

**ИЗМЕНЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ И ИНТЕНСИВНОСТИ  
ЛЕТНЕГО ВОСТОЧНОАЗИАТСКОГО МУССОНА  
В ПЕРИОДЫ АТМОСФЕРНОГО БЛОКИРОВАНИЯ НАД АЗИЕЙ**

**<sup>1</sup>О.Ю. Антохина, <sup>1</sup>П.Н. Антохин, <sup>2</sup>Е.В. Девятова, <sup>2</sup>В.И. Мордвинов**

**CHANGE IN EAST ASIAN SUMMER MONSOON SPATIAL STRUCTURE  
AND INTENSITY DURING THE ATMOSPHERIC BLOCKING PERIODS OVER ASIA**

**<sup>1</sup>O.Yu. Antokhina, <sup>1</sup>P.N. Antokhin, <sup>2</sup>E.V. Devyatova, <sup>2</sup>V.I. Mordvinov**

В работе исследовано влияние атмосферного блокирования над Азией на характеристики циркуляции летнего Восточноазиатского муссона в период его максимального развития (июль). На основе анализа, выполненного для большого количества событий блокирования, были выявлены основные механизмы влияния блокинга на муссонный поток, а также изучены свойства циклонов, формирующихся в результате взаимодействия воздушных масс умеренных широт и тропиков. Оказалось, что атмосферное блокирование играет основополагающую роль в формировании переноса влаги Восточноазиатским муссоном и в перераспределении аномалий атмосферных осадков. При отсутствии блокингов над Азией влага Восточноазиатского муссона не распространяется на север, а при наличии блокинга его пространственная локализация полностью определяет конфигурацию аномалий осадков в северной части Восточной Азии. Также было обнаружено, что ослабление муссонной циркуляции в Восточной Азии связано с уменьшением повторяемости событий атмосферного блокирования в долготном секторе шириной около 30° с центром приблизительно над оз. Байкал.

In our work we investigate the influence of atmospheric blocking over Asia on the East Asian summer monsoon circulation in the period its maximum (July). Based on the analysis of large number of blocking events we identified the main mechanisms of blocking influence on the monsoon and studied the properties of cyclones formed by the interaction of air masses from mid latitude and tropics. It turned out that the atmospheric blockings play a fundamental role in the formation of the East Asia monsoon moisture transport and in the precipitation anomalies redistribution. In the absence of blockings over Asia East Asian monsoon moisture does not extend to the north, and in the presence of blockings their spatial configuration and localization completely determines the precipitation anomalies configuration in the northern part of East Asia. We also found that the weakening monsoon circulation in East Asia is associated with decrease in the frequency of atmospheric blocking events in the longitudinal sector width of about 30° with the center of the lake Baikal.

**Введение**

Наблюдающееся с конца 70-х гг. прошлого столетия ослабление фронтальной системы летнего Восточноазиатского муссона (МВА), и связанного с ней переноса влаги, привело к усилению засушливости в северных районах Восточной Азии [Ding et al., 2008; Zhu et al., 2012]. Было установлено, что с ослаблением муссонной циркуляции связан длительный период маловодья в бассейне оз. Байкал, наблюдающийся с 1996 по 2014 гг. Было выяснено, что снижение стока р. Селенги (основного притока оз. Байкал) является одним из проявлений ослабления муссонной циркуляции, т.к. бассейн реки попадает в область, увлажненность которой в большей степени регулируется муссонными процессами. [Бережных и др., 2012]. Возможные механизмы этих изменений остаются до конца не выясненными. Поскольку МВА, за счет его уникального положения, связан как с изменениями в тропиках, так и с циркуляцией умеренных широт, в качестве регуляторов его изменчивости может выступать целый ряд факторов. Но в большинстве работ все же большее внимание авторы уделяют изменениям в низких широтах [Li et al., 2010]. Тем не менее, согласно [Ding et al., 2005], большее внимание следует обращать на циркуляцию умеренных и даже высоких широт. В нашей работе [Антохина и др., 2014] мы так же продемонстрировали, что циркуляция в умеренных широтах Северного полушария имеет значимые различия в периоды сильного и слабого МВА, связанные с интенсивностью и положением полярного вихря и основных климатологических ложбин. Для более глубокого понимания связи циркуляции умеренных широт и МВА необходимы более детальные

исследования, описывающие конкретные механизмы регулирования муссонного фронта при различной конфигурации среднеширотного барического поля. Один из наиболее ярких процессов средних широт – процесс атмосферного блокирования, при котором происходит опрокидывание волн Россби [Pelly et al., 2003]. В периоды атмосферного блокирования нарушаются характерные для умеренных широт западный перенос и смещение к востоку погодных систем. С эпизодами блокирования зачастую связаны наиболее экстремальные погодные явления, такие как засухи, летом и периоды экстремальных похолоданий зимой. Авторами [Park et al., 2014] было показано, что блокирование Западной части Тихого океана существенным образом влияет на климат Кореи, зависящий от МВА. На наш взгляд необходим более широкий анализ процессов блокирования над Азией и характеристик муссона. Внимание исследователей в основном сосредоточено на двух районах блокирования в Азии: это Дальневосточно-Тихоокеанский регион (135–177° E) и Сибирско-Уральский (45–87.5° E), повторяемость блокирования в летний период максимальна именно в этих регионах. Область, находящаяся между этими районами практически не освещена исследованиями, хотя отдельные данные о межгодовой суммарной изменчивости в летний период приводятся, например в [Cheung et al., 2013]. Стоит отметить, что во всех исследованиях, регионы блокирования, выделялись сугубо формально на основе среднегогодовой повторяемости, поэтому и полученные связи носят только предварительный диагностический характер. В своей работе мы предлагаем более детальное исследование связи блокирования в каждом

районе Азии с режимами осадков и температуры за длительный интервал времени с 1948 по 2014 гг.

### Методика и данные

В основе нашего исследования лежит анализ пространственно-временных срезов изменчивости блокирования, а также синоптический анализ периодов блокирования. Для выделения блокирующих ситуаций были использованы критерии, рассчитанные по методике, предложенной в [Tibaldi et al., 1990]. Согласно данной методике на основе значений высоты геопотенциала 500 гПа в узлах регулярной сетки, были рассчитаны два критерия:

$$GHGS = \frac{H_{500}(\varphi_0) - H_{500}(\varphi_s)}{\varphi_0 - \varphi_s},$$

$$GHGN = \frac{H_{500}(\varphi_n) - H_{500}(\varphi_0)}{\varphi_n - \varphi_0},$$

где  $\varphi_n = 80^\circ \text{ N} \pm \Delta$ ,  $\varphi_0 = 60^\circ \text{ N} \pm \Delta$ ,  $\varphi_s = 40^\circ \text{ N} \pm \Delta$ ,  $\Delta = 4^\circ$ .

Блокирующей считалась ситуация, при которой  $GHGS > 0$ ,  $GHGN < -10$  м/градус широты. Условие  $GHGN$  фактически означает, что к северу от блокинга должен существовать сильный западный поток, таким образом, из «каталога блокирования» исключаются случаи аномального смещения на юг струйного течения умеренных широт и образование так называемых «отсеченных» областей пониженного давления (Cut-off low), такие случаи удовлетворяют условию  $GHGS > 0$ , но следуя синоптическому определению блокингами не являются. Этот подход является наиболее отработанным и оправданным с точки зрения автоматической идентификации блокингов.

Существует несколько классификаций для выделения событий блокирования с точки зрения их продолжительности. Пользуясь классификацией, приведенной в [Pelly et al., 2003], мы выделяли «мгновенные» блокинги (МБ, instantaneous blocking), к которым относят все блокирующие ситуации, зафиксированные на определенной долготе в конкретный синоптический срок, т. е. в эту категорию попали все события удовлетворяющие условиям критериев, указанным в работе [Tibaldi et al., 1990], независимо от их длительности, тогда как в стандартном синоптическом подходе блокирующей считается ситуация, при которой условия блокирования выполняются в течение пяти суток. Но для исследования долговременной изменчивости, можно брать только МБ, так как на длительных временных интервалах их изменчивость сходна с изменчивостью пятисуточных блокингов.

Дополнительно, для исследования конкретных ситуаций блокирования, кроме поля геопотенциала анализировались распределения потенциальной температуры вблизи динамической тропопаузы (PV- $\theta$ ). Эта характеристика стала все чаще привлекаться для анализа динамических образований средних широт, в связи с тем, что позволяет выделять воздушные массы различного происхождения и их трансформацию [Pelly et al., 2003].

Все исследования сделаны для июля – периода максимального развития МВА, кроме того именно

для этого периода характерно наиболее сильное ослабление муссонных процессов в северной части Восточной Азии. Для расчетов были использованы данные о высоте геопотенциальной поверхности 500 гПа ( $Z_{500}$ ), потенциальной температуре вблизи динамической тропопаузы (PV- $\theta$ ), температуре воздуха на высоте 2 м ( $T_2$ ) и количестве осадков из трех архивов ре-анализа в срок 12.00 по Гринвичу с суточным разрешением: NCEP/NCAR (R1) [Kalney et al., 1996] ( $Z_{500}$  с 1948 по 2014 г.), ECMWF ERA-40 [Gibson et al., 1996] ( $Z_{500}$  с 1958 по 1978 г.) и ERA-Interim ( $Z_{500}$ , PV- $\theta$ ,  $T_2$  и осадки с 1979 по 2014 г.) [Dee, 2011].

### Результаты

На рис. 1. приведены долготно-временные срезы суммарного количества блокирующих ситуаций по данным трех архивов, а также разности между ними. В целом стоит отметить, что архивы показывают хорошее соответствие, за исключением короткого периода конца 50-х начала 60-х гг. Эти различия, по всей видимости, связаны ошибкой в данных NCEP/NCAR, которую мы обсуждали в [Антохина и др., 2014]. На приведенных срезах можно выделить три региона блокирования, отличающихся по своим характеристикам. Два из них это регионы с наибольшей повторяемостью блокирования в летний период: Сибирско-Уральский ( $\approx 50$ – $85$  Е.) и Дальневосточно-Тихоокеанский ( $\approx 120$ – $160$  Е). Еще один район расположен между ними, для него повторяемость блокирования гораздо ниже, особенно в период с конца 70-х гг.

Рассмотрим теперь влияние блокирования в этих регионах на распределения полей давления, осадков и температуры. На рис. 2 показаны распределения коэффициентов корреляции суммарной повторяемости блокирования в трех рассматриваемых регионах и полей геопотенциала, осадков и температуры. Хорошо выделяются центры блокирования для разных районов, кроме того, видны положения ложбин в периоды блокирования, эти же особенности отчетливо проявляются в поле приземной температуры, для которой характерны еще более высокие коэффициенты связи. Стоит также отметить особенность, связанную с распределением геопотенциала и температуры в районе блокирования к северу и к югу от  $50^\circ \text{ N}$ , видно, что зоне повышенного давления, где непосредственно расположен блокирующий антициклон, к югу от  $50^\circ \text{ N}$  соответствует область пониженного давления, для которой характерны низкие температуры. Эта особенность проявляется для всех выделенных регионов. Такой тип блокирования известен как «дипольный блокинг».

Перейдем к анализу распределения осадков в период блокирования. Разумеется, в области блокирующего антициклона наблюдается уменьшение количества осадков, этого в принципе следовало ожидать. Так же хорошо видно, что для областей стационарирования ложбин по обе стороны от блокинга, напротив, их количество увеличивается. Больше осадков выпадает также над Арктикой, эти районы соответствуют северным перифериям антициклонов над указанными районами. Но, что еще более важно, с точки зрения

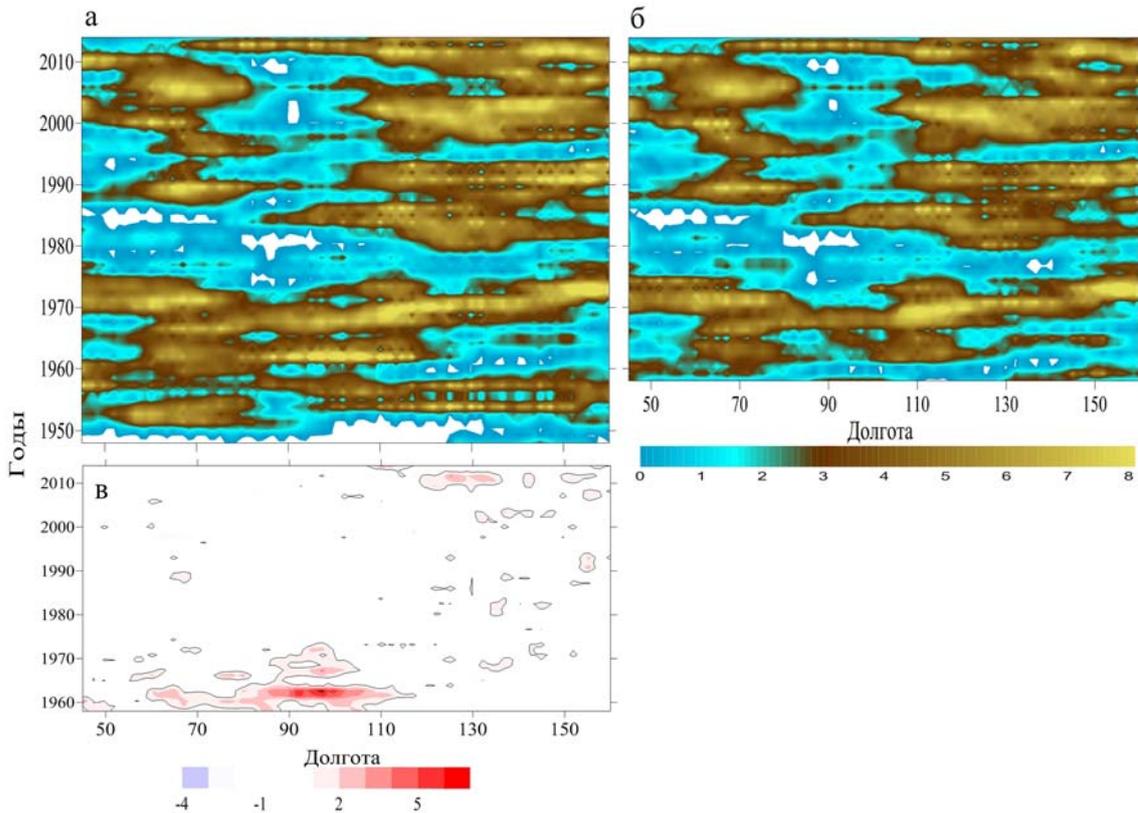


Рис. 1. Долготно-временной срез количества блокирующих ситуаций по данным NCEP/NCAR 1 (а) и данным ERA-40/Interim (б) и разности между ними (в).

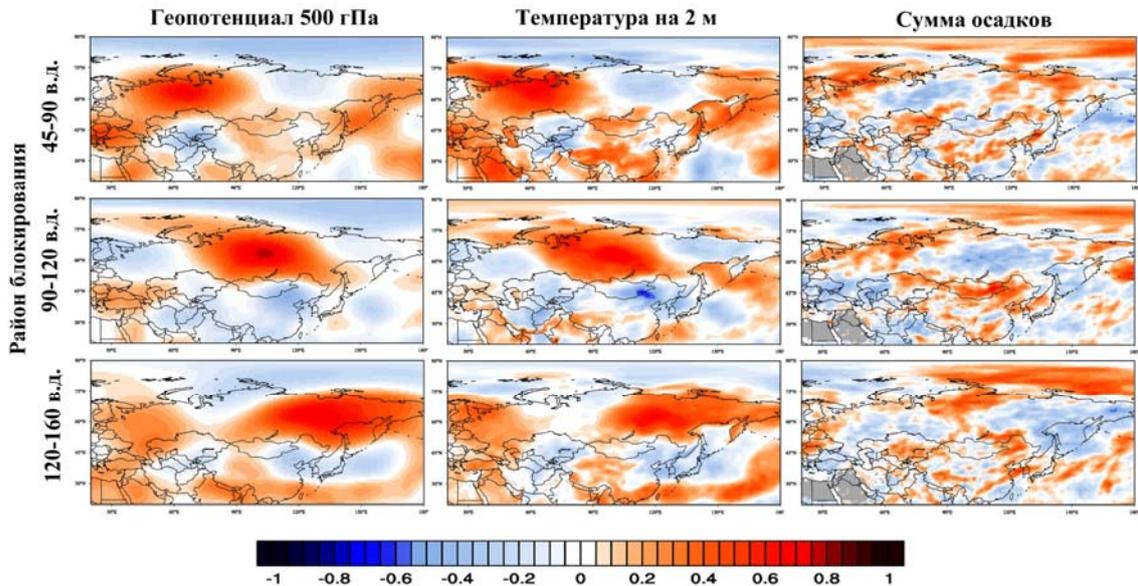
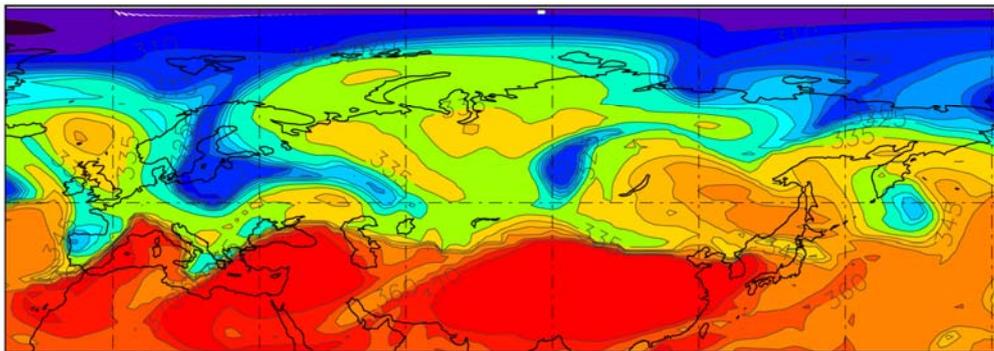
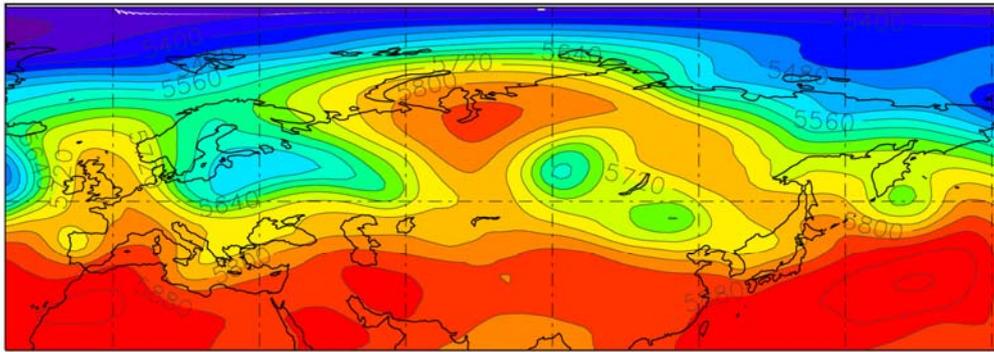


Рис. 2. Распределение коэффициентов корреляции повторяемости блокирования в трех основных регионах над Азией с характеристиками метеополей. Период 1979–2013 гг. по данным ERA-interim.

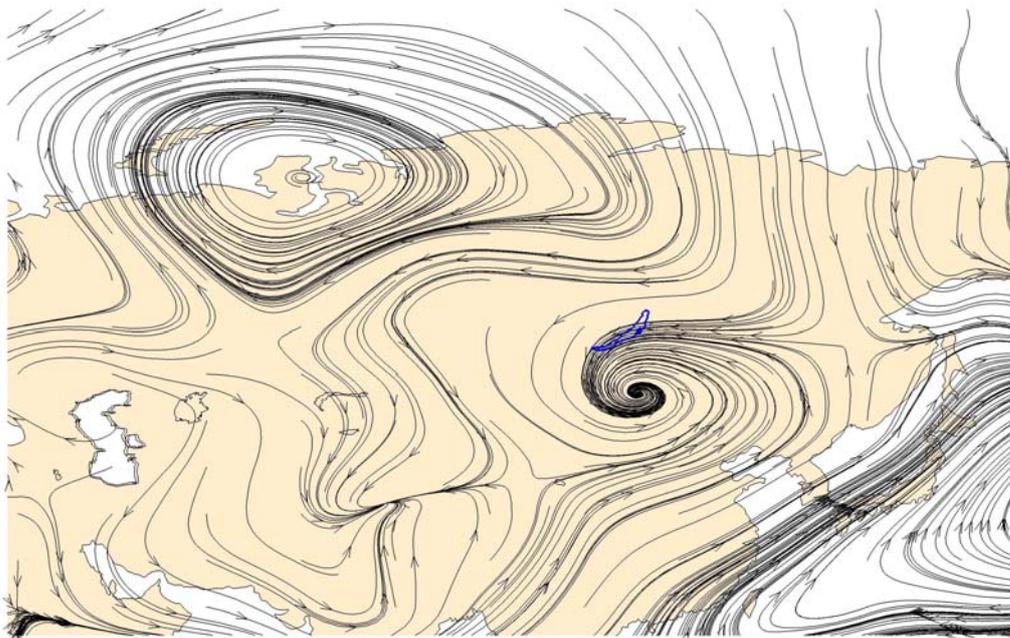
нашего исследования, в периоды блокирования возрастает количество осадков в южной части диполя блокирования. Эти районы относятся к аридному поясу азиатского континента, но в периоды блокирования над Азией, для этих районов характерно увеличение осадков. Причем наиболее аномальное выпадение осадков, характерно при наименее распространенном типе блокирования в области Восточной

Сибири: осадки выпадают в Северном Казахстане, по всей Монголии, а также в Северном Китае. При Сибирско-Уральском типе наиболее значимые увеличения осадков наблюдаются в Средней Азии, при Дальневосточном на восточной границе аридного пояса в Северном Китае и верховьях Амура.

Рассмотрим более детально механизм формирования осадков в аридных областях в период блоки-



а



б

Рис. 3. Распределение высоты геопотенциальной поверхности 500 гПа (вверху), потенциальной температуры на 2 PVU (внизу) (а); Линии тока на 850 гПа за 12 UTC 14 июля 1990 г. (б).

рования. На рис. 3 приведен пример блокирующей ситуации 14 июля 1990 г. в срок 12:00 по Гринвичу (в этом период в Забайкалье были зафиксированы экстремальные паводки). Видно, что в область пониженного давления, стационарирующую за счет блокирования в этот период, устремляются муссонные потоки, которые встречаются здесь с воздухом приходящим с севера. Очень интересную особенность можно увидеть на картах распределения показателя PV-θ, показывающим воздушные массы различного

происхождения. В поле геопотенциала справа и слева от оз. Байкал можно видеть два центра пониженного давления, но если посмотреть на свойства воздушных масс в этих центрах, можно заметить, что один из них обладает свойствами вполне типичными для областей пониженного давления умеренных и высоких широт, а второй, находящийся справа, свойствами тропического воздуха. Таким образом, в исследуемом районе создаются уникальные условия для выпадения атмосферных осадков, связанные

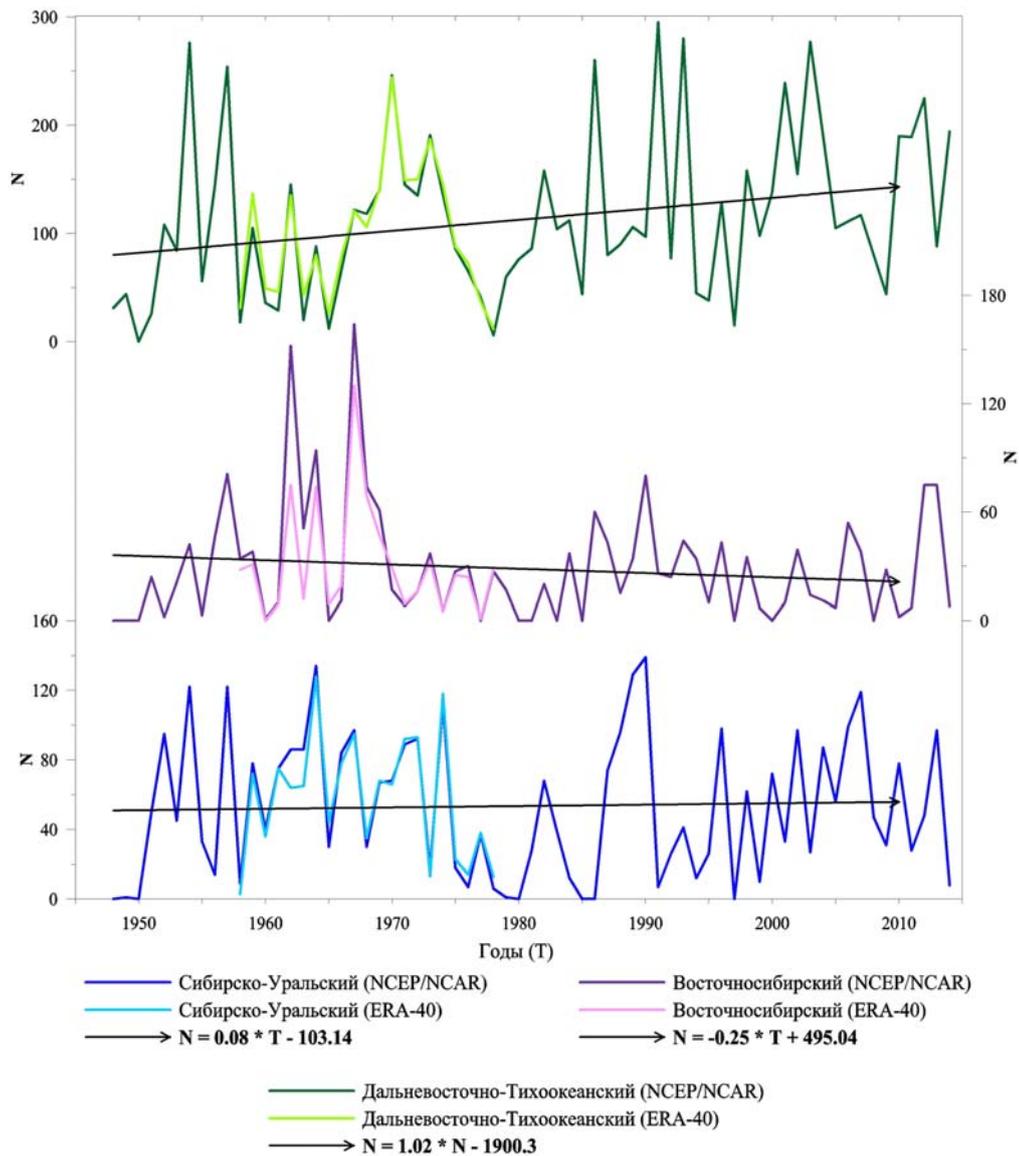


Рис. 4. Долговременная изменчивость событий блокирования (N) в ключевых регионах над Азией.

как с термическими неоднородностями, так и с повышенным содержанием влаги.

Для оценки долговременных изменений блокирования в трех исследуемых регионах, на рис. 4. приведены графики изменчивости общего количества случаев блокирования в исследуемых регионах и аппроксимация кривых изменчивости при помощи линейного тренда. Говоря о долговременных тенденциях уменьшения и увеличения количества блокингов для трех районов, важно отметить, что для Сибирско-Уральского региона не отмечено подобных тенденций. Для Восточно-Сибирского и Дальневосточного регионов, прослеживаются противоположные тенденции: уменьшение количества блокингов для первого и увеличение для второго. Таким образом, можно сделать вывод о том, что в наблюдающемся ослаблении МВА и усилении засушливости в Северных районах Восточной Азии большую роль сыграли изменения блокирования в области Восточной Сибири и Дальневосточного регионов. Указанные изменения привели к смеще-

нию потока влаги МВА в более восточные районы широтного пояса 40–50° N.

### Заключение

В результате проведенного исследования установлена связь блокирующих ситуаций над Азией и изменчивости летнего муссона Восточной Азии. Вероятной причиной ослабления фронтальной системы МВА является уменьшение блокирующих ситуаций над Восточной Сибирью. Таким образом, для понимания дальнейших изменений МВА и связанных с ним осадков, необходимы углубленные исследования формирования блокирующих антициклонов над Азией в летний период.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 4, программы ОНЗ РАН № 5, междисциплинарных интеграционных проектов СО РАН № 35, 70, 131, грантов РФФИ № 14-05-00526, 14-05-00590, 14-05-93108, госконтрактов Минобрнауки № 14.604.21.0100, идентификационный номер RFMTFIBBB210290, № 14.613.21.0013, идентификационный номер RFMEFI61314X0013.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Кочеткова О.С., Мордвинов В.И. Летняя циркуляция атмосферы Северного полушария в периоды сильного и слабого муссона Восточной Азии // *Оптика атмосферы и океана*. 2015. Т. 28, № 01. С. 52–58.

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

Cheung, H.N., Zhou W., Mok H.Y., Wu M.C., Shao Y. Revisiting the climatology of atmospheric blocking in the Northern Hemisphere // *Adv. Atmos. Sci.* 2013. V. 30(2). P. 397–410.

Dee D.P., et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2011. V. 137, N 656. P. 553–597.

Ding Yi.H., Chan C.L. The East Asian Summer monsoon: an overview. // *Meteor. Atmos Phys.* 2005. V. 89. P. 117–142.

Ding Yi.-H., 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 // *Int. J. Climatol.* 2008. V. 28, N 9. P. 1139–1161.

Gibson J.K., Kalberg P., Uppala S. The ECMWF reanalysis (ERA) Project // *ECMWF Newsletter*. 1996. N 73. P. 7–17.

Li H., Dai A., Zhou T., Lu J. Responses of East Asian summer monsoon to historical SST and atmospheric forcing during 1950–2000 // *Clim. Dyn.* 2010. V. 34, N 4. P. 501–514.

Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1996. V. 77. N 3. P. 437–471.

Park Y.-J., Ahn J.-B. Characteristics of atmospheric circulation over East Asia associated with summer blocking // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2014. V. 119. P. 726–738.

Pelly J.L., Hoskins B.J. A new perspective on blocking // *J. Atmos. Sci.* 2003. V. 60, N 3. P. 743–755

Tibaldi S., Molteni F. On the operational predictability of blocking // *Tellus*. 1990. V. 42A. P. 343–365.

Zhu C., Wang B., Qian W., Zhang B. Recent weakening of northern East Asian summer monsoon: A possible response to global warming // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39, N 9. P. 4.

<sup>1</sup>*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия*

<sup>2</sup>*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*