

ПРЕСНОВОДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ — СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ

УДК 551.482.215.1 + 551.482.215.7 (571.54/55 + 517.3)

DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-4(104-115)

О.Ю. АНТОХИНАИнститут оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,
634055, Томск, пл. Академика Зуева, 1, Россия, antokhina@iao.ru

АТМОСФЕРНЫЕ ОСАДКИ В БАССЕЙНЕ РЕКИ СЕЛЕНГА И КРУПНОМАСШТАБНАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ АТМОСФЕРЫ НАД ЕВРАЗИЕЙ В ИЮЛЕ

По данным Global Precipitation Climatology Centre исследована долговременная изменчивость аномалий суммарного количества осадков в бассейне р. Селенга в июле. Выделено несколько длительных (4 года и более) периодов с отрицательными аномалиями осадков: 1935–1939, 1955–1958, 1977–1981, 2007–2011, 2013–2017 гг. Последний период характеризуется наименьшим количеством осадков. Проанализированы также межсуточные вариации суммы осадков для каждого июля с 1982 по 2016 г. Отмечена тенденция к уменьшению числа дней с большим количеством осадков и увеличению засушливых периодов. По данным ECMWF Era Interim изучены особенности атмосферного блокирования над Европой, Сибирью и над Дальним Востоком в периоды с большим и малым количеством осадков в бассейне Селенги. Для обнаружения блокирования в атмосфере использован южный градиент геопотенциала. Показано, что в периоды с большим количеством осадков блокировки чаще формировались над Восточной Сибирью и реже над Европой и Дальним Востоком (особенно, если они сопровождалась блокированием над Западной Сибирью). Выпадение осадков в бассейне Селенги связано не только с блокированием, но и с положением струйного течения и динамическими схемами формирования блокировок. Значение этих факторов продемонстрировано на ряде конкретных ситуаций циркуляции атмосферы в годы с большим и малым количеством осадков в бассейне Селенги. Долговременные трансформации этих характеристик вследствие изменения климата и общей циркуляции атмосферы могут приводить к нарушению корреляционных связей блокирования и количества осадков в бассейне реки. Более устойчивой будет, скорее всего, связь блокировок не с осадками в регионе, а с режимами выпадения осадков. Функциональная зависимость стока Селенги от изменения климата определяется, вероятно, положением муссонного фронта и волновыми свойствами атмосферных течений в умеренных широтах.

Ключевые слова: аномалии, летний восточноазиатский муссон, GPCC, атмосферное блокирование, струйные течения.

О.Ю. ANTOKHINAV.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
634055, Tomsk, pl. Akademika Zueva, 1, Russia, antokhina@iao.ru

ATMOSPHERIC PRECIPITATION WITHIN THE SELENGA RIVER BASIN AND LARGE-SCALE ATMOSPHERIC CIRCULATION OVER EURASIA IN JULY

Data from the Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) were used in investigating long-term variability of anomalies of the total amount of atmospheric precipitation within the Selenga river basin in July. We identified several long periods (four years and longer) with negative precipitation anomalies: 1935–1939, 1955–1958, 1977–1981, 2007–2011, and 2013–2017. The last period is characterized by the smallest precipitation amount. Day-to-day variations in total precipitation were also analyzed for each July from 1982 to 2016. The analysis revealed a tendency to a decrease of the number of days with a large precipitation amount and to an increase of dry periods. Based on ECMWF Era Interim data, we examined the features in the atmospheric blocking Europe, Siberia and the Far East for periods with large and small precipitation amounts within the Selenga river basin. To identify the blocking in the atmosphere used the southern gradient of the geopotential. It was shown that in periods with large precipitation amounts blockings occurred most frequently over Eastern Siberia and more rarely over Europe and the Far East

(especially if they were accompanied by blocking over Western Siberia). Atmospheric precipitation within the Selenga basin is associated not only with blocking but also with the position of the jet stream and with dynamic blocking formation schemes. The significance of these factors has been demonstrated in a number of specific situations of the atmospheric circulation in years with large and small precipitation amounts within the Selenga basin. Long-term transformations of these characteristics caused by climate change and the general atmospheric circulation can lead to a disturbance of the correlations between blocking and precipitation amounts within the river basin. In all likelihood, the correlation of blocking with precipitation regimes, rather than with precipitation in the region, will be more rigid. A functional dependence of the Selenga flow on climate change appears to be determined by the position of the monsoon front and by the wave properties of atmospheric flows in midlatitudes.

Keywords: anomalies, East Asian summer monsoon, GPCC, atmospheric blocking, jet stream.

ВВЕДЕНИЕ

В бассейне оз. Байкал с 1996 г. наблюдается затяжное маловодье, основная причина которого — низкий приток р. Селенги [1, 2]. Она имеет преимущественно летнее питание, и снижение притока в основном обусловлено уменьшением количества летних атмосферных осадков [1, 2]. Наиболее сильные изменения происходят в середине лета [1]. Известно, что в этот период осадки в Монголии связаны с активностью фронтальной системы, разделяющей воздушные массы умеренных широт и восточноазиатского летнего муссона (EASM) [1, 3]. Фронтальная система EASM способствует продвижению муссонной влаги до бассейна р. Селенги, и ее ослабление может привести к уменьшению количества летних осадков [3, 4]. Это предположение подтверждают результаты ряда работ, в которых отмечается ослабление восточноазиатского летнего муссона в последние несколько десятилетий [4].

Кроме процессов в тропиках и субтропиках, на фронтальную систему летнего муссона влияет циркуляция атмосферы в умеренных широтах [5, 6]. Основными источниками возмущения барического поля здесь являются глубокие ложбины и гребни, которые блокируют зональный перенос, а при максимальном развитии формируют обширные баротропные долгоживущие области высокого давления — так называемые блокинги (атмосферное блокирование) [7]. С процессами формирования блокингов связано образование отсеченных циклонов, которые всегда вызывают осадки [8].

В работах [9–12] выполнен ряд исследований, направленных на выявление связи выпадения осадков в бассейне Селенги в июле с повторяемостью блокингов в разных районах Евразии. В [9] для периода 1979–2015 гг. было показано, что чем выше повторяемость блокингов над Европой или Дальним Востоком, тем меньше осадков выпадает в Монголии (в южной части бассейна Селенги), но больше в Восточной Сибири, в том числе в северной части бассейна. Более тесная связь стока в северной части Селенги отмечена с блокингами над Дальним Востоком. При увеличении повторяемости блокирования над Восточной Сибирью, наоборот, количество осадков увеличивается в Монголии и уменьшается в Восточной Сибири. С блокингами над Уралом и Западной Сибирью количество осадков в Монголии и Забайкалье не показало значимых корреляций.

Дальнейшие исследования выявили дополнительные факторы, влияющие на количество осадков в бассейне Селенги. Во-первых, блокинги над Евразией редко возникают только в одной долготной зоне. Как правило, одновременно существуют как минимум два блокинга в разных долготных интервалах. В работе [10] были рассмотрены события одновременного блокирования над Европой и Дальним Востоком (10 июля из 39 лет). Оказалось, что такая схема блокирования может сопровождаться как выпадением, так и отсутствием осадков в бассейне Селенги. Из 10 лет три раза, в июле 1983, 1991, 2003 гг., осадков выпало выше или около нормы, в остальные годы количество осадков было ниже нормы.

Во многих случаях блокинг из одного региона смещался в соседний с иным типом связи с осадками в бассейне Селенги. В работе [11] было показано, что не все блокирования над Восточной Сибирью приводили к существенному увеличению осадков в Монголии. Сильные осадки выпадали только при смещении антициклонических областей с территории Западной Сибири на восток с формированием блокингов дипольного типа над Восточной Сибирью и Монголией. Если же блокинги не смещались, то осадки не были экстремальными [12]. Чаще всего для таких типов атмосферного блокирования были характерны отрицательные аномалии осадков. Отдельную группу составляют блокинги, которые одновременно можно отнести к двум регионам (Европе и Западной Сибири, Западной и Восточной Сибири, Восточной Сибири и Дальнему Востоку).

Необходимость учета дополнительных типов блокингов и факторов, влияющих на осадки в бассейне Селенги, усложняет схему связи между процессами блокирования в умеренных широтах и количеством осадков в бассейне Селенги. В настоящей работе сделана попытка уточнить эту схему, конкретизировать роль каждой группы блокингов в формировании осадков.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использованы месячные и суточные данные архива атмосферных осадков GPCC (The Global Precipitation Climatology Centre) [13–15] с разрешением 1° по широте и долготе. Архив специально разработан для исследований в области гидрологии и климатологии, данные основываются на анализе стационарных наблюдений, которые тщательно проверяются на наличие ошибок, а затем интерполируются в узлы регулярной сетки. Данные GPCC хорошо зарекомендовали себя в исследовании причин уменьшения стока р. Селенги [1].

На первом этапе было проведено сравнение данных старой версии GPCC Full Data Reanalysis Version 7 (1901–2013) и новой версии GPCC Full Data Monthly Product Version 2018 (1891–2016). Результаты сравнения приводятся ниже. Для анализа событий 2017 г. использованы данные архива GPCC First Guess Monthly Product. Сведения о количестве осадков в узлах сетки суммировались по всему бассейну Селенги. Затем в относительных единицах рассчитывалось отклонение от среднего количества осадков за каждый год (P_{anom}) по формуле:

$$P_{\text{anom}} = \frac{P_i}{\bar{P}} - 1,$$

где P_i — количество осадков в текущем году, \bar{P} — среднее количество осадков за 1950–1990 гг.

Для анализа межсуточной динамики суммарного количества осадков в бассейне Селенги в июле были использованы данные GPCC Full Data Daily Product Version 2018 за 1982–2016 гг. Для каждого года строились гистограммы суточной динамики суммарного количества осадков, в результате чего были выделены периоды с разным количеством осадков.

К периодам с большим количеством осадков отнесены интервалы, в которых в течение хотя бы 1 сут суммарное количество осадков в бассейне превышало 500 мм (92-й перцентиль, полученный для всех значений). Периодами с малым количеством осадков считаются интервалы больше 7 сут, когда суммарное количество осадков не превышало 200 мм. В один из дней осадки могли быть выше 200 мм, но не более 400 мм. В среднем для этих периодов количество осадков составляло 1000 мм за 9 сут. Годы с двумя такими периодами в течение июля были отнесены к группе с осадками ниже нормы, с одним — к группе с осадками около нормы, редко — к группе с осадками выше нормы. Выделение периодов с осадками выше и ниже заданного порога по большей части условно. Например, периоды с осадками около 450 мм не менее значимы для стока реки, если следуют за периодами с осадками больше 500 мм. Несколько условна и выборка засушливых периодов с малым количеством осадков. Однако для нашего исследования такой отбор был необходим для анализа наиболее важных атмосферных процессов. В результате из базы данных за 35 лет (1982–2016 гг.) было выбрано 67 событий с сильными осадками и 32 засушливых периода (см. таблицу). Для анализа тенденций изменчивости осадков был рассчитан индекс интенсивности осадков QP, представляющий собой отношение количества дней с осадками $P < 200$ мм к количеству дней с осадками $P > 500$ мм. Очевидно, что чем выше этот показатель и продолжительнее периоды с осадками менее 200 мм, тем менее благоприятными являются условия для формирования стока.

Для анализа атмосферных процессов использованы данные архива [16]. Для выбранных периодов с большим и малым количеством осадков рассчитаны характеристики блокингов и проанализированы особенности распределения барических полей в интервале $0-160^\circ$ в.д. Для идентификации блокингов применялся южный градиент геопотенциала (GHGS), используемый в работах [17–19]:

$$\text{GHGS} = \frac{z(\varphi_0) - z(\varphi_s)}{\varphi_0 - \varphi_s},$$

где z — высота геопотенциальной поверхности 500 гПа; $\varphi_0 = 60^\circ$ с. ш. $\pm \Delta$, $\varphi_s = 40^\circ$ с. ш. $\pm \Delta$, $\Delta = -5; -2,5; 0; 2,5$ или 5° . Пять значений Δ вдоль каждой долготы при расчетах впервые были использованы в работе [19].

Для идентификации блокингов анализировались пространственно-временные диаграммы GHGS за июль каждого года. Территория Евразии была поделена на регионы согласно [9]. Эти регионы обозначены по преобладающей территории для удобства сокращения в тексте. Блокинги над Европой ($0-50^\circ$ в. д.) обозначены Е, над Уралом и Западной Сибирью ($50-80^\circ$ в. д.) — ЗС, над Восточной Сибирью ($80-120^\circ$ в. д.) — ВС, над Дальним Востоком ($120-160^\circ$ в. д.) — ДВ. Если блокинг захватывал два региона, для его обозначения использовалась косая черта (/) (например, Е/ЗС). Если одновременно наблюдались два блокинга в разных регионах, использовался знак «+» (например, Е + ДВ); при отсутствии блокинга — ББ (период без блокинга).

Периоды с разным количеством осадков и соответствующие им события блокирования

Год	Осадки по календарным дням июля		Блокинги	
	$P > 500$ мм	$P < 200$ мм	$P > 500$ мм	$P < 200$ мм
1982	12; 28, 30	—	Е, ББ	—
1983	12; 18; 23; 27–28	—	Е, ДВ, Е, Е	—
1984	19; 29	—	ВС/ДВ, ВС	—
1985	6; 22	10–18; 23–31	Е, ВС	ДВ, ББ
1986	8; 13; 22	23–31	ВС/ДВ (2)*, ББ	Е
1982–1986	15 дней, 13 периодов	27 дней, 3 периода	QR = 1,8	
1987	20; 28	—	ББ (2)	—
1988	25–26	—	ДВ	—
1989	5; 17	7–15	Е + ЗС, ББ	Е + ВС/ДВ
1990	12; 15–16; 22; 24; 29	—	ЗС + ДВ, ВС, ББ (2)	—
1991	5–6; 15–17; 26–27	—	Е + ДВ (2), ДВ	—
1987–1991	19 дней, 12 периодов	9 дней, 1 период	QR = 0,5	
1992	23	9–18	Е	ББ
1993	14–15; 21, 23; 28	—	Е + ДВ, ДВ/ВС, ДВ	—
1994	4; 8; 20–21	10–18	ВС (2), ББ	Е
1995	9; 21	1–8; 14–20; 22–31	Е, ББ	ББ (2), ЗС/ВС
1996	28	12–21	ВС	Е + ЗС/ВС
1992–1996	14 дней, 10 периодов	54 дня, 6 периодов	QR = 3,9	
1997	2; 17, 19; 28	3–10	Е (2), ББ	ББ
1998	14–15; 25–26	6–13	ДВ, ББ	ДВ
1999	1; 26; 28	10–24	ББ (2)	Е + ДВ
2000	6–7; 19; 27	—	ББ, Е + ЗС + ДВ, ДВ	—
2001	6–7	10–20; 24–31	ББ	Е + ДВ, ДВ
1997–2001	18 дней, 11 периодов	50 дней, 5 периодов	QR = 2,8	
2002	11, 13	16–31	Е + ДВ	Е/ЗС + ВС/ДВ
2003	20–21; 26; 30	1–12	Е + ДВ (3)	Е + ДВ
2004	20	10–19	Е/ЗС	ЗС + ДВ
2005	—	2–10	—	Е + ДВ
2006	6; 8–9; 22	—	Е, ВС/ДВ	—
2002–2006	11 дней, 7 периодов	47 дней, 4 периода	QR = 4,3	
2007	13; 31	1–12; 15–30	ЗС, ББ	ЗС + ДВ, ЗС + ДВ
2008	10; 26	11–21	ББ, Е	Е/ЗС + ДВ
2009	3	22–31	ББ	ББ
2010	14	16–23	Е	Е
2011	5–6	10–18	ВС/ДВ	ВС/ДВ
2007–2011	8 дней, 7 периодов	65 дней, 6 периодов	QR = 8,1	
2012	16; 30	—	Е + ДВ, ББ	—
2013	31	1–23	Е + ВС/ДВ	Е + ЗС/ВС + ДВ
2014	6	7–18; 20–31	ББ	Е + ДВ, Е
2015	12	1–11; 18–25	ДВ	ББ (2)
2016	9; 21–22	1–8; 23–31	ББ, Е + ЗС	ББ, Е + ДВ
2012–2016	8 дней, 7 периодов	84 дня, 7 периодов	QR = 10,5	

Примечание. Прочерк — события отсутствовали. В скобках показано количество событий. Периоды с осадками отделяются друг от друга точкой с запятой.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1, а приведены графики месячного количества осадков в июле в бассейне Селенги по данным двух версий GPCC. Хорошо видно, что до середины 1930-х гг. данные разных версий GPCC существенно различаются. Данные GPCC Version 7 демонстрируют слишком большую амплитуду

межгодовых колебаний по сравнению с данными более поздней версии Version 2018. Использование последней версии, прошедшей существенную коррекцию, представляется более правильным. На рис. 1, б приведены графики суммарных осадков, согласно версии Version 2018, за 1935–2017 гг. В этот период данные двух версий GPCC практически совпадают. Можно выделить несколько длительных (4 года и более) периодов с отрицательными аномалиями осадков: 1935–1939, 1955–1958, 1977–1981, 2007–2011, 2013–2017 гг. Последний период характеризуется наиболее низкими величинами осадков.

Для анализа суточных вариаций осадков выделен период 1982–2016 г. (см. рис. 1, в). Он характеризуется достоверными данными атмосферного реанализа и надежными сведениями о количестве атмосферных осадков. В таблице показаны результаты анализа событий с разным количеством осадков, приведены сводные данные о событиях (по календарным дням) с различным количеством осадков в июле и регионах, в которых соблюдалось условие блокирования ($GHGS > 0$). Подведен итог по

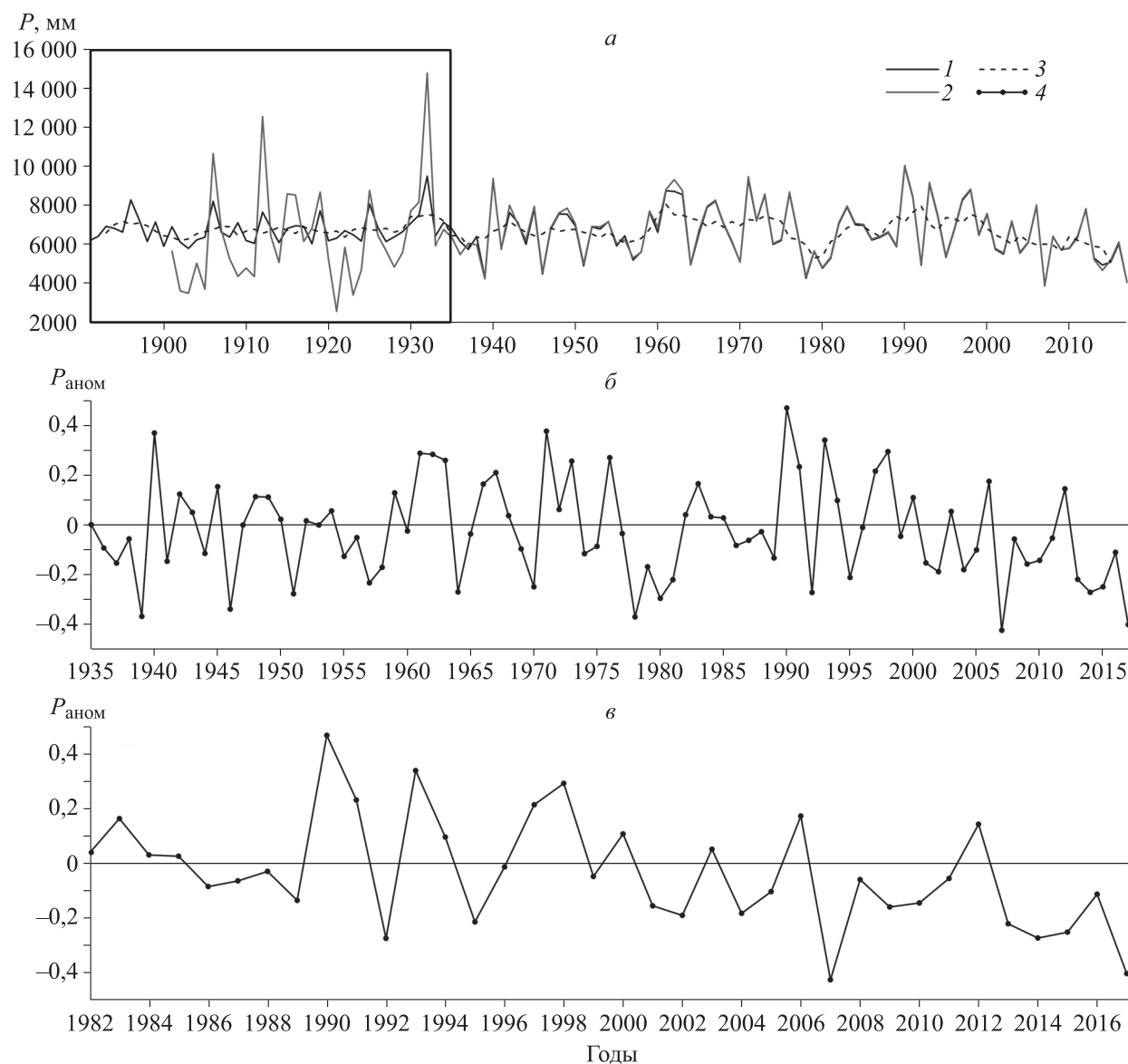


Рис. 1. Вариации количества атмосферных осадков в июле в бассейне р. Селенги.

а — суммарное количество осадков, сравнение двух баз данных (прямоугольником выделен период до 1935 г.), б, в — аномалии количества осадков за 1935–2016 гг. относительно среднего за весь период. Данные по: 1 — GPCC Version 2018, 2 — GPCC Version 7. 3 — скользящее среднее за пять лет; 4 — аномалии количества осадков по данным GPCC Version 2018.

пятилетиям, приведено общее количество дней. Можно заметить тенденцию к сокращению дней с большим количеством осадков и увеличению числа засушливых периодов. Наиболее благоприятным для формирования стока Селенги были 1987–1991 гг., наименее благоприятными — 2007–2016 гг., когда только один год характеризовался осадками выше нормы.

Что касается статистики блокирования для периодов с большим и малым количеством осадков, то в первом случае ($P > 500$) наблюдались следующие ситуации блокирования: ББ — 21 (31 %), Е — 12 (18), ДВ — 7 (10), Е + ДВ — 8 (12), ВС — 6 (9), Е + ЗС (Е/ЗС) — 3 (4,5), ВС + ДВ (ВС/ДВ) — 6 (9), ЗС + ДВ — 1 (1,5), Е + ЗС + ДВ 1 (1,5), ЗС — 1 (1, 5), Е + ВС/ДВ — 1 (1,5 %). Таким образом, Е-блокинг фиксировался в 25 случаях (40 %), ЗС — 5 (7,5 %), ВС — 11 (16,2 %), ДВ — 21 (31,8 %). Для периодов с малым количеством осадков ($P < 200$) характерны следующие ситуации: ББ — 9 (28 %), Е — 4 (13), ДВ — 3 (9,1), Е + ДВ — 6 (18), ЗС + ДВ — 3 (9,1), Е + ВС/ДВ — 1 (3), ВС/ДВ — 1 (3), ЗС/ВС — 1 (3), ЗС + ВС/ДВ — 1 (3), Е + ЗС/ВС — 1 (3), Е + ЗС/ВС + ДВ — 1 (3), Е/ЗС + ВС/ДВ — 1 (3). Е-блокинг наблюдался в 15 случаях (47,1 %), ЗС — 8 (24 %), ВС — 6 (18 %).

В обоих случаях ($P > 500$, $P < 200$) часто фиксировались блокинги над Европой и Дальним Востоком, примерно треть всех событий приходилась на периоды без блокингов. Реже наблюдались блокирования над Восточной и Западной Сибирью. В периоды с небольшим количеством осадков отмечалось больше Е- и ДВ-блокингов, отсутствие ВС-блокингов вне комбинации с другими типами блокирования. Если в первом случае ($P > 500$) ЗС-блокинги часто сопровождалась ВС-блокингами, то во втором ($P < 200$) — блокингами из группы Е + ДВ, а также ДВ-блокингами. Если при этом ВС-блокинги отсутствовали, то количество суммарных осадков в бассейне Селенги было, как правило, ниже нормы.

В 9 из 13 случаев с положительными аномалиями осадков (1982, 1983, 1984, 1985, 1990, 1991, 1993, 1994, 1997, 1998, 2000, 2006, 2012 гг.) наблюдались ВС-блокинги в разных комбинациях, в остальных случаях — Е- либо ДВ- блокинги. Для лет с отрицательными аномалиями осадков в период современного маловодья (2001, 2002, 2004, 2005, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2013, 2014, 2015, 2016 гг.) были характерны комбинации блокингов Е + ДВ, ЗС + ДВ и отсутствие ВС-блокингов.

В целом различия между блокированиями для $P > 500$ и $P < 200$ не столь велики, как ожидалось, поэтому нельзя однозначно говорить о влиянии блокирования, основываясь только на сведениях о локализации блокингов. Как оказалось, ключевыми для формирования осадков могут быть особенности динамики блокингов и подвижных барических аномалий, обусловленные, возможно, динамикой и опрокидыванием неустойчивых волн Россби [20]. Анализ этих особенностей был выполнен для нескольких ситуаций блокирования с положительными и отрицательными аномалиями осадков. Были использованы композитные карты, построенные по среднесуточным данным. На первую карту наносились распределение осадков и линии тока на уровне 850 гПа; на вторую — распределение потенциальной температуры на динамической тропопаузе (PV- θ) и линии тока на уровне 500 гПа. Композитные карты позволили оценить условия формирования фронтальной системы EASM, степень вовлечения муссонных воздушных масс, а также особенности блокирований.

События с выпадением большого количества осадков. Как показал предварительный анализ выпадения осадков в июле для ряда лет (1983, 1988, 1990, 1991, 1993, 1994, 1997, 1998, 2006, 2000, 2001), интенсивные осадки носят, как правило, фронтальный характер и выпадают преимущественно в виде серий. На основе анализа этих серий выделено несколько типов динамики осадков и связанных с ними аномалий циркуляции.

Первый тип — фронтальная возмущенность и связанные с ней серии осадков возникают на широте Монголии восточнее или над бассейном Селенги и смещаются вдоль широтного круга. Российская часть бассейна Селенги при этом оказывается не вовлеченной в процесс. Таких случаев выделено восемь: (12.07.1983, 23.07.1983 (24)¹, 24.07.1990 (25), 20–22.07.1993, 8.07.1994, 17–19.07.1997, 28.07.1997 (27–29), 22.07.2006).

Второй тип — фронтальные процессы начинаются на северо-западе от бассейна Селенги, серии осадков смещаются в широтном направлении, осадки выпадают в основном в российской части бассейна. Всего выделено шесть подобных случаев: 18.07.1983 (16, 17), 22.07.1990, 5–6.07.1991, 4.07.1994 (3), 25–26.07.1998, 27.07.2000 (26, 28).

¹ Даты приведены на основании таблицы ($P > 500$), в скобках указаны смежные даты (календарные дни) для анализа циклонической серии в целом.

Третий тип — при возникновении и перемещении барических аномалий серии осадков охватывают весь бассейн Селенги. Отмечено пять событий: 26–27.07.1991, 20–21.07.1994, 2.07.1997, 14–15.07.1998, 19.07.2000.

Четвертый тип — осадки сначала выпадают в монгольской части бассейна, затем распространяются либо на весь бассейн, либо к северу на российскую часть, где в основном усиливаются. Выделено пять случаев: 28–30.07.1982, 27–28.07.1983, 12–15.07.1990, 14–15.07.1993, 8–9.07.2006.

Пятый тип — осадки сначала выпадают относительно равномерно по всему бассейну, а затем смещаются в северные районы, где, как правило, усиливаются. Выделено четыре случая: 25–26.07.1988, 15–17.07.1991, 6–7.07.2000, 6–7.07.2001.

Большой интерес вызывают особенности циркуляции, определяющие смещение максимумов осадков на российскую или монгольскую часть бассейна, а также связь этих особенностей с типами блокирования. Анализ композитных карт показал, что в периоды выпадения осадков бассейн Селенги расположен в области циклонического прогиба струйного течения. Циклонический прогиб возникает при смещении вдоль оси струйного течения областей с более низкой, чем окружающая, потенциальной температурой. Распространение этих областей приводит к возникновению и(или) усилению фронтальных процессов, в том числе за счет адвекции воздушных масс из области EASM. Возникающие на фронтах циклоны могут смещаться на восток или северо-восток, где и выпадают основные осадки, но могут и стационаривать в районе бассейна, вызывая серию осадков. Источником возмущений с низкой потенциальной температурой является полярная область. Если вторжение полярной воздушной массы (ПВМ) в более низкие широты и смещение на восток вдоль струи барических аномалий происходят быстро, холодный воздух не успевает трансформироваться и хорошо виден на картах. Температура воздуха в отсеченных областях ниже 326 К. Такие процессы выглядят как традиционные фронтальные, и в целом их анализ не вызывает особых затруднений. Как оказалось, основная роль в процессах данного типа принадлежит связкам блокингов E + ДВ.

Для примера на рис. 2, а приведены композитные карты за несколько дней до момента выпадения осадков и в период их выпадения 25–26 июля 1988 г. Выделено несколько стадий вторжения и дальнейшего смещения ПВМ.

Стадия 1 (см. рис. 2, а, 20 июля) — блокинг над Европой, начинает формироваться ДВ-блокинг (120° в. д.). Хорошо виден процесс циклогенеза восточнее оз. Байкал, который не затрагивает бассейн Селенги. Восточнее E-блокинга наблюдается адвекция ПВМ.

Стадия 2 (см. рис. 2, а, 22 июля) — антициклон над Европой ослабевает, усиливается ДВ-блокинг. Завершается процесс циклогенеза восточнее Байкала, ПВМ отсекается и смещается на юг.

Стадия 3 (см. рис. 2, а, 24 июля) — антициклон над Европой ослабевает, а ДВ-блокинг усиливается. Окончательно завершается циклогенез восточнее Байкала. ПВМ смещается на восток, западнее Байкала формируется фронтальная область, начинают выпадать осадки.

Стадия 4 (см. рис. 2, а, 26 июля) — ПВМ смещается еще восточнее, формируется циклон, в теплый сектор которого поступают воздушные массы из области блокирования над Дальним Востоком.

Поскольку осадки при таких процессах связаны с теплым сектором циклона, расположенного, как правило, к северу от смещающейся ПВМ, большое количество осадков выпадает в северной части бассейна (5–6 июля 1991 г., 18.07.1983, 25–26.07.1988, 2.07.1997, 19.07.2000, 27.07.2000 и 5–6.07.2001). Большое влияние на адвекцию ПВМ оказывает положение струйного течения. Это иллюстрируют случаи с холодной ПВМ, но с осадками в монгольской части бассейна (12.07.1983, 27.07.1997, 8–9.07.2006). Как уже было отмечено, в процессах этого типа в основном преобладает связка блокингов E + ДВ или же блокинги отсутствуют (начало июля 2000, 2001 гг.). Отметим, что ни в одном случае, за исключением 19.07.2000, выпадение осадков в бассейне не происходило при одновременной реализации блокингов над Европой и Дальним Востоком. Важным правилом является то, что ослабление антициклона над Европой и смещение ПВМ к востоку от него происходит одновременно, по крайней мере для омега-блокингов. Можно привести ряд случаев, когда во время выпадения осадков наблюдался E-блокинг, непосредственно с ними не связанный.

Рассмотрим другой случай, когда ПВМ, вызывающая возникновение осадков в районе бассейна Селенги, имела более южную траекторию. Эти процессы, в противоположность предыдущему случаю, обозначены как «теплые» (температура воздуха в ПВМ >326 К). На рис. 2, б приведен случай выпадения серии осадков в Монголии 21–23 июля 1993 г.

Стадия 1 (см. рис. 2, б, 18 июля) — над Западной Сибирью расположен гребень, к востоку от которого выделяется узкая полоса ПВМ. Нигде, кроме Дальнего Востока, нет блокирований. Осадки выпадают на западе Монголии.

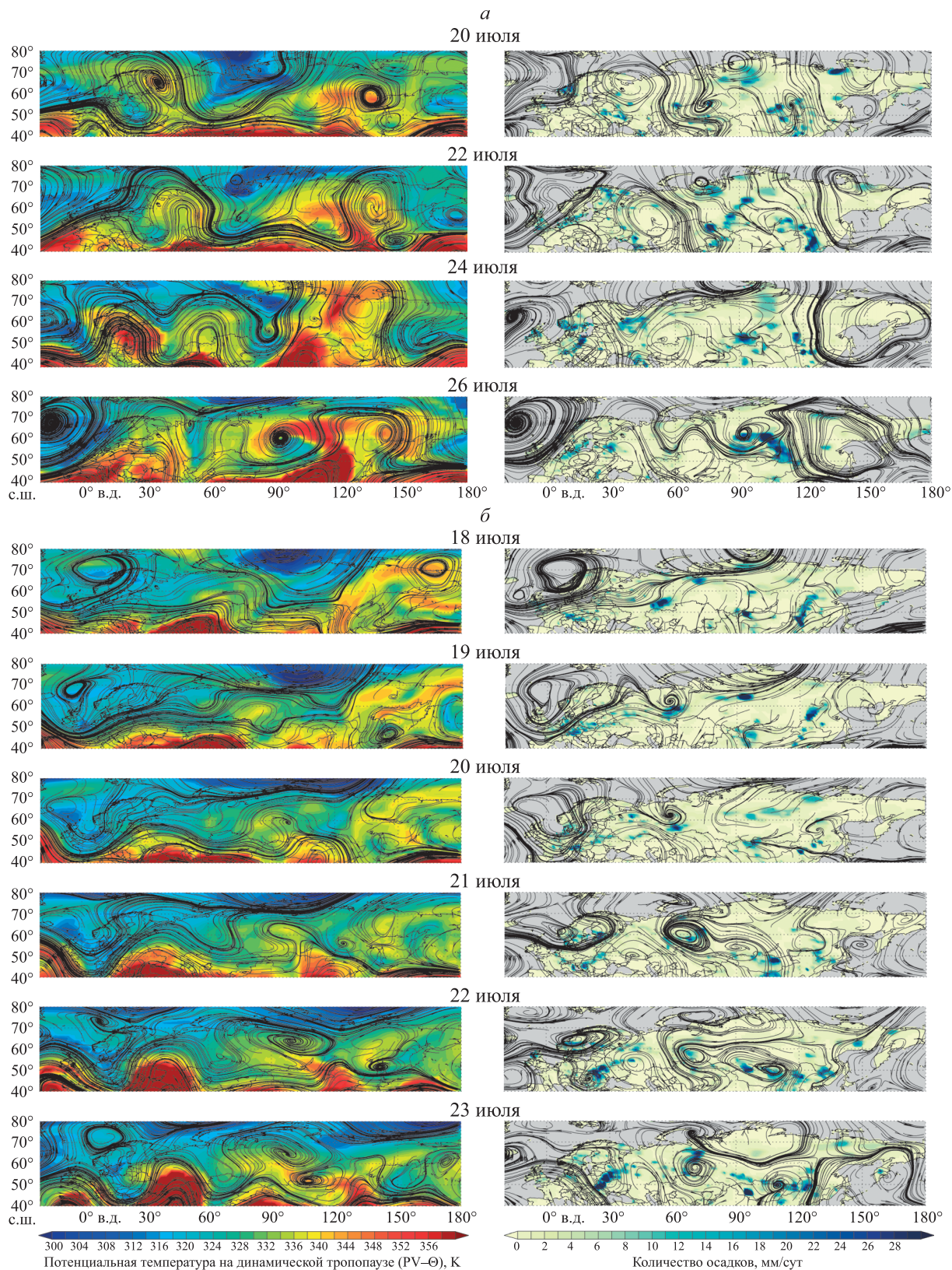


Рис. 2. Композитные карты для 20, 22, 24, 26 июля 1988 г. (а) и для 18–23 июля 1993 г. (б). Здесь и на рис. 3: слева — распределение PV-θ и линий тока на уровне 500 гПа, справа — суммарное количество осадков за сутки и линии тока на уровне 850 гПа.

Стадия 2 (см. рис. 2, б, 19 июля) — наиболее важная динамическая стадия — в процессе смещения гребня часть ПВМ оказывается восточнее своего начального положения, а южная часть ПВМ отсекается и оказывается на западе Монголии, где и выпадают осадки.

Стадия 3 (см. рис. 2, б, 20 июля) — обе части ПВМ начинают медленно двигаться на восток, но этому препятствует ДВ-блокинг. Смещающийся с территории Западной Сибири гребень начинает усиливаться. Осадки выпадают на западе Монголии.

Стадия 4 (см. рис. 2, б, 21 июля) — ПВМ над Монголией продолжает смещаться на восток, над Восточной Сибирью усиливается гребень и формируется антициклон, осадки распространяются на всю Монголию.

Стадия 5 (см. рис. 2, б, 22–23 июля) — над Восточной Сибирью отчетливо виден дипольный блокинг, его циклоническая часть заполняется муссонными воздушными массами.

Перечисленные особенности динамики воздушных масс частично описаны в [11]. Такие же процессы развивались 12–15.07.1990, 8–9.07.1994, 14–15.07.1998, 22.07.2006. Похожие черты циркуляции отмечались при выпадении осадков 28–30.07.1982, 27–28.07.1983, 16.07.1991, 27.07.1991, 3–4.07.1994, 5–6.07.2000, но они были менее выражены (смещающийся гребень хоть и усиливался, как показано на рис. 2, б, но в виде ВС-блокинга не выделился).

Индивидуальные черты имели процессы без блокирования 22.07.1990, 24.07.1990, 21.07.1994; сопровождающиеся блокинками над Дальним Востоком (15.07.1993), над Европой (17–19.07.1997 и 23.07.1983) и Западной Сибирью (25.07.1998). Однако так или иначе осадки были связаны с ПВМ разной степени трансформации.

Длительные засушливые периоды. События, иллюстрирующие особенности крупномасштабной циркуляции атмосферы в выбранные для анализа годы (1995, 2002, 2007, 2013), можно разделить на две группы. К первой относятся случаи, когда бассейн Селенги оказывается под влиянием стационарного антициклона с центром в районе Монголии. На рис. 3, а приведен пример такой циркуляции 20, 22, 24, 26 июля 2002 г. Видна эволюция холодной ПВМ, но, в отличие от ранее рассмотренного случая (см. рис. 2, а), поля метеовеличин более стационарны, ПВМ не смещается, антициклоны по обе стороны от ПВМ интенсивны, а поскольку один из них расположен в районе Байкала, это приводит к полному отсутствию осадков.

Процессы такого типа характерны для современного маловодья на Селенге (особенно в 1999–2010 гг.). Этот вывод согласуется с результатами большого количества работ [1, 21, 22], в которых обращается внимание на рост геопотенциала в средней и верхней тропосфере, усиление волн тепла, а также на появление стационарного антициклона в районе Монголии. Результаты, приведенные в таблице, указывают на то, что такие процессы сопровождалась блокинками Е + ДВ. Различие между ними в случаях выпадения и отсутствия осадков может заключаться в продолжительности европейского блокинга, а также в локализации и формировании блокинга восточнее Байкала. Отметим, однако, что усиление антициклональной циркуляции над Монголией может не сопровождаться выраженным блокированием. В качестве примера можно отметить события 14–20 июля 1995 г. и 20–29 июля 2007 г.

Длительное отсутствие осадков может быть связано и с тем, что осадкообразующие процессы не развиваются продолжительное время или же не затрагивают бассейн Селенги. Хорошим примером могут служить события 15–20 июля 2007 г. и 15–23 июля 2013 г. На рис. 3, б приведены композитные карты за период с 12 по 18 июля 2013 г., когда процессы, связанные с муссонным фронтом, развивались восточнее бассейна Селенги.

Стадии 1, 2 (см. рис. 3, б, 12, 14 июля) — над Западной Сибирью и Дальним Востоком расположены гребни высокого давления, между ними находится ложбина, заполненная ПВМ.

Стадия 3 (см. рис. 3, б, 16 июля) — ПВМ отсекается, над Западной Сибирью и Дальним Востоком гребни усиливаются и формируется блокинг. Количество осадков на территории Дальнего Востока увеличивается.

Стадия 4 (см. рис. 3, б, 18 июля) — ПВМ между гребнями исчезает, устанавливается ДВ-блокинг, блокирование над Сибирью усиливается за счет адвекции воздуха с востока.

Возможной причиной современного состояния летней циркуляции может быть ослабление полярного вихря вследствие таяния льдов в Арктике, ускорившегося с середины 1990-х гг. [23]. Что касается обнаруженных ранее корреляционных связей [9], то они сохраняются относительно режимов выпадения осадков, но неясно, в какой области относительно этих режимов окажется бассейн Селенги. Чувствительность стока в бассейне Селенги к изменениям климата определяется, вероятно, в первую очередь двумя характеристиками: положением муссонного фронта и волновыми свойствами потока умеренных широт.

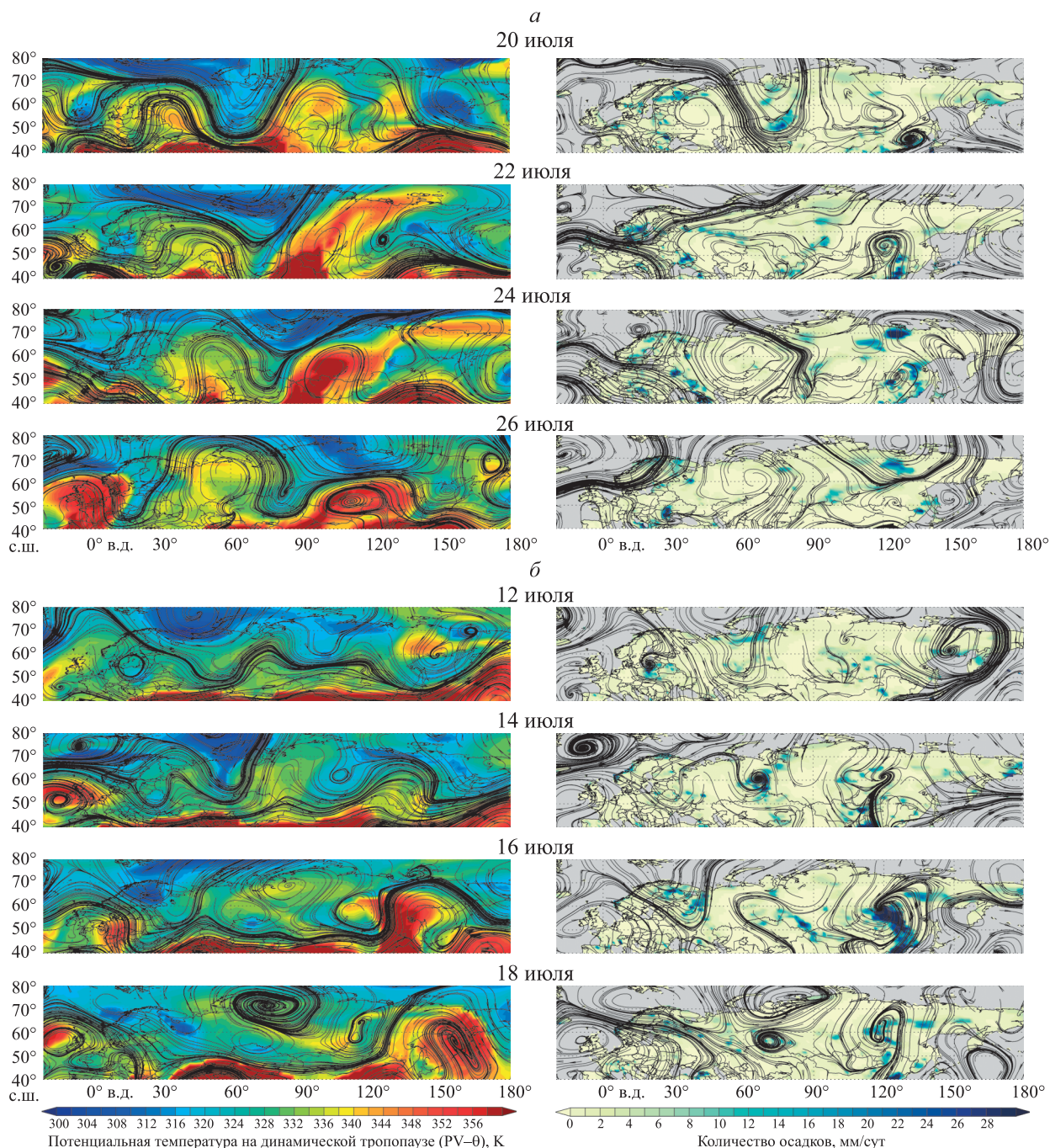


Рис. 3. Композитные карты для 20, 22, 24 и 26 июля 2002 г. (а) и для 12, 14, 16, 18 июля 2013 г. (б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа долговременной изменчивости и особенностей формирования атмосферных осадков в июле в бассейне р. Селенги выделены периоды с отрицательными аномалиями осадков: 1935–1939, 1955–1958, 1977–1981, 2007–2011, 2013–2017 гг. С 2007 по 2017 г. наблюдалось минимальное количество осадков в июле.

Для отбора периодов с экстремальными характеристиками были построены гистограммы суммарного количества осадков в бассейне Селенги за каждый июль с 1982 по 2016 г. На основе анализа полученных гистограмм выбрано 67 событий с большим ($P > 500$) количеством осадков и 32 засуш-

ливых периода ($P < 200$). В целом события обеих групп чаще всего сопровождались блокингами над Европой и Дальним Востоком, треть всех событий приходилась на периоды без блокингов. Реже всего наблюдались блокирования над Восточной и Западной Сибирью. Для засушливых периодов было характерно увеличение количества Е- и ДВ-блокингов и уменьшение числа ВС-блокингов. При $P > 500$ ЗС-блокинги в основном комбинировались с ВС-блокингами, а при $P < 200$ — с группой Е + ДВ-блокингов, а также с ДВ-блокингами.

Синоптический анализ позволил уточнить связь между блокингами и выпадением осадков в регионе. Оказалось, что в периоды выпадения осадков бассейн Селенги расположен в области циклонического прогиба струйного течения, обусловленного смешивающимися вдоль его оси областями с более низкой, чем окружающая, потенциальной температурой. Эти области были обусловлены адвекцией полярного воздуха. Роль блокингов заключалась в следующем: Е-, Е + ЗС-блокинги регулировали поступление в умеренные широты воздушных масс из полярной области. Хотя этот тип блокирования часто наблюдается одновременно с осадками на Селенге, непосредственно они между собой не связаны. Бывают исключения, но они редки. ВС-блокинги связаны с осадками в бассейне Селенги через усиление муссонного фронта в районе бассейна, осадки при этом имеют муссонный характер и весьма интенсивны. При этом ВС-блокинги чаще всего представляют собой не усилившиеся гребни высокого давления, а дипольные образования с циклонической частью, заполненной воздушными массами летнего муссона. ДВ-блокинги при определенных конфигурациях являются преградой для смещения ПВМ восточнее бассейна Селенги, при этом они формируются и усиливаются за счет циклонов, смещающихся с запада. Для ряда событий было показано, что процесс выпадения осадков на Селенге сопровождается чередованием блокирований над Европой и Дальним Востоком.

Как показал анализ различных циркуляционных схем, количество осадков в бассейне Селенги более определенно связано с ВС-блокингами (1990, 1993, 1994, 1998 г.). Наличие Е- и ДВ-блокингов не гарантирует выпадения осадков в бассейне Селенги, и в ряде случаев Е + ДВ-блокинги (особенно в период современного маловодья) приходятся на засушливые периоды.

Важное значение для выпадения осадков в бассейне Селенги имеют положение струйного течения и динамические схемы формирования блокингов. Изменения этих ключевых характеристик могут приводить, во-первых, к тому, что связка блокингов Е + ДВ будет в большей степени провоцировать засухи. Во-вторых, может измениться схема формирования ВС-блокингов. При северном положении струйного течения ВС-блокинг не будет приводить к экстремальным осадкам или, как в случае ЗС + ВС/ДВ в 2013 г., будет способствовать засухам.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (17-77-10035).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **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 природ. ресурсы. — 2012. — № 3. — С. 61–68.
2. **Frolova N.L., Belyakova P.A., Grigoriev V.Y., Sazonov A.A., Zotov L.V., Jarsjö J.** Runoff fluctuations in the Selenga River Basin // Regional Environmental Change. — 2017. — Vol. 17, N 7. — P. 1965–1976.
3. **Хромов С.П.** Муссоны в общей циркуляции атмосферы // А.И. Воейков и современные проблемы климатологии. — Л.: Гидрометеиздат, 1956. — 283 с.
4. **Ding Y., Wang Z., Sun Y.** Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences // Journ. of Climatology. — 2008. — Vol. 28, N 9. — P. 1139–1161.
5. **Park Y.-J., Ahn J.-B.** Characteristics of atmospheric circulation over East Asia associated with summer blocking // Journ. of Geophysical Research: Atmospheres. — 2014. — Vol. 119, N 2. — P. 726–738.
6. **Yihui D., Chan J.C.L.** The East Asian summer monsoon: an overview // Meteorology and Atmospheric Physics. — 2005. — Vol. 89, N 1–4. — P. 117–142.
7. **Rex D.F.** Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate // Tellus. — 1950. — Vol. 2, N 3. — P. 196–211.
8. **Palmén E.H., Newton C.W.** Atmospheric Circulation Systems: Their Structure and Physical Interpretation. — New York: Academic Press, 1991. — 603 p.
9. **Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Martynova Yu.V., Mordvinov V.I.** The impact of atmospheric blocking on spatial distributions of summertime precipitation over Eurasia // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. — 2016. — Vol. 48 [Электронный ресурс]. — <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/48/1/012035> (дата обращения 20.12.2018).

10. **Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Devyatova E.V., Martynova Yu.V., Mordvinov V.I.** Precipitation in the Selenga River basin during atmospheric blocking over Europe and the Russian Far East in July // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2018. — Vol. 211 [Электронный ресурс]. — <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/211/1/012054> (дата обращения 20.12.2018).
11. **Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Девятова Е.В., Мордвинов В.И.** Динамические процессы в атмосфере, обуславливающие аномалии осадков в Восточной Сибири и Монголии в летний период // Фундаментальная и прикладная климатология. — 2018. — № 1. — С. 10–27.
12. **Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Mordvinov V.I.** Precipitation in the Lake Baikal basin associated with different patterns of atmospheric blocking over Western Siberia // 24rd Int. Symp. Atm. and Ocean Optics: Atm. Physics. — 2018. — Vol. 10833 [Электронный ресурс]. — <http://spie.org/Publications/Proceedings/Paper/10.1117/12.2505574> (дата обращения 10.12.2018).
13. **Schneider U., Becker A., Finger P., Meyer-Christoffer A., Ziese M.** GPCC Full Data Monthly Product Version 2018 at 1.0°: Monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges built on GTS-based and Historical Data. — 2018 [Электронный ресурс]. — <https://www.dwd.de/EN/ourservices/gpcc/gpcc.html> (дата обращения 10.12.2018).
14. **Ziese M., Becker A., Finger P., Meyer-Christoffer A., Rudolf B., Schneider U.** GPCC First Guess Product at 1.0°: Near Real-Time First Guess monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges based on SYNOP. — 2011 Data [Электронный ресурс]. — https://opendata.dwd.de/climate_environment/GPCC/html/gpcc_firstguess_doi_download.html (дата обращения 10.12.2018).
15. **Ziese M., Rauthe-Schöch A., Becker A., Finger P., Meyer-Christoffer A., Rudolf B., Schneider U.** GPCC Full Data Daily Version 2018 at 1.0°: Daily Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges built on GTS-based and Historic Data. — 2018 [Электронный ресурс]. — <https://www.dwd.de/EN/ourservices/gpcc/gpcc.html> (дата обращения 10.12.2018).
16. **Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., Berg L.V.D., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J., Park B., Peubey C., Rosnay P.D, Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F.** The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Quarterly Journ. of the Royal Meteorological Society. — 2011. — Vol. 137, N 656. — P. 553–597.
17. **Lejenäs H., Økland H.** Characteristics of northern hemisphere blocking as determined from a long time series of observational data // Tellus A. 1983. — Vol. 35, N 5. — P. 350–362.
18. **Tibaldi S., Molteni F.** On the operational predictability of blocking // Tellus A. — 1990. — Vol. 42, N 3. — P. 343–365.
19. **Barriopedro D., García-Herrera R., Lupo A.R., Hernández E.A.** A climatology of northern hemisphere blocking // Journ. of Climate. — 2006. — Vol. 19, N 6. — P. 1042–1063.
20. **Masato G., Hoskins B.J., Woollings T.J.** Wave-breaking characteristics of midlatitude blocking // Quarterly Journ. of the Royal Meteorological Society. — 2011. — Vol. 138, N 666. — P. 1285–1296.
21. **Schubert S.D., Wang H., Koster R.D., Suarez M.J., Groisman P.Y.** Northern Eurasian heat waves and droughts // Journ. of Climate. — 2014. — Vol. 27, N 9. — P. 3169–3207.
22. **Erdenebat E., Sato T.** Recent increase in heat wave frequency around Mongolia: role of atmospheric forcing and possible influence of soil moisture deficit // Atmospheric Science Letters. — 2015. — Vol. 17, N 2. — P. 135–140.
23. **Cohen J.** The Relationship between recent arctic amplification and extreme mid-latitude weather // Our Warming Planet: Topics in Climate Dynamics. Vol. 1: World Scientific. — Singapore: World Scientific Publishing, 2018. — P. 155–175.

Поступила в редакцию 15.10.2018

После доработки 14.01.2019

Принята к публикации 26.06.2019