DOI: 10.21513/2410-8758-2018-1-10-27 УДК 551. 513+556.123

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В АТМОСФЕРЕ, ОБУСЛАВЛИВАЮЩИЕ АНОМАЛИИ ОСАДКОВ В ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ И МОНГОЛИИ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

О.Ю. Антохина [1)], П.Н. Антохин [1)], Е.В. Девятова [2)**], В.И. Мордвинов [2)]*

[1)] Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,
Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1;*antokhina@iao.ru

[2)] Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291;**devyatova@iszf.irk.ru

Резюме. Статья посвящена исследованию причин колебания суммы июльских осадков в бассейне оз. Байкал. Одной из преобладающих в бассейне в этот период является дипольная мода, характеризующая противофазные колебания осадков в Восточной Сибири и Монголии. Основное внимание в исследовании уделено особенностям формирования крупномасштабных аномалий осадков, обусловленных устойчивыми процессами в атмосфере – блокингами. Для их выявления используются критерии Тибалди и Молтени. В работе установлено, что состояние дипольной моды с отрицательной аномалией осадков в Восточной Сибири и положительной аномалией в Монголии сопровождается блокированием над Восточной Сибирью и циклонической циркуляцией над Монголией. В последней принимают участие воздушные массы летнего муссона Восточной Азии. Противоположному распределению аномалий осадков соответствует барическая ложбина над Восточной Сибирью, а над Монголией атмосферное давление в этот момент повышено.

Ключевые слова. Восточная Сибирь, Монголия, атмосферные осадки, дипольная мода, блокинг, критерий блокирования, летний муссон.

DYNAMIC PROCESSES IN THE ATMOSPHERE DETERMINING SUMMERTIME PRECIPITATION ANOMALIES IN THE WESTERN SIBERIA AND MONGOLIA

O.Yu. Antokhina[1)], P.N. Antokhin[1)], E.V. Devyatova[2)**], V.I. Mordvinov*

[1)]V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS,
1, Academician Zuev sq. 634055,Tomsk, Russia;* *antokhina@iao.ru*

[2)] Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
126a, Lermontov Street, 6664033, Irkutsk, , Russia; ***devyatova@iszf.irk.ru*

Summary. Causes of variations in July precipitation total in the Lake Baikal basin are studied in this paper. In summertime, one of the prevailing mode in the

basin is the dipole mode characterizing the reverse-phase fluctuations in precipitation in East Siberia and Mongolia. The attention in the paper is paid mainly to the peculiarities of the formation of large-scale anomalies in precipitation determined by persistent processes in the atmosphere, so called blockings. Criteria by Tibaldi and Molteni are used for the detection of blockings. The analysis showed that the dipole mode state with negative precipitation anomaly in Eastern Siberia and positive precipitation anomaly in Mongolia is accompanied by the blocking over Eastern Siberia and cyclonic circulation over Mongolia. The air masses of the East Asian summer monsoon take part in latter process. The pressure trough over Eastern Siberia and ridge over Mongolia corresponds to the dipole mode state with the opposite distribution of precipitation anomalies.

Key words. Eastern Siberia, Mongolia, atmospheric precipitation, dipole mode, blocking, blocking criterion, summer monsoon.

Введение

В течение уже двух десятилетий в бассейнах озера Байкал и реки Селенги (главного притока в озеро) продолжается маловодный период (Бережных и др., 2012; Синюкович и др., 2013; Бычков и др., 2015; Никитин и др., 2016). Побив все инструментально зафиксированные рекорды продолжительности, современное маловодье из тревожного факта превратилось в масштабную катастрофу. За исключением 1998 и 2012 гг., когда в бассейне Селенги наблюдались достаточно высокие паводки, водность реки ни разу не превысила норму. Паводок 2012 г. (Ильичев и др., 2014) внушил надежду на окончание маловодья, однако в 2014 году показатели стока вновь оказались рекордно минимальными (Никитин и др., 2016). Наряду с ухудшением климатических условий, дополнительные трудности в оценке будущих изменений стока Селенги и притока в озеро Байкал внесло анонсирование правительством Монголии строительства ряда ГЭС на Селенге (Чалов и др., 2016, Бычков и др., 2017). В связи с этим в последние несколько лет появилось много работ, посвященных различным аспектам использования водных ресурсов Селенги (Чалов и др., 2016; Бычков и др., 2017), регулирования уровня оз. Байкал (Никитин и др., 2016; Бычков и др., 2015; Болгов и др., 2017), прогнозам стока в бассейне р. Селенги и оз. Байкал (Болгов и др., 2017; Törnqvist et al., 2014). Неясно, однако, насколько эффективными окажутся меры, принимаемые для снижения потерь при тех или иных ожидаемых колебаниях водности.

Бассейн Селенги, расположенный в полузасушливых районах на границе аридного пояса Азии (см. рис. 1), относят к областям крайне уязвимым к изменению окружающей среды, особенно в период глобальных климатических изменений (Karthe et al., 2015). Уже сейчас длительный засушливый период и усиливающиеся темпы хозяйственной деятельности привели к увеличению площади пустынь, снижению лесов и деградации земель (Сутырина, 2015). А результаты недавних работ по дендрореконструкции стока на территории Монголии (Davi et al., 2013) (рр. Ерее-Гол и Селенга) указывают на то, что длительные засушливые периоды типичны для бассейна Селенги и

последнее маловодье является, скорее, правилом, чем исключением. Авторы, кроме того, подчеркивают, что увлажнённость в Монголии и Северном Китае (М-К) на протяжении XX века была не характерной для исследуемой территории. Как показано в работе (Li et al., 2009), в середине XX века на территории М-К была самая высокая увлажненность за последние 400 лет. Длительный период маловодья может быть весьма тревожным симптомом перехода климата этого региона к более засушливым условиям, а это означает, что в будущем мы можем ожидать совершенно другие показатели стока р. Селенги, а, соответственно, и притока в оз. Байкал. По нашему мнению, ни правительство, ни ученые не готовы к ситуации, когда средняя водность Селенги будет в разы меньше той, что наблюдалась с 1934 по 1996 гг., а многоводные периоды будут гораздо менее выраженными, чем в 1985-1995 гг. Поэтому крайне важно понимать, какова причина наблюдаемого маловодья, является ли оно типичным или климат региона действительно переходит к новому климатическому режиму, связанному с глобальным изменением климата. В первую очередь для ответа на этот вопрос необходимо суммировать сведения относительно наблюдаемого маловодья и периодов длительных засух в целом.

Климатические изменения в области бассейна Селенги и на сопредельных территориях описаны в большом количестве работ (Бережных и др., 2012; Törnqvist et al., 2014; Batima, 2005; Ding et al., 2008; Обязов, 2015; Shen et al., 2009; Schubert et al., 2014; Tang et al., 2012; Karthe et al., 2015). Установлено, что эти изменения происходят как зимой, так и летом и затрагивают как российскую, так и монгольскую части бассейна. В последние десятилетия в бассейне Селенги происходит таяние ледников и многолетней мерзлоты (Karthe et al., 2015; Törnqvist et al., 2014), зимний сток при этом возрастает (Törnqvist et al., 2014). На сохранение этих тенденций в будущем указывают авторы (Törnqvist et al., 2014), использовавшие для прогноза ансамбль моделей CMIP5 (WCRP). Авторы (Törnqvist et al., 2014), однако, подчеркивают, что ожидаемое увеличение стока незначительно по сравнению с различиями в результатах отдельных моделей. Большой разброс в модельных оценках обусловлен, вероятно, тем, что в прогнозе не учитывались тенденции климатических изменений летнего периода, определяющего среднегодовой сток Селенги на 70% (Бережных и др., 2012). А ведь именно в летний период происходят наиболее драматические изменения в динамике осадков (снижение) и температуры (рост) (Бережных и др., 2012; Batima, 2005; Обязов, 2015; Schubert et al., 2014; Tang et al., 2012). Ускоренные темпы этих изменений характерны для современного маловодья на Селенге.

Когда длительность маловодья превысила 10 лет, появился ряд публикаций, в которых были предприняты попытки объяснить происходящее снижение осадков и связать его с глобальными климатическими перестройками на территории Азии. Оказалось, что в период последнего маловодья климатические изменения на юге бассейна Байкала (по большей части территория бассейна Селенги) были тесно связаны с климатическими изменениями в Северном Китае (Shen et al., 2009; Ding et al., 2008). А снижение стока Селенги происходило синхронно со снижением стока Хуанхэ (Piao et al.,

2010). Аномалии осадков в 1996-2010 гг. охватили большую часть Монголии, Северного Китая и юга Забайкалья на территории РФ (Юг Забайкалья - север Восточной Азии).

Анализ факторов, влияющих на выпадение осадков в области ЮЗ-СВА (Бережных и др., 2012), обозначил в качестве основной причины современного маловодья уменьшение повторяемости процессов фронтогенеза, развивающихся при взаимодействии воздушных масс умеренных широт и летнего муссона Восточной Азии (EASM). Авторы статьи отметили также, что изменения коснулись не только фронтогенеза – над Монголией более часто стали формироваться области высокого давления, этот же факт нашел подтверждение во многих работах (Schubert et al., 2014; Антохина и др., 2015; Zhu et al., 2012). Следствием этой тенденции был рост температуры и снижение количества конвективных осадков в летний период. Масштаб процессов указывает на то, что происходящие изменения являются частью изменений общей циркуляции атмосферы на территории Евразии.

Не вызывает ни малейшего сомнения необходимость дальнейшего исследования факторов осадкообразования в бассейне Селенги в летний период, а также поиска ответов на самый волнующий вопрос: что же произойдет с водностью в ближайшие 10-20-30 лет. Цель нашей работы – показать, что ответы на вопросы о будущем Селенги связаны с исследованиями процессов циркуляции атмосферы, ответственных за формирование квазистационарных волн Россби и блокирований в атмосфере. По нашему мнению, от того как будут развиваться наши знания этих процессов над Евразией, будет зависеть понимание вариаций водности р. Селенги и оз. Байкал в будущем.

Связь выпадения атмосферных осадков над бассейном Байкала с особенностями циркуляции атмосферы

Блокирующие процессы и квазистационарные волны Россби

Чаще всего длительные крупномасштабные аномалии осадков в умеренных и субтропических широтах объясняют либо блокингами, либо квазистационарными волнами Россби (Antokhina et al., 2016; Hong C.-C. et al., 2011; Schubert et al., 2014; Sato et al., 2006; Iwasaki et al., 2006). Блокинги могут стационировать в течение нескольких недель, создавая длительные погодные аномалии (осадки в одних районах, засухи в других). В зависимости от конфигурации барического поля выделяют два основных типа блокирования (Pelly et al., 2003): монопольный и дипольный. Монопольный блокинг (Омега - блокинг (Ω)) представляет собой усилившийся гребень высокого давления, у основания которого с обеих сторон расположены атмосферные ложбины. Дипольный блокинг (Рекс-блокинг) (Rex, 1950) напоминает цифру «8» и состоит из блокирующего антициклона и циклона, соответственно, в северной и южной части области блокирования (в Северном полушарии).

Квазистационарные волны Россби представляют собой цепочки аномалий барического поля (и связанные с ними аномалии температуры, скорости ветра и т.д.), обусловленные либо внешними источниками завихренности, либо вну-

тренней неустойчивостью течения. Вообще говоря, рассматривать их как альтернативные причины аномалий осадков было бы неправильно. Скорее всего, квазистационарные волны Россби являются первым этапом развития крупномасштабных атмосферных процессов, а блокирование – заключительным этапом после роста амплитуды и обрушения волн. Действительно, в последние годы в качестве процессов, связанных с развитием блокингов, а вместе с ними и появлением чередующихся знакопеременных барических структур, все чаще рассматривают генерацию и распространение квазистационарных волн Россби от удаленных источников (Schneidereit et al., 2012). Считается, что образование блокингов является результатом неустойчивости и разрушения (опрокидывания) длинных планетарных волн (Nakamura et al., 1997). Удаленными энергетическими источниками волн могут быть термические аномалии, обусловленные особенностями циркуляции в тропиках (Henderson et al., 2016; Barriopedro et al., 2014) и процессами в энергоактивных зонах (Варгин и др., 2012), в том числе, в Северной Атлантике.

Российские метеорологи в работах по типизации синоптических процессов обращали внимание и на региональные факторы, способствующие образованию блокингов – вторжения в умеренные широты холодных масс воздуха и выходы южных циклонов. На основании этих признаков осуществлялась, в частности, типизация синоптических процессов в методе, предложенном Б. Л. Дзердзеевским (Dzerdzeevskii, 1962). Авторы (Antokhina et al., 2017) пришли к выводам, что в процессах формирования блокингов над Евразией принимают участие оба фактора: распространение волны Россби вдоль струйного течения и локальное усиление длинных волн вследствие адвективных процессов. Первичным этапом является распространение вдоль струйных течений длинных волн с нарастающей амплитудой из зон активного энерговыделения. Этот процесс более вероятен над Европейской или Сибирско-Уральской территорией. Над Восточной Сибирью и российским Дальним Востоком к локальному усилению длинных волн, их опрокидыванию и формированию блокирующих структур приводят адвекция холода с севера Азии и тепла из области EASM. Для территории Азии как повторяемость блокирований (Tibaldi et al., 1990), так и максимальная интенсификация распространения волн Россби (Sato et al., 2006) приходятся на середину летнего сезона, поэтому в данной статье в качестве объекта мы детально рассмотрим закономерности развития евразийских блокингов в июле.

Режимы атмосферных осадков в бассейне озера Байкал

Смена любых устойчивых атмосферных процессов, будь то квазистационарные волны или блокирующие антициклоны, приводит к существенному перераспределению атмосферных осадков. В этом отношении территория Евразии в летний период является рекордсменом по соседству аномалий осадков разного знака (Schubert et al., 2014).

Устойчивые режимы колебаний осадков в определённых областях мы будем в дальнейшем называть «Модами». Для территории, включающей бассейн оз. Байкал с помощью разложения на естественные ортогональные

функции (ЕОФ) выделены две преобладающие моды (Li et al., 2009; Iwao et al., 2006). **Первая мода** представляет собой качельное колебание осадков (seesaw mode) между Восточной Сибирью (ВС) и Монголией (М) (Iwao et al., 2006) (рис. 1) (область ЕОФ разложения ограничена 35-65° с.ш., 90-115° в.д.), далее в тексте мы будем обозначать эту моду ВС-М. Согласно результатам применения метода главных компонент, первая составляющая PC1, соответствующая ВС-М колебанию, обеспечивает примерно 16% изменчивости. При положительном значении PC1 преобладают аномалии «засуха в Восточной Сибири – наводнение в Монголии», при отрицательном значении PC1 аномалии меняют знак. Во время маловодья на Байкале мода ВС-М была, в основном, отрицательной. **Вторая мода** характеризует колебания осадков между ЮЗ-СВА и южным Китаем (ЮК) (рис. 1). Это довольно известная мода, часто называемая в литературе «drought-in-north-flood-in-south»/ «flood-in-north-drought-in-south» (Shen et al., 2009; Li et al., 2009). Согласно оценкам (Li et al., 2009) (область ЕОФ разложения ограничена государственными границами Китая и Монголии), вклад этой моды в общую изменчивость поля индекса суровости засух Палмера в Китае и Монголии составляет 25.93%. В 1996-2010 усилению отрицательной фазы этой структуры соответствовали засуха в ЮЗ-СВА и наводнения в бассейне Янцзы (Ding et al., 2008; Shen et al., 2009; Li et al., 2009; Бережных и др., 2012).

Непосредственной причиной возникновения второй моды в распределении осадков являются колебания циркуляции атмосферы между состояниями, которые обычно называют «сильным» и «слабым» муссоном. Традиционно в китайской метеорологии принято считать, что сильный муссон интенсивно переносит влагу в северные районы Восточной Азии, слабый муссон далее 30° с.ш. не распространяется (Wang et al., 2008). Необходимым условием существования сильного муссона является развитие фронта муссона и/или возникновение циклонических возмущений во внетропических районах Восточной Азии (Хромов, 1956).

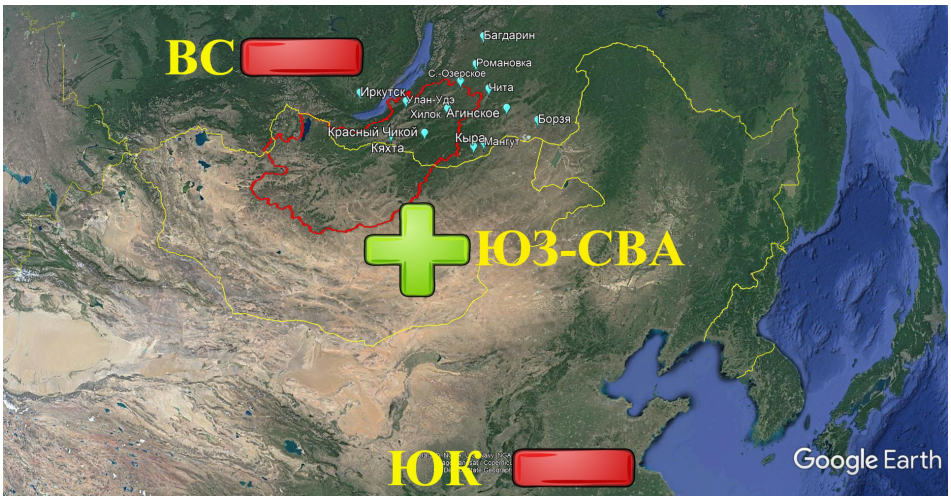


Рисунок 1. Карта-схема района, включающего бассейн р. Селенги (красный контур), а также схематическое изображение мод атмосферных осадков над Восточной Азией

Структура второй моды по типу «drought-in-north-flood-in-south» связана с ситуацией, когда циклоничность в районе ЮЗ-СВА не развивается, и фронт муссона располагается на юге в районе бассейна Янцзы. Эта ситуация имела место, в частности, в 1996-2010 гг., когда над Монголией часто возникали высокие антициклонические образования (Бережных и др., 2012, Schubert et al., 2014). Вторая, обратная по знаку, структура «flood-in-north-drought-in-south» возможна при развитии циклоничности над ЮЗ-СВА, муссон в таком случае смещается из района Янцзы к северу. С возникновением циклоничности и фронта муссона в районе ЮК-СВА тесно связана и конфигурация диполя ВС-М. Разумно предположить, что состоянию сильного муссона соответствует ВС-М мода с осадками над Монголией и засухой над Восточной Сибирью, а периоду слабого муссона обратная конфигурация ВС-М.

Наряду с описанными преобладающими модами существуют и другие заметные аномалии в распределении осадков над бассейном озера Байкал. Наиболее значительные по последствиям – полное отсутствие осадков в южной и северной частях озера в 2014 и 2015 гг. и сильные повсеместные дожди в 1971 и 1973[1] гг. Подобные аномалии редки и связаны, вероятно, с нетипичными для данного региона формами циркуляции. Мы в своем исследовании основное внимание концентрируем на особенностях формирования ВС-М моды. Согласно нашим предыдущим исследованиям именно эта мода несет ответственность за распределение аномалий осадков в бассейне Байкала в период 1996-2010 (Бережных и др., 2012).

Связь колебаний осадков с блокирующими процессами

В работе (Antokhina et al., 2016) авторы показали, что летом тенденции увеличения количества осадков в Восточной Сибири и уменьшения над Монголией связаны с развитием блокирующих процессов над Восточной Европой (Е), в свою очередь, при блокировании над Восточной Сибирью (ВС) ситуация обратная – много осадков выпадает в Монголии и мало в Восточной Сибири. Для того чтобы проиллюстрировать связь ВС-М моды и блокирования рассмотрим два примера: июль 1993 и 1980 гг. Согласно (Iwao et al., 2006), в июле 1993 г. ВС-М была положительна (засуха в Восточной Сибири и экстремально высокие осадки в Монголии), в 1980 г. ВС-М имела обратный знак. Сопоставим аномалии осадков с положением блокингов в эти периоды. На рис. 2 (слева) представлены долготно-временные диаграммы индексов блокирования[2] по Тибалди и Молтени (Tibaldi et al., 1990), рассчитанные по данным ECMWF Era Interim (Dee et al., 2011). На рис. 2 (справа) – распределения аномалий атмосферных осадков на территории Евразии. На рис. 2 и далее в работе, аномалии осадков рассчитаны на основе данных GPCC - The Global Precipitation Climatology Centre (Schneider et al., 2014). Данные о среднем

[1] С аномалиями осадков за каждый год можно ознакомиться: https://kunden.dwd.de/GPCC/Visualizer

[2] Подробное описание алгоритма расчета с помощью критерия можно посмотреть в (Антохина и др., 2017).

количестве осадков за период 1951-1990 гг. также взяты из базы GPCC (GPCC Climatology Version 2015). Разрешение данных 1° по широте и долготе.

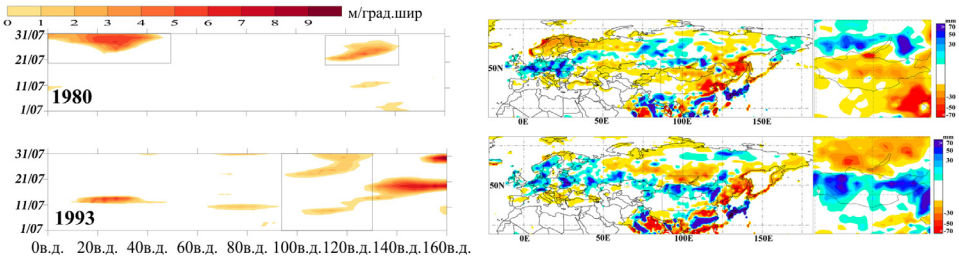


Рисунок 2. Долготно-временные диаграммы блокирования (показатель GHGS) (слева), аномалии атмосферных осадков (справа) в июле

На рисунке справа хорошо видно, что для 1993 и 1980 гг. характерны аномалии в распределении осадков, имеющие дипольную структуру в регионе ВС-М и квадрупольную структуру в целом над Европой и Сибирью. Анализ рис. 2 слева показывает, что в июле 1980 г. преобладали блокирования над Европой и Дальним Востоком, а в июле 1993 – над Восточной Сибирью и Западной частью Тихого океана. Рассмотрим вариации осадков в эти периоды в области положительных частей диполя ВС-М. Для этого мы предварительно проанализировали суточные данные по атмосферным осадкам из архива ВНИИГМИ-МЦД (здесь и далее станционные осадки взяты из архива (Описание массива суточной…, электронный ресурс) и выбрали станции в районах положительной аномалии осадков. На рис. 3 приведены гистограммы, показывающие динамику осадков для июля 1980 г. (рис. 3а) по станциям Сосново-Озерское, Романовка, Чита, Агинское, Багдарин, Иркутск, а для июля 1993 г. (рис. 3б) по станциям Кыра, Мангут, Агинское, Борзя.

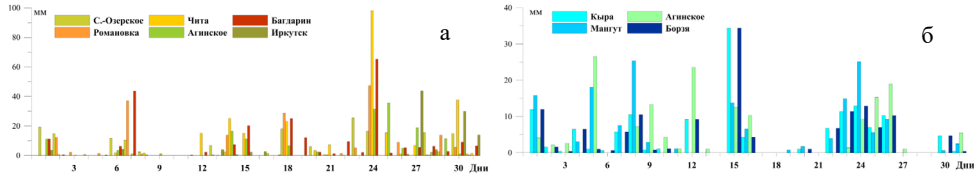
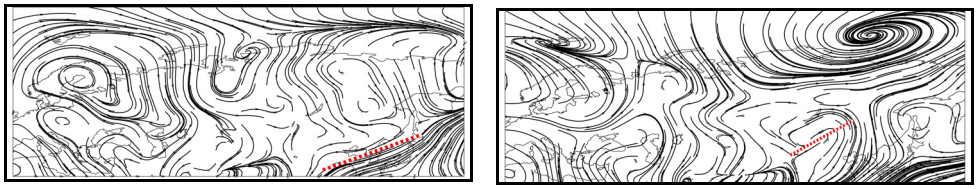


Рисунок 3. Межсуточная динамика количества осадков в июле 1980 (а) и 1993 (б)

Видно, что в 1980 г. основное количество осадков пришлось на период блокирования с максимумом 24 июля. В июле 1993 г. осадки выпадали практически весь месяц с 1 по 15 и с 22 по 27 июля. Для наглядного представления основных циркуляционных особенностей в периоды блокирования на рис. 4 показаны линии тока поля скорости на 850 гПа по данным (Kalney et al., 1996). Этот уровень весьма удобен для анализа, т.к. отражает как положение блокирующих образований, так и конфигурации муссонных потоков.

В 1980 (рис. 4а) хорошо виден блокирующий антициклон над Европой, ложбина над Сибирью и гребень над Дальним Востоком. Распределение этих барических образований согласуется с аномалиями атмосферных осадков, приведенными на рис. 2. Положение ложбины благоприятно для выпадения

осадков над Восточной Сибирью. В Монголии, напротив, конвергенция атмосферных потоков отсутствует, и осадки не выпадают. В 1993 г. блокирующий антициклон выражен слабее. В Восточной Сибири можно выделить две области: южную зону затишья с антициклонической циркуляцией и северную циклоническую зону. Обе зоны находят отражение в распределении аномалий осадков. Над Монголией видна область с циклонической циркуляцией, способствующей вовлечению муссонного воздуха. Следует отметить, что именно над Монголией в двух рассмотренных случаях отчетливо проявляются различия в поведении муссонной циркуляции.



а б

Рисунок 4. Усредненные линии тока поля скорости на 850 гПа.
а - с 20 по 31 июля 1980, б - с 1 по 31 июля 1993 г.
Красным обозначено схематическое положение фронта EASM

Приведенные примеры подтверждают, что обнаруженная в (Iwao et al., 2006) мода изменчивости осадков и корреляции, найденные в (Antokhina et al., 2016), связаны между собой. Они указывают на то, что одним из основных факторов, регулирующих структуру аномалий поля осадков, действительно является атмосферное блокирование над Евразией. На основании рассмотренных примеров можно предположить, что развитию фронтальной системы летнего муссона Восточной Азии, с которой связано большое количество осадков в Монголии, действительно способствовала антициклоничность над Восточной Сибирью. Блокинги, возникающие над Европой, приводят в регионе М-ВС к противоположным распределениям аномалий осадков.

Вообще говоря, ситуация с отсутствием осадков над Монголией в случае блокирования над Европой кажется довольно очевидной. Согласно результатам (Schubert et al., 2014; Iwasaki et al., 2006) блокирующий антициклон над Восточной Европой сопровождается развитием положительной аномалии давления над Монголией и дальнейшим развитием гребня над Байкалом. Гребень в районе Байкала также может стать блокирующим (причем блокирование возникает восточнее Байкала), это иллюстрирует диаграмма рис. 2. С точки зрения синоптики «невыпадение» осадков в Монголии также вполне объяснимо, так как здесь длительное время располагаются сухие воздушные массы центральной части континента, к тому же антициклонический характер циркуляции способствует подавлению конвекции. Гораздо сложнее объяснить формирования положительной аномалии осадков и паводков в Монголии при наличии блокинга над Восточной Сибирью.

Динамические процессы при блокировании над Восточной Сибирью, сопровождающиеся выпадением осадков в бассейне р. Селенги

Для исследования особенностей циркуляции атмосферы во время блокингов над Восточной Сибирью мы выбрали на диаграммах повторяемости за 1979 - 2017 гг. периоды, во время которых блокирования регистрировались в зоне от 90° до 110° с. ш. (центр области в Восточной Сибири, исследуемой в (Antokhina et al., 2016)). Условием отбора было наличие блокинга (или суммарной продолжительности кратковременных блокирований) не менее 5 дней. Для выбранных лет были проанализированы распределения аномалий атмосферных осадков. Согласно работе (Antokhina et al., 2016) ожидалось, что при блокировании в области 90-110° в.д. должны выпадать осадки в области аридного пояса Азии, на окраине которого расположен бассейн реки Селенги. Анализ данных показал, однако, что связь между ВС блокингами и осадками в бассейне Селенги является более сложной.

На рис. 5. приведены диаграммы блокирований и распределения аномалий осадков за 1984, 1986, 1990, 1996, 1998, 2006, 2012 гг.

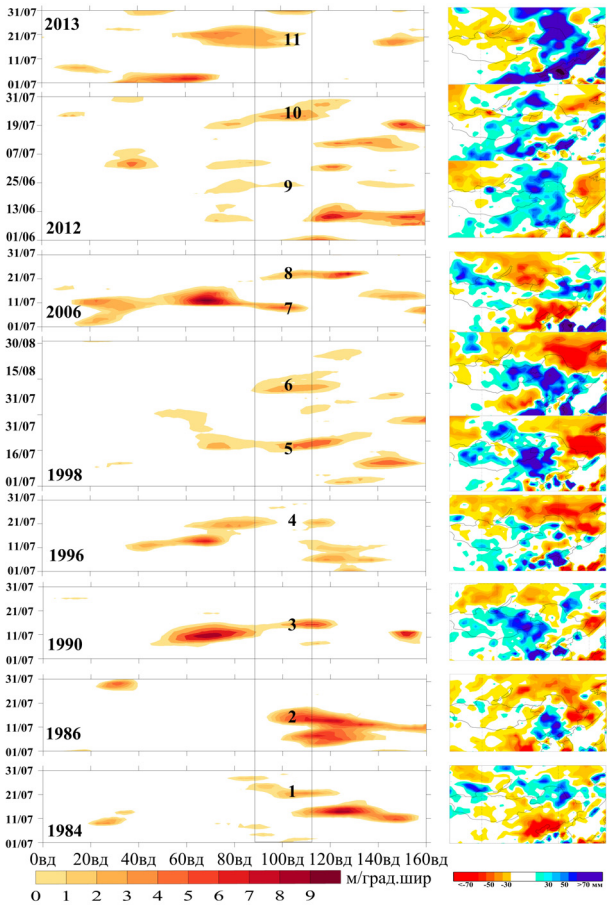


Рисунок 5. Долготно-временные диаграммы блокирования *показатель GHGS) (слева), аномалии атмосферных осадков (справа)*

Для 1998 и 2012 гг., кроме июля, приведены данные за смежные месяцы (август и июнь соответственно) со схожими условиями циркуляции и выпадения осадков. Видно, что три года, в 1984, 1986 и 2013 гг., несмотря на наличие блокингов в области 90° - 110° в.д., осадки в бассейне Селенги были либо около нормы, либо ниже нормы. В остальные годы регистрировались существенные аномалии осадков к юго-востоку от оз. Байкал. Мы предположили, что наличие блокинга над Восточной Сибирью является необходимым, но недостаточным условием для выпадения осадков в бассейне Селенги. Дополнительный анализ показал, что во время аномальных осадков блокированию над Восточной Сибирью предшествовало блокирование над Западной Сибирью, т.е. условие выпадения осадков в бассейне Селенги имело динамический характер – осадки выпадали, если блокинг смещался из Западной Сибири в Восточную Сибирь.

Для подтверждения предложенной схемы рассмотрим особенности циркуляции атмосферы в периоды экстремальных осадков в 1990, 1993, 1998, 2012 гг. Для 1993 г. мы кратко уже упоминали о развитии муссонного переноса и выпадении осадков. Остановимся подробнее на особенностях циркуляции в 1990, 1998 и 2012 гг. Для периодов блокирования 3, 5, 6, 9, 10 были проанализированы распределения поля скорости на уровне 850 гПа (Kalney et al., 1996) и распределения потенциальной температуры на динамической тропопаузе PV-θ (Dee et al., 2011). Динамическая (изоэртелическая) тропопауза при некоторых допущениях (Hoskins et al., 2007) может рассматриваться как квазиматериальная поверхность, вдоль которой осуществляется перенос воздушных масс.

Кроме характеристик циркуляции мы использовали данные наблюдений об осадках на метеостанциях в бассейне Селенги (Кяхта, Улан-Удэ, Сосново-Озерское, Красный Чикой, Хилок). Так как мы не располагали данными об осадках на территории Монголии, для анализа были использованы результаты измерений на станциях Кыра и Мангут, расположенных вблизи границы с Монголией. Рис. 6, на котором приведены графики суточных изменений осадков, показывает, что для всех выбранных периодов выпадение осадков имело затяжной характер, осадки выпадали в течение длительных периодов с небольшими перерывами. Красными рамками выделены периоды блокирования над Восточной Сибирью (в 1990 г выделен также и предшествующий период блокинга над Западной Сибирью), обозначенные на диаграммах номерами 3, 5, 6, 9, 10.

Хорошо видно, что периодам блокирования соответствуют периоды выпадения осадков, причем самых интенсивных. Перейдем теперь к анализу процессов, сопровождающих формирование блокирования над Восточной Сибирью и выпадение осадков в бассейне Селенги.

На рис. 7 приведены иллюстрации поля скорости на 850 гПа (линии тока) и величины PV-θ (заливка), характеризующие изменения циркуляции в период блокирований. Распределения PV-θ показывают происхождение воздушных масс, синему цвету соответствуют воздушные массы арктического происхождения, а красному – тропического. Циклоны и антициклоны, в свою

очередь, хорошо видны в распределениях поля скорости. Развитие блокирующих процессов, в общем, протекало по классической схеме, представленной в (Palmen et al., 1969). Особенностью рассмотренных нами периодов являлось то, что всем случаям блокирования над Восточной Сибирью предшествовали гребни высокого давления над Западной Сибирью и Охотским морем.

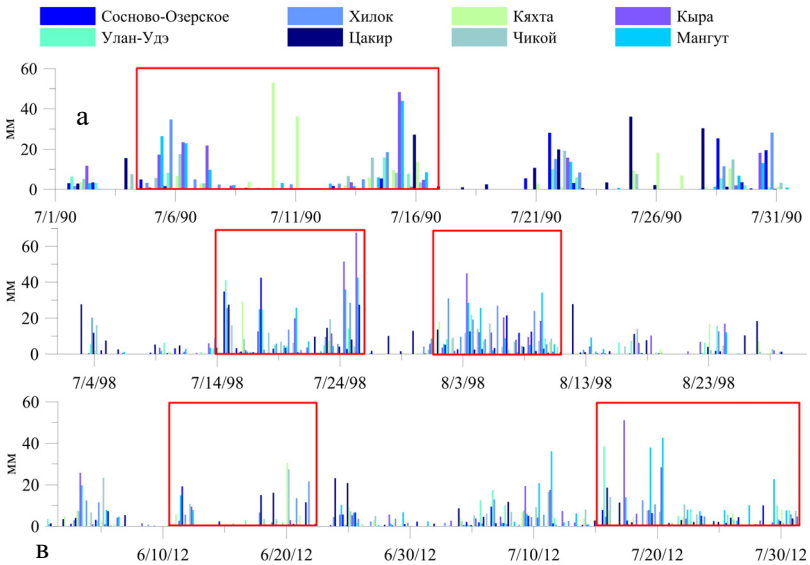


Рисунок 6. Вариации количества осадков на станциях, расположенных в бассейне Селенги (см. рис. 1)

Красными прямоугольниками выделены периоды блокирования

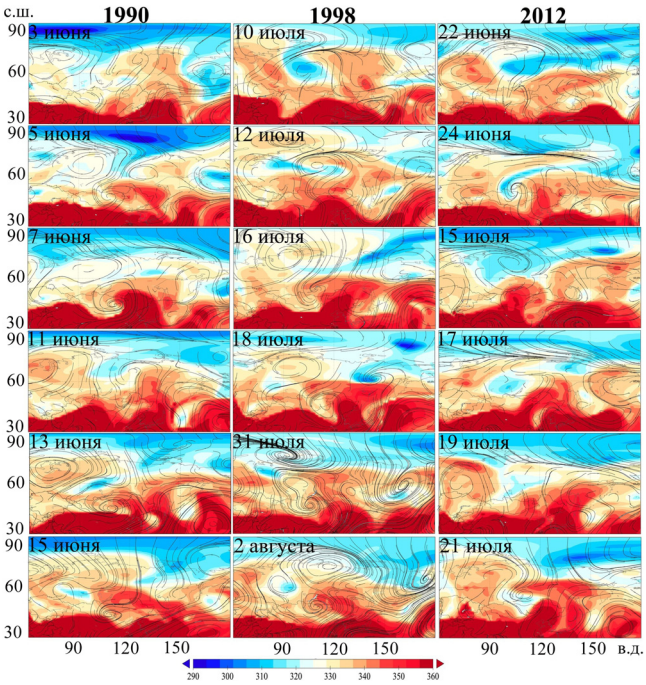


Рисунок 7. Динамика PV-θ и линии тока поля скорости на уровне 850 гПа для событий блокирования в ВС, обозначенные на диаграммах рис. 5 как 3, 5,6, 9,10

Анализ распределений потенциальной температуры и поля скорости позволил выделить в процессе динамической эволюции этих гребней и расположенной между ними ложбины несколько стадий. Во всех случаях сначала возрастала амплитуда гребней, и холодный воздух в ложбине проникал далеко на юг. Над Западной Сибирью и Охотским морем при этом формировались блокирующие антициклоны (например, 3, 11 июля 1990 г., 10 июля 1998, 22 июня и 15 июля 2012 г.). Затем ложбины отсекались и оказывались окруженными воздухом с более высокой потенциальной температурой (7, 15 июля 1990 г., 12, 18 июля и 2 августа 1998 г., 24 июня 2012 г., 17, 21 июля 2012 г.). В процессе отсечения холодной ложбины происходило смещение гребня/антициклона с Западной Сибири на Восточную Сибирь, которая оказывалась в итоге под областью высокого давления. В результате формировалась отсеченная область низкого давления, так называемая cut-off low и область блокирования, связанная с отсеченным циклоном.

Вообще говоря, выпадение осадков типично для отсеченных циклонов (Palmen et al., 1969), причем осадки выпадают в юго-восточной части циклонов, которая зачастую находится севернее или западнее озера Байкал. Однако в наших случаях количество выпавших осадков явно превышало величину, характерную для такого типа циклонов. Для того чтобы понять причину сильных ливней, необходимо обратить внимание на процессы, протекающие в это время в субтропиках Восточной Азии. В момент формирования отсеченных циклонов хорошо видно резкое отклонение к западу и усиление муссонного гребня. Изменение ориентации гребня сопровождалось формированием к юго-востоку от Байкала хорошо выраженного циклона. Так как воздух в циклоне имел муссонное происхождение, это и объяснило большое количество осадков в Монголии. Становится понятной и способность муссона столь глубоко проникать вглубь Азии. Этому способствуют, очевидно, крупномасштабные и интенсивные циркуляционные процессы в периоды формирования блокингов, включающие образование отсеченных циклонов.

Обсуждение

Мы рассмотрели пусть и один из ключевых, но все же не единственный циркуляционный механизм формирования осадков в бассейне Байкала. Анализ этих процессов, безусловно, следует продолжить. Значение полученных результатов, во-первых, в том, что они акцентируют внимание на связи между осадками в области аридного пояса Азии, особенно в Монголии и Северном Китае и процессами блокирования в Восточной Сибири. Однако формирование блокингов можно рассматривать не только как причину аномальных погодных процессов, но и как индикатор специфических глобальных типов общей циркуляции атмосферы, связанных, например, с генерацией квазистационарных волн Россби. Анализ длинных рядов блокингов в этом случае может помочь в исследовании процессов климатической изменчивости общей циркуляции атмосферы. Важное значение имеет анализ воспроизводимости блокингов в моделях CMIP5, которые могут быть использованы в дальней-

шем в задачах прогноза. Это направление является гораздо более перспективным, нежели попытки прогнозировать напрямую сток Селенги при помощи ансамбля моделей.

Приведенные рисунки еще раз подтверждают правильность выводов, полученных в (Antokhina et al., 2017) относительно особенностей формирования блокингов над Сибирью и Дальним Востоком. Ключевая роль в этом регионе принадлежит воздушным массам летнего муссона Восточной Азии. Вовлечение этих воздушных масс в системы циклонической и антициклонической циркуляции способствует как усилению блокингов, так и углублению циклонов, ответственных за аномальные осадки в бассейне Байкала. Это хорошо видно 16 и 31июля и 2 августа 1998 г. на рис. 7. С этой особенностью, кстати, связаны затруднения в идентификации блокингов по данным PV-Θ в области распространения муссона. В поле давления эти барические образования хорошо различимы, а в поле потенциальной температуры и циклон и антициклон представлены одинаковыми значениями.

Изменение направления муссонных потоков во время ВС-блокингов, без сомнения, ответственно и за типичную структуру моды «flood-in-north/drought-in-south» (мода 2) в Восточной Азии. Именно в те периоды, когда муссонный поток устремляется к северу, а над Монголией и Северным Китаем в области циклонической циркуляции выпадают ливневые осадки, на юге Китая в области фронта Мей-у, напротив, возникает засуха. Настолько сильно отклонить муссонный поток к северо-западу могут только процессы, связанные с формированием блокингов и отсеченных циклонов. Разумеется, развитие подобных процессов – явление достаточно редкое, однако с ними связаны экстремальные паводки в середине летнего сезона к юго-западу от озера Байкал. Если отклонение муссона в направлении Байкала не происходит, то экстремальные осадки могут выпадать на Дальнем Востоке, в работе (Antokhina et al., 2017) это продемонстрировано на ряде примеров (июль 1982, 2013).

Заключение

В работе исследованы причины колебания осадков в летний период в бассейне р. Селенги, главного притока оз. Байкал. Основной акцент в исследовании сделан на формирование крупномасштабных аномалий осадков вследствие реализации устойчивых процессов в атмосфере – блокирований. Продемонстрировано, что большой вклад в изменчивость осадков в бассейне реки вносит дипольная мода, характеризующая колебания осадков между Восточной Сибирью и Монголией (ВС-М). Исследования среднемесячных полей давления, скорости, а также анализ событий блокирования, показали, что реализации этого диполя с отрицательной аномалией осадков в ВС и положительной в Монголии сопровождается блокированием над ВС и циклонической циркуляцией в Монголии с вовлечением с юга муссонного воздуха. В свою очередь, при обратном распределении аномалий осадков над Восточной Сибирью наблюдается ложбина, над Монголией атмосферное давление повышено, а блокирующий антициклон находится над Европейской территорией России.

Для изучения циркуляционных процессов, ответственных за выпадение сильных осадков в Монголии, мы проанализировали распределения потенциальной температуры на динамической тропопаузе и поля скорости на уровне 850 гПа. Оказалось, что выпадение большого количества осадков при наличии блокирования над Восточной Сибирью связано с эффектом интрузии и отсечения воздуха, поступающего из полярной области при развитии глубоких ложбин и гребней определенного типа. Непосредственно перед тем, как над Восточной Сибирью установится блокирование, над Западной Сибирью и Охотским морем располагаются гребни высокого давления, причем гребень над Охотским морем формируется муссонными воздушными потоками. Этот вывод хорошо согласуется с конфигурациями поля давления, полученными в (Антохина и др., 2015) для периодов сильного и слабого муссона. Вторжение холодного воздуха к югу по восточной периферии гребня над Западной Сибирью приводит к «опрокидыванию» гребня на восток, а муссонный гребень с Охотского моря, напротив, устремляется на запад. Финальной стадией этого процесса является формирование дипольного Рекс-блокинга над Восточной Сибирью, антициклон в этой системе представлен сместившимся гребнем с Западной Сибири, а циклон – воздушными массами летнего муссона Восточной Азии. Фронтальные процессы в области соприкосновения воздушных масс различного происхождения и являются непосредственной причиной экстремальных осадков и паводков к юго-востоку от оз. Байкал.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Осипчук Е. Н. за подготовку данных о границах водосборного бассейна и речной сети р. Селенга.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда проект № 17-77-10035.

Список литературы

Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Зоркальцева О.С., Девятова Е.В. 2017. Атмосферные блокинги в Западной Сибири. Часть 1. Особенности обнаружения, объективные критерии и их сравнение. – Метеорология и гидрология, № 10, с. 34-45.

Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Кочеткова О.С., Мордвинов В.И. 2015. Летняя циркуляция атмосферы Северного полушария в периоды сильного и слабого муссона Восточной Азии. – Оптика атмосферы и океана, т. 28, № 1. с. 52-58.

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

Болгов М.В., Любушин А.А., Бубер А.Л., Коробкина Е.А., Филиппова И. А. 2017. Озеро Байкал: экстремальные уровни как редкое гидрологическое событие. – Водные ресурсы, т. 44, № 3. с. 522–536.

Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (TTTR) [http://aisori.meteo.ru/ClimateR].

Бычков И.В., Никитин В.М. 2015. Регулирование уровня озера Байкал: проблемы и возможные решения. – География и природные ресурсы, т. 36, № 3, с. 215–224.

Бычков И.В., Никитин В.М., Абасов Н.В., Бережных Т.В.,Максимова И.И., Осипчук Е.Н. 2017. Возможные изменения гидрологических характеристик в связи с регулированием стока в бассейне реки Селенги. – География и природные ресурсы, № 3, с.75-86.

Варгин П.Н., Лукьянов А.Н., Ганьшин А.В. 2012. Исследование динамических процессов в период формирования и развития блокирующего антициклона над Европейской частью России летом 2010 г. – Известия РАН, Физика атмосферы и океана, т. 48, № 5, с. 537-557.

Ильичева Е.А., Корытный Л.М., Павлов М.В. 2014. Русловая сеть дельты р. Селенги на современном этапе / Вестник Томского государственного университета. № 380, с. 190–194

Никитин В.М., Абасов Н.В., Бережных Т.В. Осипчук Е.Н. 2016. Озеро Байкал: риски маловодных и многоводных периодов. – География и природные ресурсы, № 5, с.29-38.

Обязов В.А. 2015. Региональный отклик приземной температуры воздуха на глобальные изменения (на примере Забайкалья). – ДАН, т. 461, № 4, с. 459–462.

Синюкович В.Н., Сизова Л.Н., Шимараев М.Н., Курбатова Н.Н. 2013. Особенности современных изменений притока воды в озеро Байкал. – География и природные ресурсы, т. 34, № 4, с. 350–355.

Сутырина Е.Н. 2015. Реакция стока р. Селенги на изменение интенсивности осадков и состояния водосборного бассейна. – Известия Иркутского государственного университета, т. 13. Серия «Науки о Земле», с. 120–130

Хромов С.П. 1956. Муссоны в общей циркуляции атмосферы. – В кн.: А. И. Воейков и современные проблемы климатологии. – Л., Гидрометеорологическое издательство, с. 84-108.

Чалов С.Р., Гречушникова М.Г., Варенцов М.И., Касимов Н.С. 2016. Современная и прогнозная оценка стока воды и наносов рек бассейна селенги. – География и природные ресурсы, № 5, с. 39-48.

Antokhina O.Yu. et al. 2016. The impact of atmospheric blocking on spatial distributions of summertime precipitation over Eurasia. . – IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 48, pp. 012035.

Antokhina O.Yu. et al. 2017. Peculiarities of the atmospheric blocking events over the Siberia and Russian Far East region during summertime. – Proc. SPIE, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics Proceeding SPIE, pp. 10466.

Batima P., Natsagdorj L., Gombluudev P., Erdenetsetse B. 2005. Observed climate change in Mongolia. – Assessments of impacts and Adaptations to Climate Change (AIACC). Working Paper. p. 26 [Available online at http://www.aiaccproject.org/working_papers/Working%20Papers/AIACC_WP_No013.pdf.]

Barriopedro D., Calvo N. 2014. On the Relationship between ENSO, Stratospheric Sudden Warmings, and Blocking. – Journal of Climate, vol. 27, No. 12. pp. 4704–4720.

Davi N.K. et al. 2013. Is eastern Mongolia drying? A long-term perspective of a multidecadal trend. – Water Resources Research, vol. 49, No. 1, pp. 151–158.

Dee D.P. et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. – Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 137, No. 656, pp. 553–597.

Ding Y., Wang Z., Sun Y. 2008. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon.Part I: Observed evidences. – International Journal of Climatology, vol. 28, No. 9, pp. 1139–1161.

Dzerdzeevskii B. 1962. Fluctuations of climate and of general circulation of the atmosphere in extra-tropical latitudes of the Northern Hemisphere and some problems of dynamic climatology. – Tellus, vol. 14, No. 3, pp. 328–336.

Henderson S.A., Maloney E.D., Barnes E.A. 2016. The Influence of the Madden–Julian Oscillation on Northern Hemisphere Winter Blocking. – Journal of Climate, vol. 29, No. 12, pp. 4597–4616.

Hong C.-C. et al. 2011. Roles of European blocking and tropical-extratropical interaction in the 2010 Pakistan flooding. – Geophysical Research Letters, vol. 38, No. 13.

Hoskins B.J.; Mcintyre M.E.; Robertson A.W. 2007. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. – Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 111, pp. 877–946.

Iwao K., Takahashi M. 2006. Interannual change in summertime precipitation over northeast Asia. – Geophysical Research Letters, vol. 33, No. 16.

Iwasaki H., Nii T. 2006. The Break in the Mongolian Rainy Season and Its Relation to the Stationary Rossby Wave along the Asian Jet – Journal of Climate, vol. 19, No. 14, pp. 3394–3405.

Kalnay E. et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. – Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 77, No. 3, pp. 437–471.

Karthe D. et al. 2015. Water and environment in the Selenga-Baikal Basin: international research cooperation for an ecoregion of global relevance. – Ibidem-Verlag.

Li J. et al. 2009. Summer monsoon moisture variability over China and Mongolia during the past four centuries. – Geophysical Research Letters, vol. 36, No. 22.

Nakamura H., et al. 1997. The Role of High- and Low-Frequency Dynamics in Blocking Formation. – Monthly Weather Review, vol. 125, No. 9, pp. 2074–2093.

Palmen E., Newton C.W. 1969. Atmospheric Circulation Systems. Their Structure and Physical Interpretation, – Academic Press., New York and London,

Pelly J.L., Hoskins B.J. 2003. A New Perspective on Blocking. – Journal of the Atmospheric Sciences, vol. 60, No. 5, pp. 743–755.

Piao S. et al. 2010. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. – Nature, vol. 467, No. 7311, pp. 43–51.

Rex D.F. 1950. Blocking Action in the Middle Troposphere and its Effect upon Regional Climate. – Tellus, vol. 2, No. 3, pp. 196–211.

Sato N., Takahashi M. 2006. Dynamical Processes Related to the Appearance of Quasi-Stationary Waves on the Subtropical Jet in the Midsummer Northern Hemisphere. – Journal of Climate, vol. 19, No. 8, pp. 1531–1544.

Schneider U. et al. 2014. GPCC's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle. – Theoretical and Applied Climatology, vol. 115, No. 1-2, pp. 15–40.

Schneidereit A. et al. 2014. Large-Scale Flow and the Long-Lasting Blocking High over Russia: Summer 2010. – Monthly Weather Review, vol. 140, No. 9, pp. 2967–2981.

Schubert S.D. et al. 2014. Northern Eurasian Heat Waves and Droughts. – Journal of Climate, vol. 27, No. 9, pp. 3169–3207.

Shen C. et al. 2009. Variability of summer precipitation over eastern China during the last millennium. – Climate of the Past, vol. 5, No. 3, pp. 129–141.

Tang Q., Leng G. 2012. Damped summer warming accompanied with cloud cover increase over Eurasia from 1982 to 2009. – Environmental Research Letters, vol. 7, No. 1, pp. 014004.

The WCRP Coupled Model Intercomparison Project - Phase 5 (CMIP5). 2011. – CLIVAR Exchanges Special Issue, No. 56, vol 16, 32p.

Tibaldi S., Molteni F. 1990. On the operational predictability of blocking. – Tellus A, vol. 42, No. 3, pp. 343–365.

Törnqvist R. et al. 2014. Evolution of the hydro-climate system in the Lake Baikal basin. – Journal of Hydrology, vol. 519, pp. 1953–1962.

Wang B. et al. 2008. How to Measure the Strength of the East Asian Summer Monsoon. – Journal of Climate, vol. 21, No. 17, pp. 4449–4463.

Zhu C. et al. 2012. Recent weakening of northern East Asian summer monsoon: A possible response to global warming. – Geophysical Research Letters, vol. 39, No. 9.

Статья поступила в редакцию: 01.11.2017 г. После переработки:09.01.2018 г.