

УДК 551.482.215.1 + 551.482.215.7 (571.54/55+517.3)

Т. В. БЕРЕЖНЫХ\*, О. Ю. МАРЧЕНКО\*, Н. В. АБАСОВ\*, В. И. МОРДВИНОВ\*\*

\*Институт систем энергетики СО РАН, г. Иркутск

\*\*Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

## ИЗМЕНЕНИЕ ЛЕТНЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ НАД ВОСТОЧНОЙ АЗИЕЙ И ФОРМИРОВАНИЕ ДЛИТЕЛЬНЫХ МАЛОВОДНЫХ ПЕРИОДОВ В БАССЕЙНЕ РЕКИ СЕЛЕНГИ

*Рассмотрены особенности формирования маловодных периодов р. Селенги 1976–1982 и 1996–2011 гг. Одной из причин рассматриваемых маловодий является ослабление циркуляции в зоне конвергенции муссонных потоков и потоков умеренных широт над Монголией и Северным Китаем. В отличие от маловодий предыдущих десятилетий уменьшение количества осадков в современный маловодный период происходит на фоне крупномасштабных климатических изменений.*

Ключевые слова: бассейн р. Селенги, приток в оз. Байкал, маловодные периоды, аномалии атмосферных осадков, циркуляция атмосферы, климатические изменения.

*We examine the formation patterns of low-water periods 1976–1982 and 1996–2011 for the Selenga river. One of the immediate reasons for the low-water periods under consideration is the attenuation of the circulation in the zone of convergence of monsoon flows and flows of midlatitudes over Mongolia and North China. Unlike the low-water periods of the preceding decades, a decrease in precipitation amounts during the current low-water period is taking place concurrently with large-scale climatic changes.*

Keywords: Selenga river basin, tributary to Lake Baikal, low-water periods, atmospheric precipitation anomalies, atmospheric circulation, climatic changes.

### АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Бассейн р. Селенги расположен вдали от основных источников влаги — в центре Азии на территории Монголии и России, его общая площадь равна 447 060 км<sup>2</sup> [1]. Речная система Селенги в известном смысле уникальна, так как одновременно снабжает водой полупустынные области и в то же время является главным источником питания самого большого в мире резервуара пресной воды — оз. Байкал.

Водные ресурсы Селенги имеют высокую значимость для водохозяйственной деятельности Монголии и Бурятии [2], а также определяют значительную долю гидроэнергетического потенциала ГЭС Ангарского каскада, поскольку ее сток составляет около половины притока в оз. Байкал [3]. Большое опасение в связи с этим вызывает затянувшийся маловодный период 1996–2011 гг., во время которого вклад стока Селенги в общий приток в озеро заметно уменьшился (рис. 1). Дефицит ее притока в этот период частично компенсировали реки со снеговым и смешанным питанием [4].

Длительность современного периода маловодья р. Селенги уже составила 16 лет, и если снижение ее притока в озеро продолжится, то другие реки вряд ли смогут в дальнейшем компенсировать растущие потери для гидроэнергетики и водохозяйственной деятельности. Поэтому большое значение имеет долгосрочный прогноз стока Селенги. Для решения этой задачи необходимо иметь представление о характере атмосферных процессов, типичных для периодов маловодий в прошлом, а также об изменениях этих процессов в современный период.

Исследованию вековых и внутривековых колебаний водности в бассейне оз. Байкал, а также их связи с динамикой гидрометеорологических элементов посвящено большое количество работ, в которых исследованы связи характеристик атмосферной циркуляции с осадками и стоком в бассейне оз. Байкал [5, 6]. В работе [7] подробно рассмотрен маловодный период 1976–1982 гг., охвативший не только реки бассейна оз. Байкал, но и большинство рек юга Сибири. Основной причиной маловодья авторы считают совпадение маловодных периодов этих рек в вековых циклах колебаний водности.

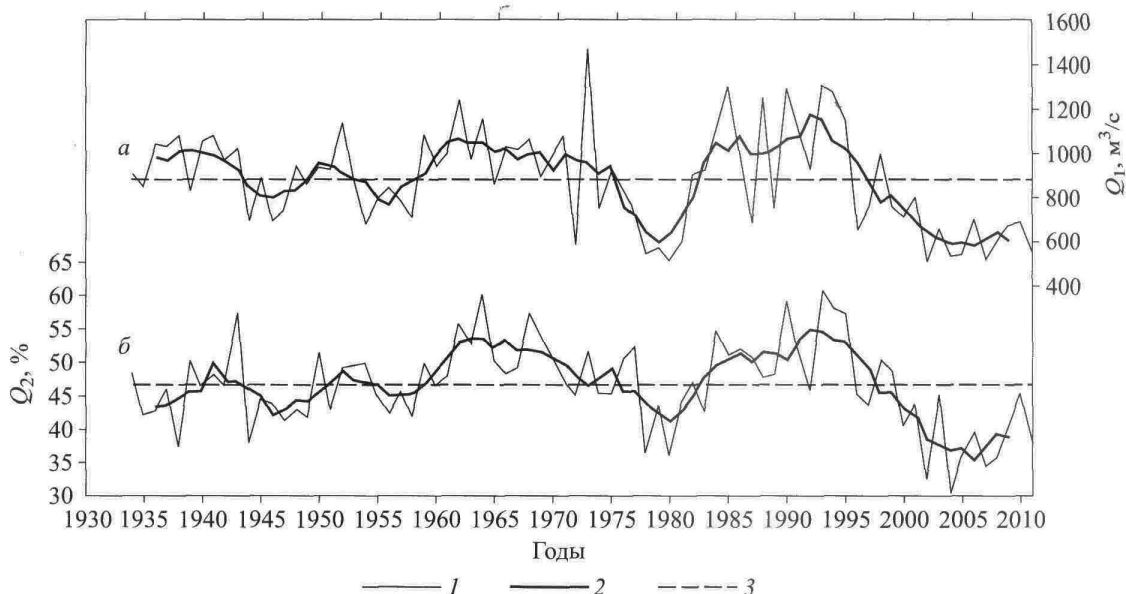


Рис. 1. Межгодовые вариации стока р. Селенги ( $Q_1$ ) (а), годового ее притока (%) по отношению к общему притоку в оз. Байкал ( $Q_2$ ) (б).

1 — межгодовые вариации; 2 — скользящее осреднение по 5-летиям; 3 — норма притока 1934–2011 гг.

Проведенные исследования современного маловодья выявили нарушение согласованности колебаний притока в оз. Байкал и Братское водохранилище. Были отмечены значимые связи между притоком в Байкал и сокращением площади льдов в Арктике, исследовано влияние типов циркуляции атмосферы по Б. Л. Дзержевскому, при которых наблюдаются экстремально высокий и низкий притоки [8, 9]. Анализ длительного ряда колебаний стока Селенги (с 1638 по 1997 г.), восстановленного на основе данных дендрорекоконструкции [10], показал, что длительные маловодные периоды характерны для исследуемого речного бассейна, различной была лишь интенсивность и продолжительность. К одним из наиболее продолжительных (15–17 лет) относятся маловодья в начале и середине XIX в. В целом современный период характеризуется ослаблением и нарушением многих статистических связей, найденных ранее. Вероятно, нарушение этих связей обусловлено происходящими глобальными климатическими изменениями и изменениями общей циркуляции атмосферы.

Основная цель данного исследования — выяснение роли изменения циркуляции атмосферы над северо-восточной частью Азии в формировании двух длительных маловодных периодов р. Селенги: 1976–1982 и 1996–2011 гг.

### ИССЛЕДОВАНИЕ АНОМАЛИЙ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ

Основной источник питания р. Селенги — дожди. Снежный покров в водосборном бассейне незначителен, и, соответственно, талые воды принимают малое участие в питании реки. Около половины годового стока Селенги составляет сток за летний период (июнь–август), невелика роль в питании реки и подземных вод [11], поэтому главной причиной вариаций стока является изменчивость летних атмосферных осадков. Анализ структуры процессов осадкообразования в летний период осложняет высокая пространственная неоднородность количества выпадающих осадков. Даже на близко расположенных станциях показатели осадков могут сильно отличаться. Например, на станциях Кяхта и Улан-Удэ коэффициент корреляции сумм осадков в июне и августе составляет всего 0,5, а для июля 0,2. Поэтому для выделения трендов в количестве выпадающих осадков приходится использовать усреднения как в пространстве, так и во времени.

Для выявления пространственной структуры аномалий осадков в маловодные периоды 1976–1982 и 1996–2011 гг. (далее первый и второй маловодные периоды) нами использованы архивные данные о количестве атмосферных осадков в узлах пространственной сетки  $1 \times 1^\circ$  [12, 13]. На рис. 2. пред-

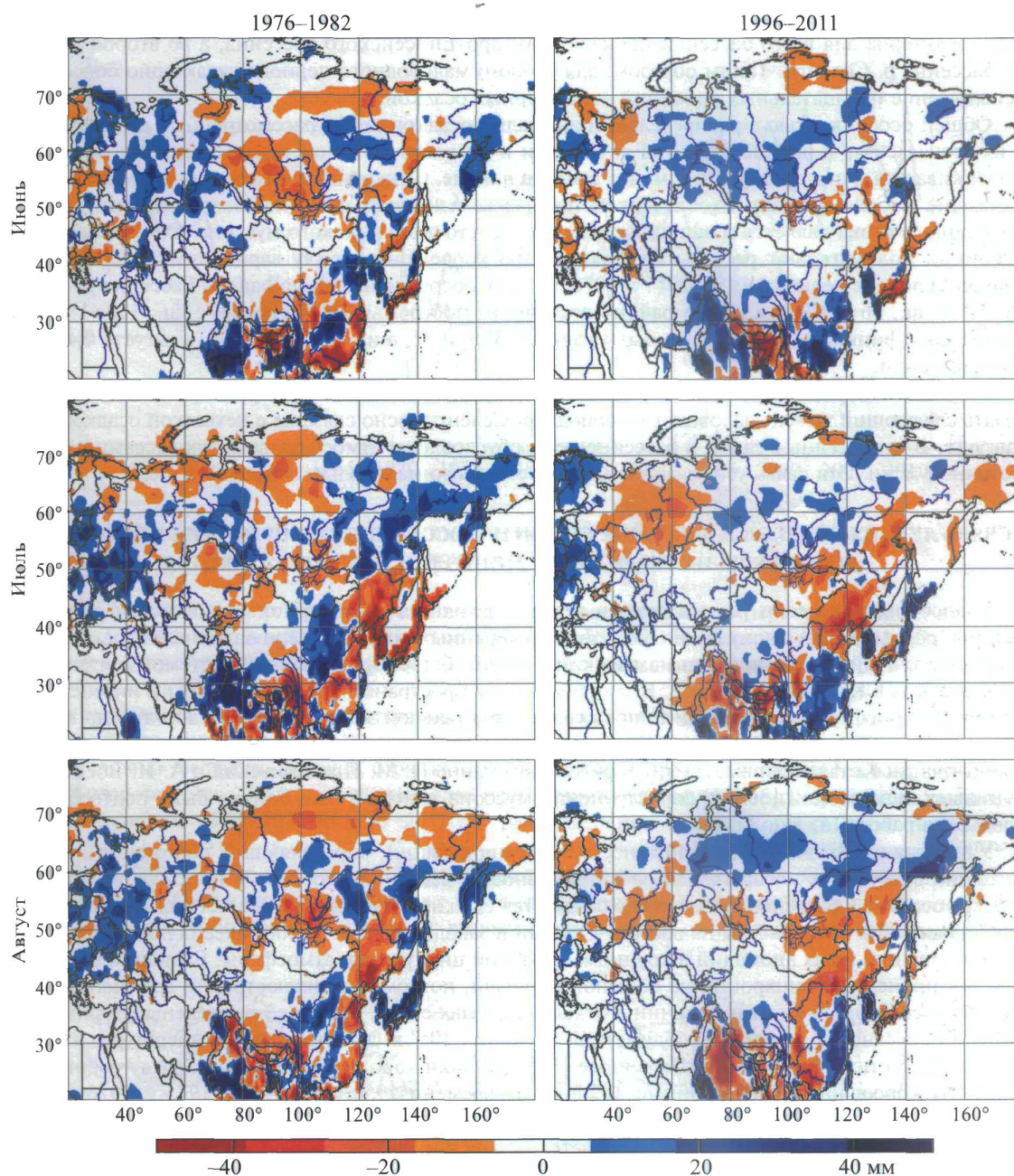


Рис. 2. Отклонение величин атмосферных осадков (мм) от нормы (средних значений за период 1950–1990 гг.) на территории Азии в маловодные периоды 1976–1982 и 1996–2011 гг.

ставлены распределения аномалий осадков за три летних месяца, которые рассчитывались в виде отклонений от их среднего значения в период 1950–1990 гг. В июне площадь аномалии в первый маловодный период гораздо обширней, она простирается в северо-западном направлении, вплоть до Северного Ледовитого океана. Нехватку атмосферных осадков в данный период испытывал не только Ангаро-Енисейский бассейн, но и бассейн р. Оби. Для второго маловодного периода отрицательная аномалия летних осадков в июне наблюдалась только в южных частях бассейна оз. Байкал, в его северной части и в бассейне р. Ангары количество осадков было близко к норме. Аналогичный ха-

раक्टर имеет распределение осадков в июле и августе: в первый маловодный период нехватка осадков была характерна для всего бассейна Байкала и Ангаро-Енисейского бассейна, а во второй — только для бассейна р. Селенги. Таким образом, для второго маловодного периода характерно более южное расположение отрицательных аномалий атмосферных осадков.

Общей особенностью в распределении аномалий осадков за два рассмотренных периода является их тесная связь в районе бассейна р. Селенги и на восточном побережье Азии. Эта связь лучше прослеживается в июле и августе и менее заметна в июне. Синхронные изменения аномалий осадков в бассейне р. Селенги и на тихоокеанском побережье Азии указывают на то, что важным фактором колебаний ее стока является изменчивость летнего восточно-азиатского муссона. Связь между этими явлениями подтверждают расчеты коэффициентов корреляции между вариациями месячных сумм осадков за летние периоды 1950–2011 и 1976–2011 гг., осредненными по району бассейна р. Селенги (46–51° с. ш., 96–107° в. д.) и по району восточного побережья Азии (40–50° с. ш., 110–117° в. д.). В июне коэффициенты корреляции были равны 0,37 и 0,23, в июле 0,44 и 0,66, в августе 0,48 и 0,30 соответственно.

Результаты обработки данных по летним атмосферным осадкам на территории Азии позволили сделать следующий вывод: маловодные периоды р. Селенги тесно связаны с нехваткой осадков в июле и августе. В эти месяцы осадки в бассейне реки обусловлены атмосферными процессами в Северо-Восточной Азии. Эта связь усиливается для современного маловодья, особенно в июле.

#### СВЯЗЬ ЛЕТНИХ ОСАДКОВ В БАССЕЙНЕ СЕЛЕНГИ С ОСОБЕННОСТЯМИ ЛЕТНЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ НА ТЕРРИТОРИИ МОНГОЛИИ И СЕВЕРНОГО КИТАЯ

Водосборный бассейн реки в летний период находится на северной периферии фронтальной системы, разделяющей циркуляцию атмосферы умеренных широт (северо-западный перенос) и тропиков (восточный пассат, восточно-азиатский муссон). С этой фронтальной системой связано выпадение осадков в Китае и Монголии. В зависимости от пространственной структуры и интенсивности каждой из атмосферных циркуляций, положение фронтальной зоны меняется в достаточно широких пределах. При северном положении этой зоны муссон может достигать Монголии, Забайкалья и северных границ Китая. Впервые на это обратили внимание Н. М. Пржевальский и А. И. Воейков [14], а в дальнейшем возможность распространения муссона вплоть до оз. Байкал была подтверждена в целом ряде работ [15, 16].

Учитывая необходимость анализа нескольких циркуляций, определяющих положение зоны конвергенции воздушных масс, а также ее интенсивность, задача диагностики и прогноза вариаций количества осадков в бассейне р. Селенги оказывается сложной. Традиционные методы анализа средних полей давления и температуры на востоке Евразии и западной части Тихого океана позволяют указать причины тех или иных аномалий в крупномасштабной циркуляции атмосферы. Вариации этих характеристик происходят синхронно на большой площади, поэтому для иллюстрации изменений можно ограничиться графиками этих величин в отдельных узлах сетки. На рис. 3 приведены графики изменений в окрестности точки с координатами 47° с. ш., 105° в. д. приземной температуры и высоты изобарической поверхности 500 гПа в июле [17]. Графики хорошо согласованы между собой, коэффициенты корреляции, рассчитанные за периоды времени 1950–2011, 1950–1975 и 1976–2011 гг., составили соответственно 0,8; 0,83 и 0,84.

Основной особенностью графиков является резкое понижение давления и температуры в 1955 г., затем, начиная с середины 1960-х гг., происходит постепенное восстановление, продолжающееся до настоящего времени. Причины этой вариации остаются невыясненными. Анализ темпов роста давления и температуры в период 1960–2011 гг. показал, что водосборный бассейн р. Селенги попадает в область сильных изменений. Это в той или иной степени должно было отразиться в характеристиках атмосферной циркуляции, интенсивности и положения фронтальной системы муссона и, как следствие, в показателях увлажненности.

Понижению давления соответствует усиление циклоничности. В связи с этим можно было ожидать увеличения количества осадков в 1960-е гг. и их сокращения в период роста давления. Вариации стока р. Селенги (см. рис. 1) действительно подтверждают предположение о связи увлажненности с понижением давления в 1960-е гг., однако сток Селенги оказывается высоким и в более поздний период — с середины 80-х до середины 90-х гг. XX в., а это период роста давления, что противоречит

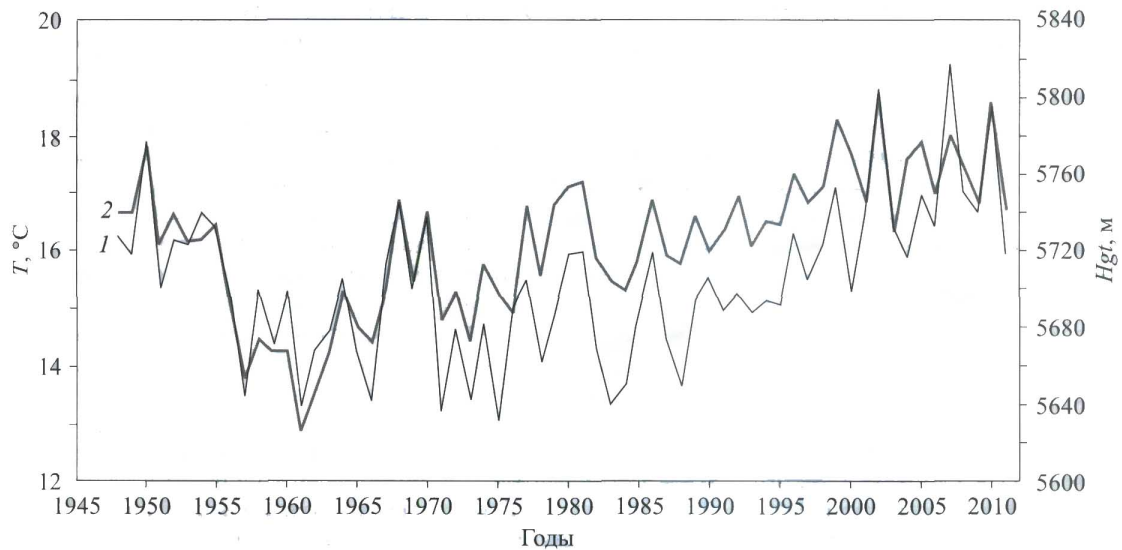


Рис. 3. Долговременные изменения в июле приземной температуры воздуха, °С (1) и высоты изобарической поверхности 500 гПа (2).

исходному предположению. Вероятно, связь осадков с колебаниями температуры и давления является более сложной и определяется не только крупномасштабными аномалиями метеорологических полей, но и структурой переносов воздушных масс, обуславливающих интенсивность фронтальной зоны.

Для выяснения изменения характера циркуляции в регионе в качестве первого этапа были усреднены поля ветра на изобарической поверхности 850 гПа [18]. Выбранный уровень, с одной стороны, близок к уровню «ведущего потока», отражающего основные направления переносов воздушных масс, с другой стороны, находится в слое, наиболее насыщенном влагой [14, 18]. Усреднения выполнены для двух периодов 1948–1975 и 1976–2011 гг., распределения полей скорости ветра показаны на рис. 4.

Период 1948–1975 гг. отличался интенсивными потоками: наблюдался восточно-азиатский муссон с преобладающим направлением ветра с юга в среднеширотные области Восточной Азии (северо-восточный Китай, Монголию — область Б); высокими скоростями отличался также западный перенос

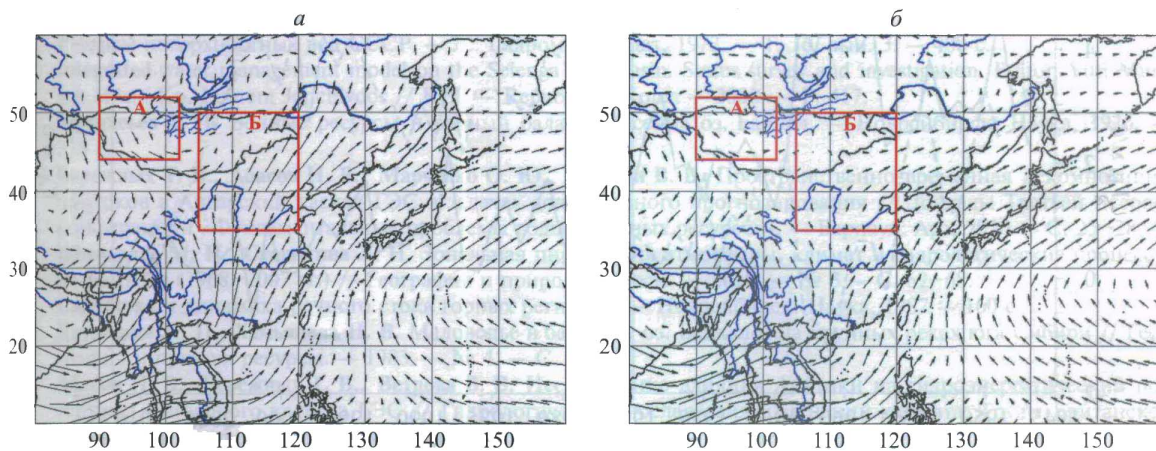


Рис. 4. Осредненные поля скоростей ветра на 850 гПа за периоды 1948–1975 (а) и 1976–2011 гг. (б).

А — перенос умеренных широт; Б — муссонный перенос.

холодного воздуха из умеренных широт через западную Монголию (область А) (см. рис. 4). Во второй период интенсивность потоков существенно ослабла. Интенсивность восточно-азиатского летнего муссона снизилась севернее 30° с. ш., что затруднило перенос водяного пара в Северный Китай и Монголию. Одновременно в этом регионе ослабевает западный перенос холодного воздуха из умеренных широт. Согласно [19], в случае интенсивного муссонного потока, эффективно переносящего влагу в Северный Китай, юго-восточный и северо-западный потоки создают восходящие движения, приводящие к увеличению количества осадков в Монголии и Северном Китае. При снижении интенсивности потоков вероятность выпадения осадков существенно уменьшается.

Полученная картина качественно характеризует общую тенденцию изменения циркуляции над Монголией и Северным Китаем, однако для количественного описания вариаций осадкообразования в регионе она оказывается все же недостаточной. В частности, эта схема не объясняет уже упоминавшееся возрастание стока р. Селенги в 80–90-е гг. XX в. Однако примененный подход дает ключ к решению задачи — для понимания причин вариаций осадкообразования в регионе необходим более детальный анализ поля скоростей, определяющих перенос воздушных масс над бассейном р. Селенги. С этой целью нами оценены долговременные изменения интенсивности меридиональных потоков над Монголией и Северным Китаем. Для этого рассчитаны средние меридиональные компоненты скорости ветра в западной части Монголии (область А — 44–52° с. ш., 90–102° в. д.) и на восточном побережье Евразии (область Б — 35–50° с. ш., 105–120° в. д.). На рис. 5 приведены графики изменения этих величин. Положительное значение компоненты скорости указывает на перенос к северу, отрицательное — к экватору.

Характер вариаций средних скоростей меридионального переноса позволил выделить два периода, принципиально отличающихся не только по характеру изменчивости самих величин, но и по характеру связи со стоком р. Селенги: 1948–1975 и 1976–2011 гг. Для первого периода характерны интенсивные переносы, низкие значения давления и температуры. Сток р. Селенги в этот период в основном был либо выше нормы, либо близок к ней, коэффициент вариации стока составил 0,17. Во второй период резко снизилась интенсивность циркуляции, выросли значения температуры и геопотенциала, колебания стока р. Селенги стали более неустойчивыми, коэффициент вариации составил 0,31. На начало второго периода пришелся маловодный период 1976–1982 гг. На рубеже 1980–1990-х гг. произошло некоторое усиление циркуляции; в бассейне р. Селенги наметился период высокой водности, характеризующийся своей неустойчивостью, в отличие от периода высокой водности 1948–1975 гг. С 1996 г. началось еще более сильное ослабление циркуляции, ускорился рост геопотенциала и температуры — этому периоду соответствует современное маловодье р. Селенги.

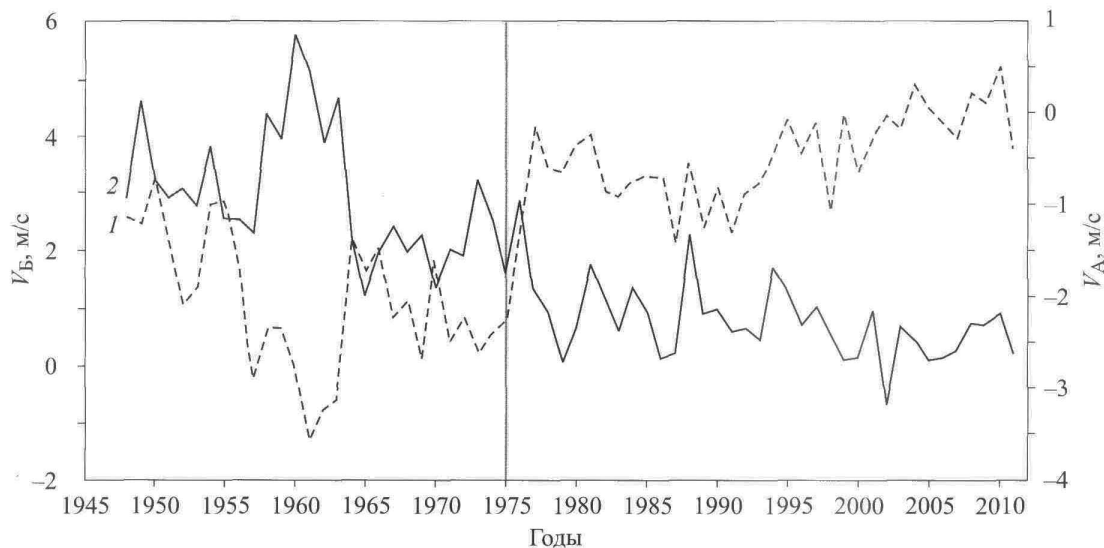


Рис. 5. Долговременные изменения средней меридиональной скорости переноса в области А ( $V_A$ ) (1) и в области Б ( $V_B$ ) (2).

Таким образом, более детальный анализ полей скорости в районе водосборного бассейна р. Селенги позволил объяснить колебания водности реки после 1960-х гг. Эти колебания оказались тесно связанными с изменениями режима циркуляции в середине 1970-х гг.

Подтверждением полученных выводов относительно особенностей влагопереноса и выпадения осадков в бассейне р. Селенги являются траекторные расчеты [20]. Этот метод сложно использовать для изучения межсуточных вариаций циркуляции атмосферы, однако при осреднении за длительные периоды маловодий и многоводий, метод позволяет выявить закономерности, связанные с их формированием. Проведенное исследование показало, что экстремальные осадки в бассейне р. Селенги обусловлены переносами северо-западных и юго-восточных направлений; наиболее интенсивные осадки выпадали при сходимости траекторий в области бассейна. В маловодные периоды 1976–1982 и 1996–2011 гг. преобладали траектории западных и северных направлений, а также траектории «вне типа», характерные для малоградиентных барических полей.

### ВЫВОДЫ

Анализ вариаций стока р. Селенги и количества осадков на территории Восточной Азии показал тесную связь этих величин с изменениями характера циркуляции атмосферы на обширной территории, включающей область распространения восточно-азиатского 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 Селенги является общее ослабление циркуляции в области конвергенции воздушных масс умеренных широт и восточно-азиатского муссона. Можно предположить, что эти изменения отражают глобальные изменения общей циркуляции атмосферы, происходящие в климатической системе.

Анализ вариаций средних скоростей меридионального переноса над территорией Монголии и Северного Китая позволил выделить два периода, отличающихся по характеру изменчивости величин — 1948–1975 и 1976–2011 гг. Для первого периода характерны интенсивные переносы воздушных масс, низкие значения давления и температуры. Во второй период резко снизилась интенсивность циркуляции, выросли значения температуры и геопотенциала. Именно в этот период наблюдались рассматриваемые в работе маловодные периоды стока р. Селенги.

Полученные результаты предполагается использовать в методиках повышения надежности долгосрочного прогноза гидроэнергетического потенциала Ангарского каскада ГЭС, определяемого в значительной степени притоком в оз. Байкал и стоком р. Селенги.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ресурсы** поверхностных вод СССР. — Л.: Гидрометеиздат, 1973. — Т. 16, вып. 3. — 400 с.
2. **Integrated** water management model on the Selenga river basin. Status survey and investigation. Editor: Yuri Mun, Ick Hwan Ko, Luntent Janchivdor // KEI. — Republic of Korea — 2008. — P. 417.
3. **Афанасьев А. Н.** Водные ресурсы и водный баланс бассейна оз. Байкал. — Новосибирск: Наука, 1976. — 238 с.
4. **Бережных Т. В., Абасов Н. В., Марченко О. Ю., Ветрова В. В.** Пространственно-временная декомпозиция притоков в Ангарский каскад ГЭС в задачах долгосрочного прогнозирования // Доклады Третьей Всерос. конференции «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов». — Барнаул: Арт, 2010 — С. 25–28.
5. **Шимараев М. Н., Старыгина Л. Н.** Зональная циркуляция атмосферы, климат и гидрологические процессы на Байкале (1968–2007 гг.) // География и природ. ресурсы. — 2010. — № 3 — С. 62–68.
6. **Структура** и динамика речного стока горных регионов. — Новосибирск: Наука, 1987 — 160 с.
7. **Дружинин И. П., Хамьянова Н. В.** Маловодье в бассейне оз. Байкал и на крупных реках юга Сибири // География и природ. ресурсы. — 1983. — № 4. — С. 61–67.
8. **Абасов Н. В., Бережных Т. В., Ветрова В. В.** Исследование влияния Арктики на гидроэнергетический потенциал Ангарского каскада ГЭС // Гидрологические последствия изменений климата: Труды Британско-русской конференции. — Новосибирск: Сибстрин, 2007. — С. 63–72.
9. **Ильцова Е. М.** Исследование влияния макроциркуляционных процессов (типизация Б. Л. Дзержевского) на формирование притока воды в водохранилища Ангарского каскада ГЭС // Системные исследования в энергетике. — Иркутск: Изд-во ИСЭМ СО РАН, 2005. — С. 177–181.

10. **Davi N. K., Jacoby G. C., Curtis A. E., Baatarbileg N.** Extension of Drought Records for Central Asia Using Tree Rings: West-Central Mongolia // *Journ. of climate*. — 2006. — Vol. 19. — P. 288–299.
11. **Давыдов Л. К.** Гидрогеография СССР. — Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1955. — 600 с.
12. <http://www.dwd.de/>
13. **Rudolf B., Rubel F.** Global Precipitation. Chapter II in Hantel: Observed Global Climate, Landolt-Визнstein (Numerical Data and Functional Relationships), Group V: Geophysics // Springer. — 2005. — Vol. 6. — P. 567.
14. **Жаков С. И.** Общие закономерности режима тепла и увлажнения на территории СССР. — Л.: Гидрометеоиздат, 1982. — 231 с.
15. **Корниенко В. И.** Некоторые данные по влагообороту Забайкалья // *Труды ГГО*. — 1969. — Вып. 245. — С. 114–120.
16. **Сорочан О. Г.** Предварительные данные об основных характеристиках влагооборота над Восточной Сибирью и Дальним Востоком // *Труды ГГО*. — 1961. — Вып. 111. — С. 15–23.
17. **Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R.** The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* — 1996. — Vol. 77, № 3. — P. 437–471.
18. **Кузнецова Л. П.** Атмосферный влагообмен над территорией СССР. — М.: Наука, 1983. — 173 с.
19. **Lisheng Hao, Jinzhong Min, Yihui Ding, Ji Wang.** Relationship between Reduction of Summer Precipitation in North China and Atmospheric Circulation Anomalies // *Journ. Water Resource and Protection*. — 2010. — Vol. 2. — P. 569–576.
20. **Марченко О. Ю., Бережных Т. В., Мордвинов В. И.** Особенности летней циркуляции атмосферы и аномалии атмосферных осадков в бассейне р. Селенги // *Избр. труды Междунар. молодежной школы и конференции CITES–2011*. — Томск: Изд-во ИМКЭС СО РАН, 2011. — С. 99–102.

*Поступила в редакцию 13 марта 2012 г.*