исследование связи между изменениями общей циркуляции атмосферы и колебаниями водности рек на территории Сибири и Монголии, как в современных условиях, так и в прошлом. Результаты подобных исследований можно было бы использовать для совершенствования статистических методов прогноза, поиска новых предикторов в условиях глобальных и региональных климатических изменений.

В представленной работе рассматриваются условия формирования водности в бассейне р. Селенги, являющейся основным источником притока воды в оз. Байкал. В среднем, доля годового стока р. Селенги составляет около половины притока в озеро, поэтому влияние маловодных и многоводных периодов р. Селенги существенно сказывается на формировании ГП Ангарского каскада.

Цель диссертационной работы – выявление особенностей периодов экстремальной водности в бассейнах р. Ангары и оз. Байкал, исследование условий формирования экстремального стока р. Селенги – основного источника притока в оз. Байкал.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Исследование особенностей колебаний водности в бассейнах р. Ангары и оз. Байкал в различные периоды времени.
2. Исследование климатических факторов формирования стока рек в бассейне р. Селенги в летний период, анализ условий выпадения летних атмосферных осадков в бассейне реки Селенги.
3. Выявление различий в направлениях переноса влаги в маловодные и многоводные периоды р. Селенги с помощью траекторных расчетов, оценка среднего количества влаги вдоль траекторий.
4. Оценка долговременных изменений стока р. Селенги, изучение связи между колебаниями стока реки Селенги и изменениями общей циркуляции атмосферы.

Объектом исследования является экстремальная водность основного притока оз. Байкал – реки Селенги.

Предметом исследования являются условия формирования экстремальной водности в бассейне р. Селенги.

Методическая основа исследования:

1. Сравнительный и корреляционный анализ характеристик маловодных и многоводных периодов для выявления закономерностей колебаний притоков в бассейне оз. Байкала и р. Ангары.
2. Траекторные расчеты переноса воздушных частиц в периоды с различным стоком в бассейне р. Селенги. Расчеты траекторий выполнялись по данным NCEP/NCAR Reanalysis на языке программирования высокого уровня ITTVIS Interactive Data Language 7.0 (IDL).
3. Анализ линейных трендов, графиков скользящего осреднения, диаграмм Хофмеллера для выявления долговременных изменений количества атмосферных осадков и циркуляции атмосферы, исследования распределения аномалий атмосферных осадков в различные периоды. Расчеты выполнены при помощи системы обработки, хранения и визуализации данных ГеоГИПСАР, разработанной в ИСЭМ СО РАН¹.

¹ Абасов Н. В. Система долгосрочного прогнозирования и анализа природобусловленных факторов энергетики ГеоГИПСАР // В сб. избранных тр. межд. конф. Enviromis-2012, Иркутск, 2012, С. 63-66

Исходные данные – комплексный набор гидрометеорологической информации, включая данные непосредственных наблюдений и данные архивов реанализа.

Сток рек. Для исследования стока рек были использованы данные среднегодового притока в оз. Байкал и Братское водохранилище с 1899 по 2011 гг., данные о расходах трех основных рек-притоков озера Байкал со створов: р. Селенга – рзд. Мостовой ($S=440\,000\text{ км}^2$), р. В. Ангара – с. Верхняя Заимка ($S=20\,600\text{ км}^2$), р. Баргузин – с. Баргузин ($S=19\,800\text{ км}^2$) за период с 1934 по 2011 гг. По р. Селенга кроме среднегодовых величин стока были использованы данные о среднемесечном стоке за каждый из летних месяцев (июнь-август). Все вышеперечисленные данные были предоставлены Иркутским ГМЦ.

Атмосферные осадки. В ходе исследования использовались базы данных с различным временным и пространственным разрешением. Для анализа периодов с экстремальными осадками были взяты суточные данные ВНИИГМИ-МЦД² о количестве атмосферных осадков двух станций, расположенных в наиболее увлажненной части бассейна р. Селенги, за все летние месяцы с 1960 по 2010 гг. Для исследования также использовались среднемесечные данные центра климатологии атмосферных осадков GPCC³. Данные GPCC представлены в узлах регулярной сетки с различным разрешением ($0.5^\circ\times0.5^\circ$; $1^\circ\times1^\circ$; $2.5^\circ\times2.5^\circ$) с 1901 по 2012 гг.

Циркуляция атмосферы. Для изучения циркуляционных характеристик атмосферы были использованы среднесуточные и среднемесечные данные архива реанализа NCEP/NCAR⁴ с 1948 по 2012 гг. – горизонтальные и вертикальные компоненты скорости ветра, температура воздуха, общее влагосодержание атмосферы, относительная влажность, высоты стандартных изобарических поверхностей в узлах регулярной сетки $2.5^\circ\times2.5^\circ$. Кроме того были использованы станционные данные о температуре воздуха из архива ВНИИГМИ-МЦД.

Научная новизна

1. В диссертации впервые выполнено комплексное исследование динамики стока реки Селенги в связи с изменениями режима циркуляции атмосферы над территорией Восточной Сибири, Монголии и Северного Китая. На основании анализа результатов траекторных расчетов установлена зависимость количества осадков и стока реки Селенги от типа приходящих воздушных масс и особенностей циркуляции в регионе.

²Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных <http://www.meteo.ru/>

³Global Precipitation Climatology Centre – <http://gpcc.dwd.de/> Schneider U, Becker A, Meyer-Christoffer A, Ziese M, Rudolf B Global Precipitation Analysis Products of the GPCC // Deutscher Wetterdienst, Offenbach a. M., Germany, 2010

⁴National Center for Atmospheric Research/ National Centers for Environmental Modeling: <http://www.esrl.noaa.gov> Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteor. Soc., 1996., Vol. 77., № 3., P. 437-471

2. Выявлены условия, необходимые для наступления экстремальных маловодных и многоводных периодов реки Селенги.

3. Предложен новый способ оценки долговременных изменений циркуляции атмосферы в регионе, включающем бассейн р. Селенги. Способ основан на анализе меридиональной скорости ветра в области конвергенции муссонных воздушных потоков и воздушных потоков умеренных широт.

Достоверность

Достоверность полученных результатов обусловлена большим объемом использованного экспериментального материала, применением общепринятых методов обработки данных и оценки статистической значимости результатов исследования. Полученные результаты согласуются с результатами работ отечественных и зарубежных исследователей.

Научная и практическая значимость работы

Диссертационная работа ориентирована на изучение возможности районирования и прогноза водности рек бассейна оз. Байкал, что имеет важное прикладное значение. Научное значение имеют установленные в работе связи между вариациями гидрологических характеристик в регионе и особенностями циркуляции атмосферы на значительной территории Восточной Сибири и Восточной Азии. Решающее влияние на сток рек оказывает соотношение между западными переносами умеренных широт и переносами муссонного типа. Найденные связи позволяют использовать для прогноза стока рек и гидропотенциала Ангарского каскада ГЭС климатические модели.

Научную ценность имеют также выполненные в работе расчеты траекторий переносов воздушных масс в периоды с различным количеством осадков, позволяющие не только оценить фактическое влагосодержание в бассейне, но и выявить режимы переносов, ответственных за формирование маловодных и многоводных периодов.

Положения, являющиеся предметом защиты:

1. Наибольшее количество влаги на территорию бассейна р. Селенги приносят воздушные массы, приходящие с юго-востока. Наименьшее количество влаги приносят воздушные массы с севера. Значительное, но не экстремальное количество влаги приносят воздушные массы, приходящие с запада и северо-запада. Результаты получены на основании анализа траекторных расчетов переносов воздушных частиц.

2. Экстремально высокий сток реки Селенги обусловлен либо сильными осадками, связанными с приходом влажной воздушной массы, и конвергенцией воздушных течений над территорией бассейна (в середине лета); либо осадками, связанными с воздушными массами северо-западных направлений (в начале и конце летнего сезона). Причиной маловодных периодов является низкое влагосодержание приходящего воздуха (северные траектории) и/или слабые восходящие движения в регионе.

3. Определены условия формирования длительных периодов многоводий и маловодий в бассейне реки Селенги. Засушливый период последних 16 лет

обусловлен снижением роли летнего Восточноазиатского муссона и усилением влияния западных переносов на формирование летних осадков в Монголии и южной части Восточной Сибири. Главной причиной этих изменений является изменение положения фронтальной системы, разделяющей воздушные массы умеренных широт и воздушные массы летнего Восточноазиатского муссона.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах:

Конференция-конкурс молодых ученых ИСЭМ СО РАН «Системные исследования в энергетике» (Иркутск, 2010, 2011, 2012 г.), третья Международная конференция «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов» (Барнаул, 2010 г.), международный семинар «Природная и водная экосистемы оз. Байкал» (Иркутск, 2010 г.), международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Томск, 2011 г.), всероссийская конференция с международным участием «Физика окружающей среды» (Томск, 2011 г.), международная конференция по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды «ENVIROMIS» (Томск, 2010; Иркутск, 2012 г.), международная конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде «CITES» (Томск, 2011 г.), международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике «БШФФ» (Иркутск, 2011 г.), IX Российско-Монгольская конференция по астрономии и геофизике (Иркутск, 2011 г.), XVII конференция молодых географов Сибири и Дальнего Востока «Природа и общество взгляд из прошлого в будущее» (Иркутск, 2011 г.), международная конференция «Региональный отклик окружающей среды на глобальные изменения в Северо-Восточной и Центральной Азии» (Иркутск, 2012 г.)

Личный вклад автора

Основные результаты являются оригинальными и получены либо лично автором, либо при непосредственном его участии. При выполнении работ, опубликованных в соавторстве, автор участвовал в постановке задачи, обработке и интерпретации результатов расчетов.

Объем и структура работы Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка используемых источников и двух приложений. Основной текст изложен на 124 страницах машинописного текста, включает 4 таблицы и 47 рисунков. Список литературы содержит 150 источников.

Краткое содержание работы

Во Введении обсуждается актуальность задачи прогноза гидроэнергетического потенциала ГЭС Ангарского каскада. Рассматриваются чрезвычайные ситуации, связанные с изменением водности в бассейнах оз. Байкала и р. Ангары и их влияние на формирование гидропотенциала. Особое внимание уделяется маловодным периодам притока в водохранилища каскада. Выделение маловодных периодов по степени влияния на ГП Ангарского

каскада гидроэлектростанций в особую категорию определило специфику дальнейших исследований. Главными задачами исследования являются выявление причин маловодий в каждом из водосборных бассейнов, сопоставление особенностей формирования маловодий в современный период и предыдущие десятилетия.

В первой главе диссертации рассматриваются пять длительных периодов снижения ГП: 1899-1905, 1922-1929, 1954-1958, 1976-1982, 1996-2011 гг. Два фактора оказали решающее влияние на размер потерь гидропотенциала в эти периоды – продолжительность маловодных периодов и синхронность фаз наступления маловодий в бассейне оз. Байкал и Братском водохранилище. Показано, что маловодья, приводившие к длительному снижению гидропотенциала, за исключением последнего маловодного периода, наблюдались синхронно в притоках в оз. Байкал и Братское вдх., различной была лишь их интенсивность. Маловодный период 1996-2011 гг. начался синхронно в рассматриваемых бассейнах в середине 90-х гг. прошлого столетия, однако после 2001 года боковой приток в Братское водохранилище начал расти, а в бассейне оз. Байкал снижение притока продолжилось. Нарушение согласованности колебаний стока рек привело к тому, что последний период снижения гидропотенциала оказался не столь катастрофическим, как наблюдавшийся ранее с 1976 по 1982 гг. в обоих бассейнах. Тем не менее, ввиду того, что маловодье в бассейне оз. Байкал длится 16 лет, дефицит ГП за этот период уже составил 47,2 млрд. кв•ч. Поэтому выяснение причин колебаний притока в бассейне оз. Байкал в современный период является приоритетной задачей.

На начальном этапе были исследованы колебания стока основных рек - притоков оз. Байкал – Селенги (49.7% – общего притока в оз. Байкал), Баргузина (6.7%) и В. Ангара (14%), водосборные бассейны которых существенно отличаются по характеру формирования водности. Особое внимание уделено маловодным периодам 1976-1982 гг. и 1996-2011 гг., так как амплитуда колебаний водности рек в эти периоды была особенно значительна. Сопоставление показало, что маловодный период 1976 – 1982 гг. наблюдался на рр. Селенга и Баргузин, на реке В. Ангара в этот период сток был несколько выше нормы. Современный маловодный период захватил бассейн р. Селенги, на реке В. Ангара отмечается увеличение стока, а р. Баргузин заняла промежуточное положение, ее сток в этот период близок к норме. Таким образом, уменьшение притока в оз. Байкал в современный период связано исключительно с низким стоком р. Селенги – главного притока озера. На рис. 1 приведены колебания водности р. Селенги в створе Мостовой (127 км от устья). Видно, что, начиная с 1996 г. происходит уменьшение стока. Сток северных рек бассейна при этом практически не изменился. Более того, в стоке р. В. Ангара намечилось даже некоторое увеличение водности. Снижение притока р. Селенги в последний маловодный период и увеличение притока северных рек привело к заметному изменению их относительного вклада в общий приток в

оз. Байкал. Компенсация дефицита притока р. Селенги стоком северных рек привела к тому, что *наблюдаемое маловодье на Байкале оказалось не столь катастрофичным, как, например, маловодье 1976-1982 гг.*

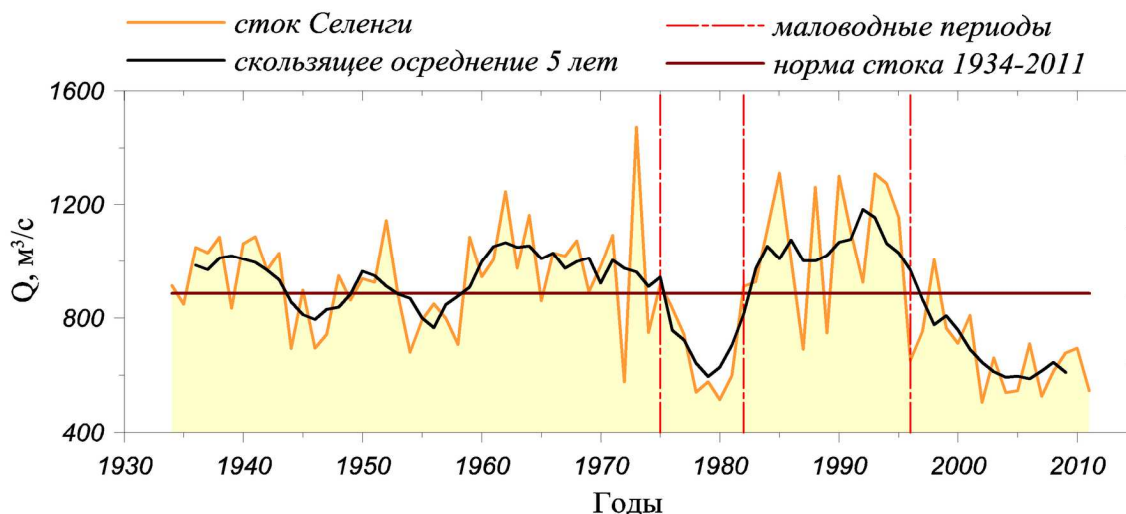


Рис. 1. Колебания среднегодового расхода р. Селенги (г.с. рзд. Мостовой)

Для анализа причин различий стока северных и южных рек бассейна Байкала рассмотрено внутригодовое распределение стока рек. Характер внутригодового распределения стока указывает на то, что для р. В. Ангары основным источником питания являются снегозапасы зимнего периода, для р. Селенги — осадки летнего периода. Сток р. Баргузин в равной мере определяется снегозапасами и летними дождями. Эти выводы, в общем, согласуются с классификацией рек по типам питания, предложенной Давыдовым Л. К., Львовичем М. И., Зайковым Б. Д. Источники питания рек в бассейне Байкала меняются от преимущественно снегового питания на севере (р. В. Ангара) к дождевому питанию на юге (р. Селенга). Реки, расположенные в средней части бассейна, имеют смешанное питание, при этом доля снегового и дождевого стока сильно меняется от года к году (р. Баргузин). Учитывая различие источников питания северных и южных рек, можно предположить, что причиной наблюдаемой рассогласованности стока этих рек могли быть различные тенденции изменчивости зимних и летних осадков. Поскольку в последние десятилетия колебания ГП Ангарского каскада связаны с колебаниями водности р. Селенги, расход которой определяется преимущественно летними осадками, задача анализа и прогноза упрощается — объектом исследования являются процессы формирования стока и выпадения осадков в летний период на ограниченной территории водосборного бассейна реки Селенги.

В первой главе диссертации также приведён обзор работ, посвященных исследованию изменчивости притока в озеро, результаты которых могут быть полезны при анализе возможных причин появления длительных маловодных и многоводных периодов.

Вторая глава диссертации посвящена исследованию закономерностей формирования водного баланса в бассейне р. Селенги и анализу факторов, определяющих сток реки в летний период. Приведены сведения о долговременных изменениях приземной температуры воздуха и относительной влажности в летний период. Показано, что в маловодные периоды притока р. Селенги средние температуры в летние месяцы, как правило, имеют более высокие значения, а величины относительной влажности – более низкие. Особенно заметно эта закономерность проявилась в маловодный период 1996-2011 гг. – рост температуры в это время сопровождался сильным снижением относительной влажности.

Основной особенностью вариаций количества осадков в регионе является высокая межгодовая изменчивость: периоды с экстремально высоким количеством осадков сменяют засушливые периоды, и наоборот. Повторение засух в течение нескольких лет приводит к формированию затяжных маловодий. То, насколько экстремальным будет маловодье, определяется масштабом, величиной и повторяемостью отрицательных аномалий атмосферных осадков в бассейне реки. Для выявления этих особенностей были исследованы сходства и различия в формировании двух наиболее интенсивных маловодных периодов (1976-1982 и 1996-2011 гг.) в бассейне р. Селенги. С этой целью были рассчитаны распределения отклонений летних осадков от нормы за 1950-1990 гг. Общей особенностью этих распределений оказалась тесная связь аномалий осадков в бассейне реки с аномалиями в юго-восточных районах и на восточном побережье Азии. Наиболее сильно эта особенность проявилась во время современного маловодного периода (рис. 2), причем северная граница отрицательной аномалии осадков проходила в районе оз. Байкал.

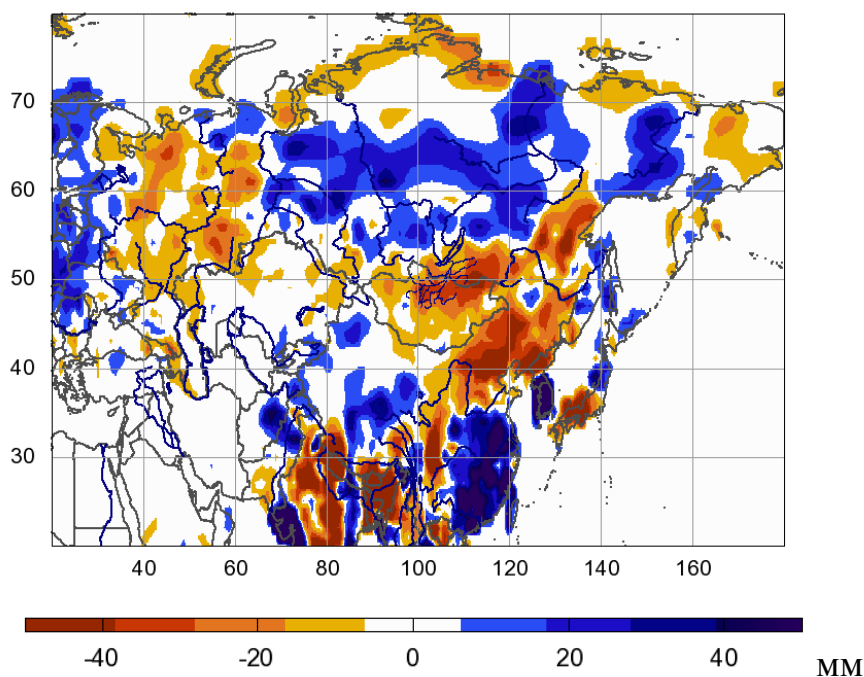


Рис. 2. Отклонение атмосферных осадков от нормы 1950-1990 за июнь-август 1996-2011 гг.

Крупномасштабный характер распределения аномалий осадков неплохо согласуется с результатами зарубежных исследователей⁵, установивших для Восточной Азии несколько характерных типов распределений атмосферных осадков. Преобладающим типом является дипольная структура, северный полюс этой структуры приходится на районы северного Китая, Монголии и Забайкалья на территории РФ, южный – на районы Западного Китая, а также на область “мей-у” (бассейн р. Янцзы). Заметим, что распределение осадков в последние десятилетия также имеет дипольный характер – «сухой север - влажный юг» (*drought-in-north/flood-in-south*) (рис. 2).

Следующим этапом исследования был поиск связи количества выпадающих осадков со свойствами воздушных масс. Для этого были проанализированы зависимости количества осадков от различных соотношений влагосодержания атмосферы (PW) и вертикальной скорости (Omega) на станциях, расположенных в бассейне Селенги (ст. Кяхта и Улан-Удэ). Кроме расчетных величин вертикальных скоростей в качестве косвенной характеристики восходящих и нисходящих движений в атмосфере были использованы значения приземной температуры воздуха. Сопоставление количества выпадающих осадков летнего периода и свойств воздушных масс (рис. 3) показало, что основное количество выпадающих осадков связано с двумя типами атмосферных процессов.

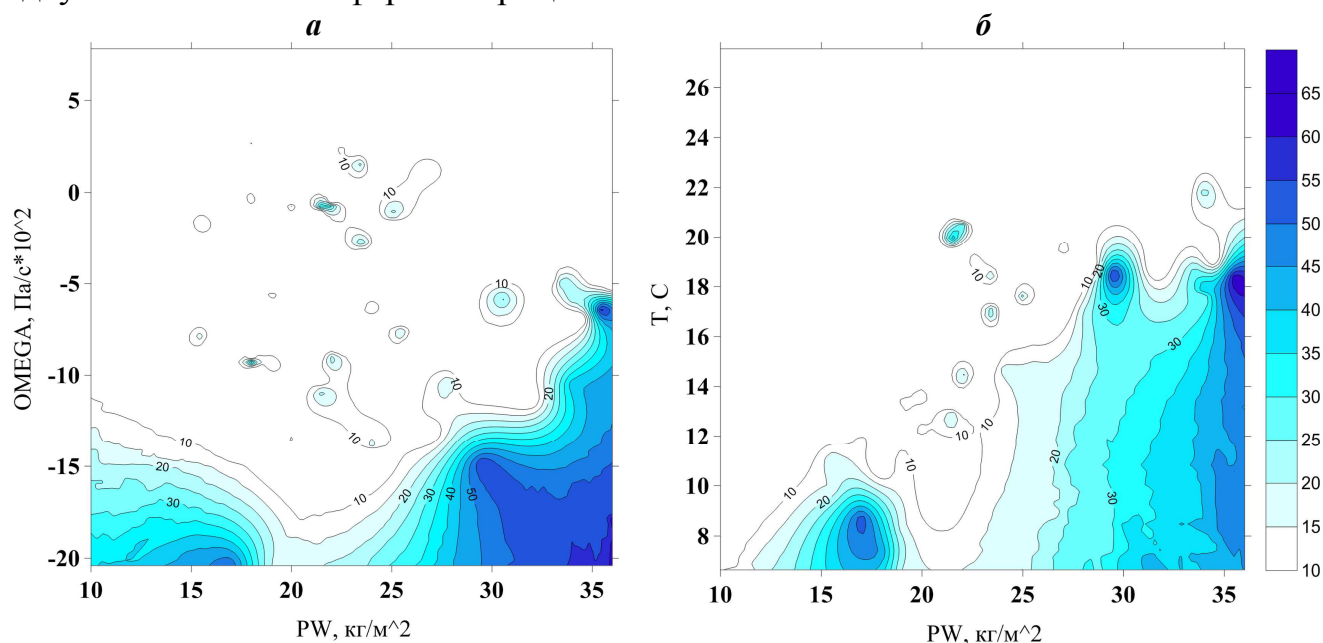


Рис. 3. Зависимости суммарного количества осадков (>5 мм) летнего периода на станциях Кяхта и Улан-Удэ от влагосодержания (PW) и вертикальной скорости в атмосфере (Omega) (а), влагосодержания (PW) и температуры воздуха (T) (б)

⁵Li J., Cook E., Chen F., Davi N., D'Arrigo R., Gou X., Wright W., Fang K., Jin L., Shi J., Yang T. Summer monsoon moisture variability over China and Mongolia during the past four centuries // Geophys. Res. Lett., 2009, Vol. 36., No. 22., P. 6

Максимум осадков наблюдается при сильных восходящих движениях либо во влажной воздушной массе, либо в относительно холодной массе. Первый тип атмосферных процессов характерен для середины лета, второй преобладает в начале и конце летнего сезона. Уменьшение осадков характерно только для середины лета, что, вероятно, связано с уменьшением повторяемости (или интенсивности) процессов, обуславливающих повышенные значения влагосодержания в этот период. Показано, что для рассматриваемого региона в летний период неплохим индикатором вертикальных переносов могут быть значения приземной температуры воздуха - повышенным значениям температуры соответствуют нисходящие движения, а пониженным – восходящие.

Сильная зависимость количества выпадающих осадков от свойств воздушных масс в регионе указывает на то, что для объяснения межгодовых изменений количества выпадающих осадков необходимо изучать области формирования воздушных масс, приходящих в район водосборного бассейна реки Селенги в течение летнего сезона.

В третьей главе диссертации свойства воздушных масс, приходящих в бассейне р. Селенги в многоводные и маловодные периоды, анализируются с помощью траекторных расчетов. В начале главы излагаются методические основы исследования, приводится обзор работ, посвященных изучению свойств воздушных масс, приходящих в южные районы Восточной Сибири. Траекторные расчеты выполнялись для разных периодов водности реки по данным поля скорости NCEP/NCAR Reanalysis на изобарической поверхности 850 гПа. Траектории переноса строились по суточным данным из узлов регулярной сетки, находящихся в пределах водосборного бассейна реки Селенги. В многоводные периоды (1960-1975 гг. и 1985-1995 гг.) для расчетов отбирались дни с максимальным количеством выпавших осадков (в основном, такие события и определяют аномалии всего периода). В маловодные периоды (1976-1982 гг. и 1996-2010 гг.) выбирались дни, в которые осадки либо не выпадали вообще, либо были малы. Одновременно с расчетом траекторий вычислялось среднее количество влаги, переносимой вдоль траекторий. Кроме средних значений влагосодержания (PW) для каждой траектории оценивалось количество дней (n), в течение которых воздушная масса находилась над сушей. Эта величина использовалась в качестве характеристики степени трансформации свойств воздушной массы. Результаты расчетов представлены в таблице 1. На рисунке 4 показаны наиболее часто встречавшиеся типы траекторий воздушных частиц. Оказалось, что наиболее влагонесущими являются воздушные массы юго-восточных (ЮВ) направлений (4.6), приносящие влагу с акваторий Тихого и Индийского океанов (в основном в середине летнего сезона). Наименьшее количество влаги приносят воздушные массы с севера (4.3). Примерно одинаковое, но не экстремальное количество влаги могут приносить воздушные массы западного (4.1) и северо-западного – СЗ (4.2) направлений (в основном в начале и конце летнего сезона).

Траекторные расчеты позволили выявить особенности формирования многоводных и маловодных периодов. В многоводный период 1960 – 1975 гг. переносы имели конвергентный характер. Над регионом встречались воздушные массы разного происхождения (4.7, 4.8), причем в каждом случае присутствовали ЮВ траектории. В многоводный период 1985-1998 гг. наряду с ЮВ траекториями преобладали траектории СЗ (4.2) направлений. Маловодные периоды можно объяснить малым влагосодержанием приходящего воздуха (преобладание северных и западных траекторий) и/или слабыми восходящими движениями – преобладали траектории «вне типа» (4.9). Траектории «вне типа» чаще всего являются признаком переноса в малоградиентном барическом поле. Движение воздушных частиц в этом случае происходит в слабом ветре переменных направлений. Траектории имеют сложный запутанный характер, а длительное пребывание над сушей приводит к трансформации воздушной массы и потере накопленной в источнике влаги. Очевидно, продолжительные аномалии в динамике воздушных масс над регионом связаны с изменениями крупномасштабных систем циркуляции. Выяснению особенностей этих изменений посвящена четвертая глава диссертации.

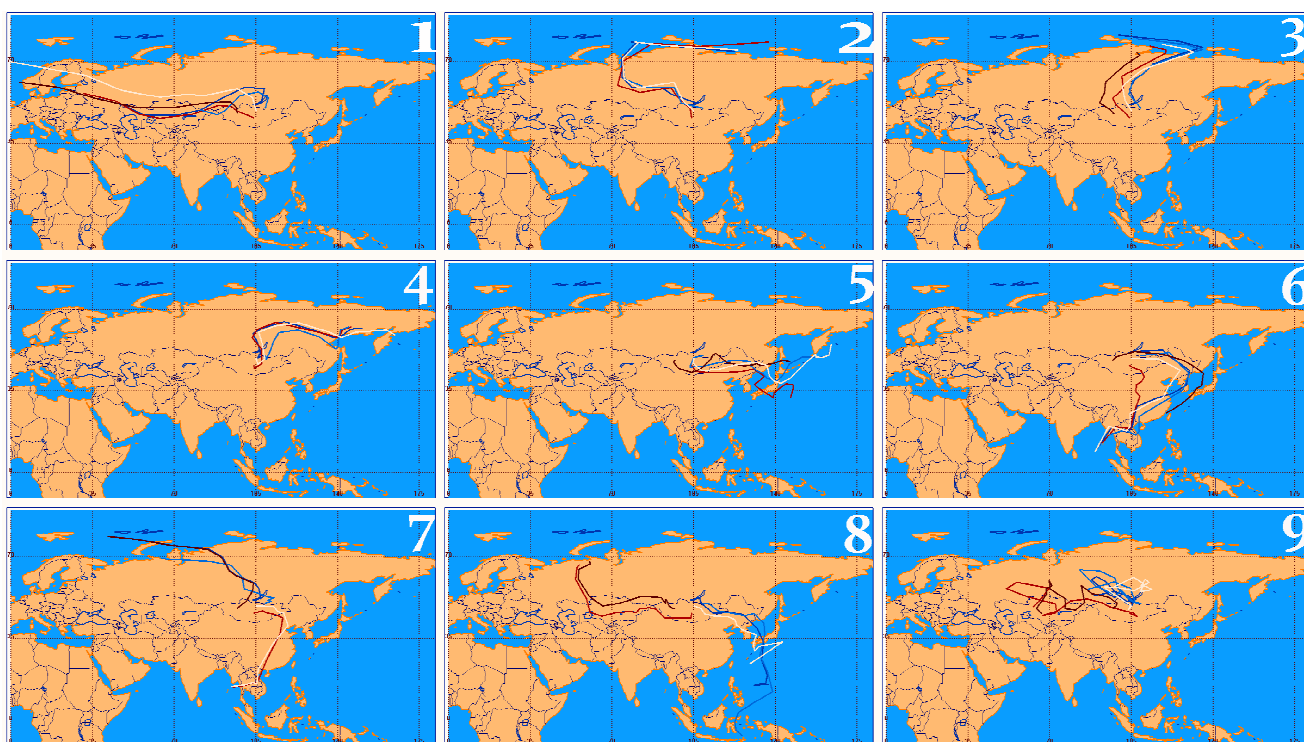


Рис. 4. Траектории переноса воздушных частиц на уровне 850 гПа.

1 – западные, 2 – северо-западные, 3 – северные, 4 – северо-восточные, 5 – восточные, 6 – юго-восточные, 7 – северо-западный/юго-восточный (Индийский океан), 8 – западный/юго-восточный (Тихий океан), 9 – вне типа.

Таблица 1 – Среднее количество влаги (PW), переносимое вдоль различных траекторий воздушных частиц, n – число дней, за которое проводилась оценка (*ИО – Индийский океан, **ТО – Тихий океан)

Год	Направление переноса															
	З		СЗ		С		СВ		В		ЮВ				ВТ	
											ИО*		ТО**			
PW	н	PW	н	PW	н	PW	н	PW	н	PW	н	PW	н	PW	н	
Многоводные периоды																
1962			16.5	10	15.1	6	17.5	9			32.8	10	35.7	6	-	-
1964	20.3	14	12.5	9	-	-	-	-	-	-	36.7	9	35.4	7	-	-
1966	23.5	14	17.7	10	15.2	10	24.3	8	-	-	-	-	39.5	15	-	-
1971	21.4	16	14.4	14	13.3	15	-	-	-	-	36.2	15	30.2	11	-	-
1973	-	-	16.8	10	19.9	13	-	-	-	-	38.2	10	27.1	13	-	-
1985	23.2	15	22.9	6	12.2	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1988	21.0	10	16.2	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1990	24.7	15	18.4	15	17.1	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1993	-	-	-	-	18.1	6	-	-	-	-	-	-	35.0	6	-	-
1998	23.5	15	15.8	8	14.4	9	-	-	28.9	8	-	-	-	-	-	-
Маловодные периоды																
1977	16.2	13	19.0	7	16.3	10	-	-	-	-	-	-	-	-	19.2	30
1978	24.4	12	15.5	10	19.0	7	-	-	-	-	-	-	-	-	19.6	20
1979	19.5	12	23.2	10	19.8	8	19.2	8	-	-	29.8	20	-	-	19.4	20
1980	18.7	16	17.8	7	-	-	-	-	27.9	8	24.8	13	-	-	18.8	29
1981	20.3	15	20.9	10	16.8	9	-	-	28.2	11	-	-	-	-	21.4	20
2002	24.8	10	18.0	10	13.9	10	19.3	12	-	-	-	-	-	-	19.5	20
2003	-	-	16.2	7	13.1	8	-	-	-	-	29.3	14	-	-	-	-
2004	18.0	16	14.9	7	15.6	7	22.1	10	-	-	-	-	-	-	17.2	25
2005	21.3	15	17.0	11	-	-	21.0	10	-	-	-	-	-	-	19.9	19
2007	20.1	12	15.8	10	17.5	10	-	-	-	-	-	-	-	-	22.1	24

Четвертая глава диссертации посвящена изучению долговременных изменений циркуляции в Восточной Азии (ВА). Результаты, полученные в предыдущих главах, показали, что изменения количества выпадающих осадков и, как следствие, увлаженности региона в летний период зависят от состояния фронтальной системы (ФС), разделяющей циркуляцию умеренных широт и тропиков. В пользу этого предположения свидетельствует ряд обнаруженных закономерностей: дипольная структура распределения аномалий осадков в летний период, конвергентный характер траекторий переноса воздушных масс в многоводные периоды стока р. Селенги, а также высокая повторяемость глубоких циклонов в области Монголии⁶. Так как каждая из циркуляций (в умеренных широтах и тропиках) подчиняется своим закономерностям, ФС, интегрирующая эти циркуляции, может испытывать весьма сложные изменения во времени.

Приводится обзор результатов исследований Восточноазиатского муссона, с которым тесно связано формирование фронтальной системы, а,

⁶ Wang X., Zhai P., Wang C. Variations in Extratropical Cyclone Activity in Northern East Asia // Adv. atmos. sci., 2009., Vol. 10., No. 3., P. 471-479

следовательно, и распределение осадков. При сильном муссоне в Восточной Азии происходит смещение ФС в северные районы Китая, Монголию и Забайкалье. В северных районах в этом случае выпадает много осадков, а в области «мей-у» количество осадков уменьшается⁷. Следствием колебаний положения ФС, как уже отмечалось, является дипольная структура в распределении аномалий осадков.

Для анализа долговременных изменений циркуляции атмосферы был проведен качественный анализ изменений пространственной структуры поля скорости в Восточной Азии. Были выделены два периода – 1948-1975 гг. и 1976-2011 гг., отличающиеся по характеру циркуляции. На рис.5 представлены средние поля скорости за эти интервалы времени. В 1948-1975 гг. циркуляция была более интенсивна, сильный Восточноазиатский муссон переносил влагу с юга в среднеширотные области Восточной Азии (область Б); высокими скоростями отличался западный перенос холодного воздуха из умеренных широт через западную Монголию (область А). Во второй период потоки воздуха существенно ослабли, особенно после 1975 г. в период современного маловодья Селенги. Интенсивность Восточноазиатского летнего муссона севернее 30° с.ш. снизилась, что затруднило перенос водяного пара в Северный Китай и Монголию, ослабел западный перенос холодного воздуха из умеренных широт. Снижение интенсивности циркуляции сопровождалось смещением ФС в южные районы Китая. На основании анализа изменений циркуляции в Восточной Азии был предложен метод оценки состояния фронтальной системы. В основу метода положен анализ меридиональной скорости по обе стороны ФС в области потоков умеренных широт (рис. 6, область А) и муссонных потоков Восточной Азии (рис. 6, область Б).

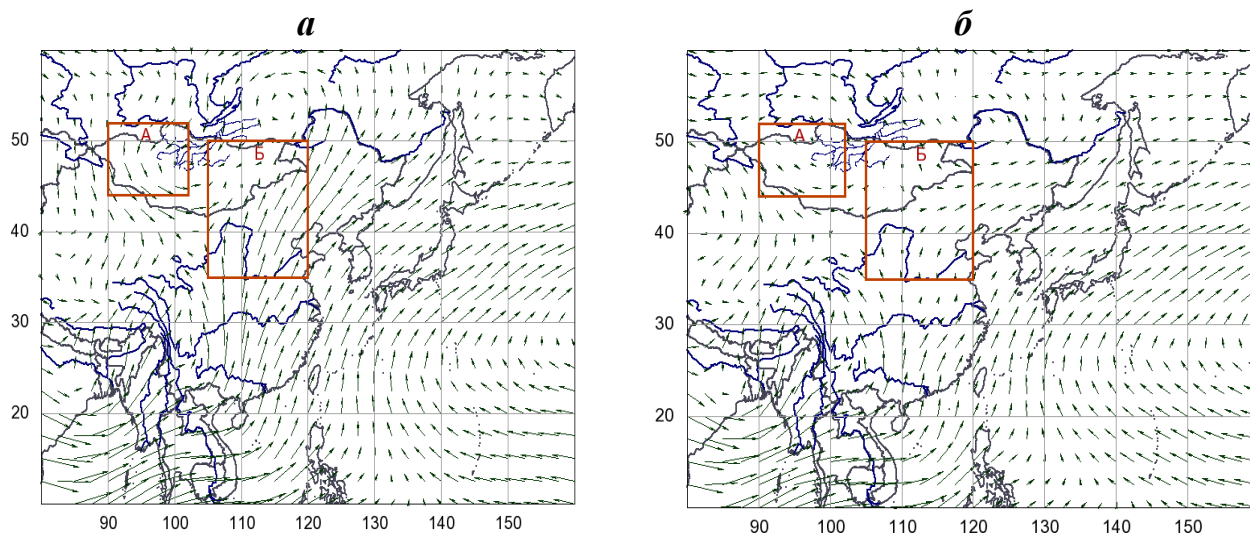


Рис. 5. Осредненные за июнь-август поля скоростей ветра на 850 гПа за периоды: а – 1948-1975, б – 1976-2011 гг.

А-перенос умеренных широт; Б – муссонный перенос

⁷ Wang B., Wu Z., Li J., Liu J., Chang C.-P., Ding Y., Wu G.-X. How to Measure the Strength of the East Asian Summer Monsoon? // J. Climate, 2008, Vol. 21, No. 17, P. 4449-4463

Оказалось, что периоды, выделенные нами по типу циркуляции, отличаются и по характеру изменчивости притока в бассейне Селенги. Для первого периода 1948-1975 гг. характерна невысокая степень межгодовой и декадной изменчивости вариаций стока ($C_v=0,16$). Второй период 1976-2011 гг. отличался более сильными вариациями ($C_v=0,35$), причем, кроме увеличения амплитуды декадных колебаний за счет появления двух глубоких маловодных периодов, возросли и межгодовые вариации стока.

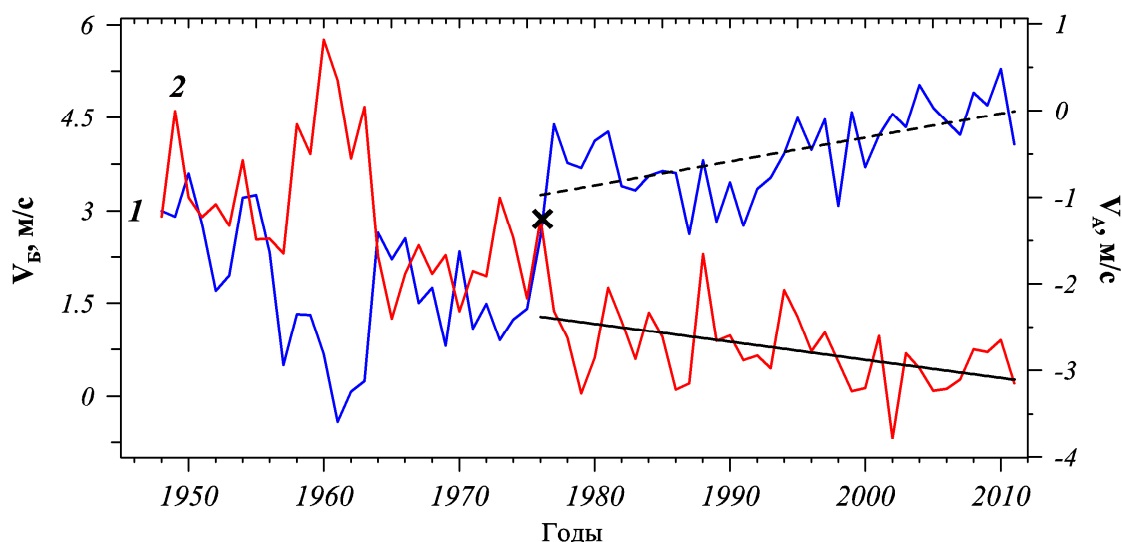


Рис. 6. Долговременные изменения средней меридиональной скорости переноса в области А (V_A) (1), в области Б (V_B) (2). Черными линиями показаны линейные тренды

В завершении главы на основании результатов зарубежных исследователей приводятся оценки возможных будущих изменений гидрометеорологического режима на территории Восточной Азии. Особое внимание уделяется оценкам будущих изменений динамики Восточноазиатского муссона. Потенциально прогноз динамики муссона может быть дан с заблаговременностью от десятилетия. Возможности подобных прогнозов обусловлены наличием квазидесятилетних мод изменчивости климатической системы, в первую очередь связанных с инерционностью океана (например, PDO – Pacific decadal oscillation).

В Заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Анализ гидрологических данных показал, что особенностью современного периода (1996-2011 гг.) является существенное нарушение согласованности притока в оз. Байкал и Братское водохранилище. В отличие от предыдущих лет, увеличение притока в бассейне Братского водохранилища происходит на фоне затяжного маловодья в бассейне оз. Байкал. Основной причиной последнего является уменьшение водности р. Селенги.

2. Причиной современного маловодного периода в бассейне р. Селенги является уменьшение атмосферных осадков летом в регионе, охватывающем

часть Монголии, Север Китая и юг Восточной Сибири на территории России. Северная граница уменьшения атмосферных осадков проходит в районе оз. Байкал и практически не захватывает северные реки-притоки озера.

3. Сопоставление количества осадков, выпадающих в бассейне р. Селенги в летний период, и различных свойств воздушных масс показало, что основное количество осадков связано с двумя типами атмосферных процессов. При наличии восходящих движений большое количество осадков наблюдается либо во влажной воздушной массе, но может наблюдаться и для относительно сухой воздушной массы в случае достаточно низкой приземной температуры. Первый случай характерен для осадков в середине лета, а второй – для осадков в начале и конце летнего периода.

4. Расчет количества влаги вдоль траекторий движения воздушных частиц позволил выделить наиболее влагонесущие воздушные массы – воздушные массы, приходящие с юго-востока и приносящие влагу с акваторий Тихого и Индийского океанов (как правило, в середине лета). Наименьшее количество влаги приносят воздушные массы, приходящие с севера. Достаточно большое, но не экстремальное количество влаги могут приносить воздушные массы, приходящие с запада и северо-запада (как правило, в начале и конце лета). Соответствующие изменения атмосферной циркуляции выявлены для периодов высокого (1950-1960, 1985-1995 гг.) и низкого (1976-1982, 1996-2010 гг.) стока р. Селенги.

5. Обнаружена связь между вариациями стока р. Селенги и изменениями характера циркуляции атмосферы на обширной территории, включающей область распространения Восточноазиатского муссона и южную периферию западных переносов умеренных широт. Взаимодействие между этими потоками приводит к формированию фронтальной системы, от положения и интенсивности которой зависит количество выпадающих осадков. Причиной современного маловодья р. Селенги является общее ослабление циркуляции в районе Монголии и Северного Китая и смещение области конвергенции в более южные районы Китая.

Публикации

Журналы, рекомендованные ВАК для публикации результатов диссертации:

1. Марченко О.Ю., Бережных Т.В., Мордвинов В. И. Экстремальная водность реки Селенги и особенности летней циркуляции атмосферы // Метеорология и гидрология, 2012, №10, с. 81-93

2. Бережных Т. В., Марченко О.Ю., Абасов Н. В., Мордвинов В. И. Изменение циркуляции атмосферы над Восточной Азией и формирование длительных маловодных периодов в бассейне реки Селенги // География и природные ресурсы, 2012, №3, с. 61-68

3. Марченко О.Ю., Мордвинов В. И., Антохин П.Н. Условия формирования и долговременная изменчивость атмосферных осадков летнего

периода в бассейне р. Селенги // Оптика атмосферы и океана, 2012, Т. 25, №12, с. 1084-1090

Главы в монографиях:

4. Abasov N.V., Berezhnykh T.V., Vetrova V.V., Marchenko O. Yu., Osipchuk E.N. Analysis and forecasting of the Baikal region hydropower potential under the conditions of varied climate in book: Risks and Opportunities of the Energy Sector in East Siberia and the Russian Far East – For Better Risk Management and Sustainable Energy Development – Edited by: Lee, Kyong Wan; Ko, Sangtu, P. 320

Материалы конференций:

5. Абасов Н. В., Бережных Т. В., Ветрова В. В., Марченко О.Ю. Пространственно-временная декомпозиция притоков в Ангарский каскад ГЭС в задачах долгосрочного прогнозирования // Мат. Третьей всероссийской конф. с международным участием: Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов, Барнаул, 2010, С. 25-28

6. Абасов Н. В., Бережных Т.В., Ветрова В.В., Марченко О.Ю. Особенности колебаний притока в оз. Байкал в условиях изменения климата // Мат. межд. семинара: Природная и водная системы оз. Байкала, Иркутск, 2010, С. 23-31

7. Marchenko O. Yu, Berezhnykh T.V., Devyatova E. V. A Connection between water content in the rivers of the Baikal Lake basin and variations of general atmospheric circulation // Abstr. Of International Conf. on environmental observation, modeling and information system: Enviromis-2010, Tomsk, 2010, P. 25-26

8. Marchenko O. Yu, Mordvinov V.I. Devyatova E.V. Spatial structure, seasonal and long-term changes of precipitations and their connection with atmospheric circulation variation // Abstr. of International Conf. on environmental observation, modeling and information system: Enviromis-2010, Tomsk, 2010. P. 25

9. Марченко О. Ю. Мордвинов В. И. Осадки летнего периода в бассейне реки Селенги при различных сочетаниях осадкообразующих факторов // В сб. трудов XVII Межд. симпозиума: Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Сборник трудов [Электронный ресурс]. Электрон. текстовые, граф. данные, Томск, 2011

10. Марченко О. Ю., Бережных Т. В., Мордвинов В. И. Особенности летней циркуляции атмосферы и аномалии атмосферных осадков в бассейне р. Селенги // В сб. избранных трудов межд. молодежной школы и конференции CITES-2011, Томск, 2011, С. 99-102

11. Марченко О. Ю., Кочеткова О. С., Мордвинов В. И. Долговременные изменения температуры и влагосодержания атмосферы летом в бассейне р. Селенги // В сб. докладов всероссийской конференции с межд. участием: Физика окружающей среды, Томск, 2011, С. 105-108

12. Кочеткова О. С., Марченко О. Ю., Мордвинов В. И. Исследование обменных процессов в спектре атмосферных движений // В сб. докладов всероссийской конференции с межд. участием: Физика окружающей среды,

Томск, 2011, С. 109-112

13. Кочеткова О.С., Марченко О.Ю., Шиховцев А.С. Оценка климатических условий для астрономических наблюдений // В сб. трудов межд. Байкальской школы по фундаментальной физике, Иркутск, 2011, С. 330-332

14. Марченко О.Ю., Мордвинов В. И., Бережных Т. В., Абасов Н. В. Долговременные изменения общей циркуляции атмосферы на Восточной Азии и колебания увлажненности в бассейне р. Селенги // В сб. избранных тр. межд. конф. Enviromis-2012, Иркутск, 2012, С. 23-26

15. Марченко О. Ю., Бережных Т. В., Абасов Н. В., Мордвинов В. И. Условия формирования и долговременная изменчивость атмосферных осадков летнего периода в бассейне реки Селенги в XX –XXI столетии // Мат. межд. науч. конф.: Региональный отклик окружающей среды на глобальные изменения в Северо-восточной и Центральной Азии, Иркутск, 2012, С. 220-223

16. Девятова Е. В., Мордвинов В. И., Марченко О.Ю., Ознобихина О. А. Динамика тропосферных низкочастотных возмущений над Евразией в летний период // В сб. избранных тр. межд. конф. Enviromis-2012, Иркутск, 2012, С. 17-19

17. Марченко О. Ю., Бережных Т. В., Мордвинов В. И. Исследование аномалий количества атмосферных осадков в бассейне реки Селенги в многоводные и маловодные периоды // Тезисы IX Российско-монгольской конф. по астрономии и геофизике. – Иркутск: Издательство ИСЗФ СО РАН, 2011, С. 30

18. Марченко О. Ю. Бережных Т. В. Роль пространственно-временного распределения атмосферных осадков в декомпозиции стока рек бассейна оз. Байкал // В сб. докладов XVII научной конф. молодых географов Сибири и Дальнего Востока: Природа и общество: взгляд из прошлого в будущее, Иркутск, 2011, С. 38-40

19. Марченко О. Ю. Исследование территориальной неоднородности колебаний водности в бассейне оз. Байкал в условиях глобального изменения климата // В сб. тр. молодежной конференции: Системные исследования в энергетике, Иркутск, 2010. Вып.40, С. 221-226

20. Марченко О. Ю., Кочеткова О. С. Колебания водности в бассейне реки Селенги и долговременные изменения характеристик общей циркуляции атмосферы // Тезисы XII конференции молодых ученых: Взаимодействие полей и излучения с веществом, Иркутск, 2011, С. 92

Отпечатано в издательском отделе

ИСЭМ СО РАН

Заказ №87 «24» апреля 2013 г.

Объем 19 с. Тираж 100 экз.