

СИНОПТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ЗАСУШЛИВОСТИ И УВЛАЖНЕННОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Д.Н. Уткузова*, Р.М. Вильфанд, В.М. Хан, Е.С. Ганиева
ФГБУ «Гидрометцентр России» (Москва, Россия)

* Эл. почта: trini_di@mail.ru

Статья поступила в редакцию 12.02.2015; принята к печати 19.03.2015

Проведен синоптический анализ эпизодов экстремальной засушливости и увлажненности на территории России в летний период. В качестве количественной меры интенсивности засушливости и увлажненности использовался индекс SPI, рассчитанный за период с 1966 по 2013 г. Репрезентативность индекса SPI демонстрируется тесной связью между высокими барическими образованиями разного знака и очагами засушливости/увлажненности, описываемыми предложенным индексом. На основе расчета индекса SPI по 478 станциям и обобщающего анализа был создан каталог экстремальных ситуаций с кратким описанием их основных характеристик. Выделенные случаи формирования интенсивных засух или избыточной увлажненности были детально рассмотрены и проанализированы с использованием синоптических карт и карт барической топографии и затем классифицированы в типы и подтипы по схожим синоптическим признакам отдельно для европейской и азиатской частей территории России. Сопоставление синоптических особенностей выявленных групп с каталогом типизации по А. Кацу для погодных процессов позволили выявить тип циркуляции и особенности конфигурации планетарных высотных фронтальных зон (ПВФЗ) для каждой группы. Выявленные закономерности динамики и трансформации ПВФЗ, а также их смещение и особенности конфигураций могут служить в качестве прогностических указателей возникновения засушливых и увлажненных условий при составлении прогноза погоды на средние и долгие сроки.

Ключевые слова: экстремальная засуха, экстремальная увлажненность, индекс SPI, типизация Каца, синоптический анализ ЕТР и АТР.

SYNOPTICAL ANALYSIS OF WET AND DROUGHT EXTREMES OVER THE TERRITORY OF THE RUSSIAN FEDERATION

D.N. Utkuzova, R.M. Vilfand, V.M. Khan, Ye.S. Ganieva

Hydrometeorological Center of Russia (Moscow, Russia)

* E-mail: trini_di@mail.ru

Synoptical analysis has been carried out using SPI index calculated for summer extreme events filed since 1966 through 2013 at 478 stations located in the Russian Federation. SPI adequacy is supported by a close association between high cyclones/anticyclones and wet/drought areas characterised with this index. A catalogue of annotated drought and wet extremes that occurred since 1966 was compiled based on calculated SPI values. Synoptic conditions favorable for the formation of wet and drought extremes were identified by comparing synoptic charts with the spatial patterns of SPI. For synoptic analysis, the wet extremes (6 episodes for the Asian and 7 episodes for the European part of Russia) and the drought extremes (6 episodes for the APR and 6 for the EPR) were classified according to Katz typology of weather regimes. This classification made it possible to find the specific characteristics of every extreme episode and to reveal the displacement of the planetary frontal zone by about 5–25° southward from its normal climatological position during wet extremes referred to the “eastern” classification type. On the whole, the analysis showed that the identified features of transformations of planetary frontal zones may be used as prognostic indications for medium- and long-range weather forecasting.

Keywords: extremely drought, extremely wet, SPI index, A. Katz weather processes typification, synoptical analysis of European and Asian parts of Russia.

Введение

Изменения циркуляционных режимов атмосферы, связанных с изменениями глобального и регионального климата, влияют на частоту и интенсивность возникновения климатических экстремумов, которые в свою очередь оказывают существенное воздействие на биоразнообразие в природе. Межправительственная группа экспертов по изменению климата (IPCC) констатировала, что наблюдаемые тренды глобальных климатических параметров указывают на возможность значительных изменений параметров климата и биосферы Земли [26, 31].

Последствия изменения глобального и регионального климата могут проявляться по-разному. Например, изменение климата в Сибири выразилось в трансформации гидрологического цикла, деградации зон вечной мерзлоты в северных частях, повышении уровня океана и, как следствие, возникновении все более частых затоплений низменных прибрежных территорий, что отразилось на видовых особенностях растительного покрова [10]. При сохранении тенденции к увеличению частоты переувлажненных ситуаций и заболачиванию территорий возникает проблема увеличения зон дефицита или

полного отсутствия кислорода в глубинах почвы, что может привести к ухудшению качества воды в целом, а также к развитию токсичных сине-зелёных водорослей и уменьшению прозрачности воды, обрастанию берегов и изменению видового разнообразия фауны [10]. В то же время приводятся данные об увеличении пожаров, связанных с возрастанием засушливости в сибирской тайге, на 30–50% [4], что приводит к необратимым последствиям для флоры и фауны. В Алтайско-Саянском районе России существует угроза исчезновения некоторых видов растений, животных. В числе прочих последствий экстремальная засушливость/увлажненность влияют на сокращение/увеличение болотных экосистем, опустынивание пахотных земель и сокращение пастбищной зоны [14].

Оценить влияние климатических изменений на экологические системы можно с помощью совместных климатических и биосферных моделей [2]. Результаты моделирования климата и биосферы представляются в виде ансамбля возможных сценариев при установке, в условиях численного эксперимента, различных концентраций парниковых газов, связанных с антропогенной нагрузкой. Особое значение имеет информация об условиях самого пессимистичного сценария, связанного с необратимыми процессами в экосистеме [2, 10].

Формирование засух и избыточной увлажненности различной продолжительности и интенсивности обусловлено рядом факторов и сложным физическим механизмом их взаимодействия. Выводы, касающиеся засух, полученные по данным наблюдений и результатам моделирования, особенно на региональном уровне, содержат большую долю неопределенности [16]. Это означает, что необходимо и далее совершенствовать климато-биологические модели с учетом более широкого спектра физических процессов.

Важными факторами в развитии засух и наводнений являются макроциркуляционные процессы. Так, в работе [20] подробно описана взаимосвязь особенностей развития крупномасштабной циркуляции и частот возникновения экстремальных явлений в период с 1936 по 2000 г. Повторяемость опасных атмосферных засух в меридиональной южной циркуляционной эпохе сократилась в 3 раза в сравнении с зональной, однако площадь охвата засухой в меридиональной эпохе при этом более значительная. Авторы статьи [21] провели анализ повторяемости экстремальных случаев засухи с использованием индексов засушливости (гидротермический коэффициент ГКК Селянинова, индекс силы засухи PSDI Палмера), а также типизации элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ) Северного полушария, которая была разработана Б.Л. Дзержевским с соавт. [5], и установили пространственно-временные особенности распространения засушливых условий. На основе анализа динамики продолжительности циркуляционных групп в Европе и при учете длительности блокирующих процессов была выявлена тенденция к возникновению все более частых засушливых ситуаций в этом районе.

Формирование засухи на фоне установления устойчивой антициклональной циркуляции рассматривалось в ряде работ [21, 23, 26, 28]. В частности, предметом повышенного научного интереса стали экстремально длительный блокирующий антици-

клон 2010 г. и, как следствие, катастрофическая засуха [3, 6, 11, 21].

Засуха и чрезмерное увлажнение также являются объектами пристального внимания за рубежом. Климатические прогнозы демонстрируют глобальное потепление и увеличение площади засушливых областей, которые уже сегодня покрывают до 1/5 от всей поверхности земли [29]. Изучение динамики засушливых зон позволит в дальнейшем принимать правильные стратегические и управленческие решения, так как опустынивание земель и продолжительные засухи напрямую влияют на экономико-социальную сферу. Предложены успешно функционирующие системы раннего оповещения возникновения экстремальных явлений [28]. Однако для развития и внедрения в эксплуатацию таких систем необходимо отчетливо понимать причины появления опасных явлений.

Засуха является следствием сложного физического взаимодействия факторов, которые можно подразделить на внешние и внутренние. К внутренним можно отнести строение почвы, степень увлажнения территории, орографические особенности и т. д. Засуха в летний период возникает при дефиците осадков, при увеличении суммарного испарения, возникновении тепловых волн, которые создают условия для сохранения явления. Также на возникновение засухи влияет степень увлажненности почвы в зимний и весенний периоды. К внешним факторам относится перестройка схем циркуляции атмосферы [30], которая обуславливает перенос воздушных масс, влияющих на возникновение засушливости или увлажненности и температурные колебания. Влияние циркуляции атмосферы и основных мод крупномасштабной изменчивости, таких как океанские течения Эль-Ниньо и Ла-Нинья, являются причиной погодных экстремумов в Северной Бразилии, Индонезии, Северной и Южной Америке, в Европе и в других регионах мира [24].

Анализ эффекта Эль-Ниньо, одной из главных причин формирования засухи в 1988 г. в Северной Америке, привел к выводу, что положительные аномалии температуры поверхности океана в тропической зоне Тихого океана и возникновение эффекта Эль-Ниньо в совокупности нарушили обычное распределение тепла в атмосфере в тот год, тем самым изменив местоположение и интенсивность ячеек внутритропической зоны конвергенции [30]. Эта причина стала главной при формировании засушливой зоны в 1988 г. не только в Северной Америке, но и на всей протяженности экваториальной части Тихого океана до Северной Бразилии и Индонезии. Новые взаимосвязи между температурой поверхности океана и засушливыми ситуациями в Северной Америке были выявлены в результате математического моделирования [25].

Количественной мерой степени интенсивности засушливости и увлажненности являются индексы. Все более актуальными становятся разработки универсальных индексов засушливости и увлажненности. Значимым критерием универсальности индекса является отсутствие влияния орографической разнородности разных регионов на результаты расчетов и их интерпретацию. В связи с этим в последние годы большую популярность приобрел стандартизированный индекс осадков (SPI). Индекс относительно прост для расчета. Его большим плюсом является то, что подстилающая поверхность не оказывает влияние на результаты расчета, а в качестве входной

информации используются данные по атмосферным осадкам [27]. Поэтому в 2012 г. Всемирная метеорологическая организация (ВМО) разработала методическое руководство¹ по использованию индекса SPI в практической деятельности метеорологических служб. Рекомендовано использование SPI наряду с ранее существовавшими индексами, применяемыми в оперативной практике.

Индекс SPI был использован при изучение причин, в том числе и динамических, формирования засух на обширной территории России [17]. Было продемонстрировано увеличение амплитуды экстремальных явлений (засуха/переувлажненность) за последние 20 лет, с преобладанием увлажненных ситуаций над засушливыми. Также выявлены наиболее засушливые районы и тенденции к распространению засухи в летний период по территории России.

Целью данной работы является проведение синоптического анализа экстремальных эпизодов засушливости и увлажненности на территории России. Этот анализ необходим для выявления закономерностей образования экстремальных засух и переувлажнения, а также их возможной локализации. Полученная информация в ходе проведенной работы может быть применена в прогностических целях.

Материалы и методы

Для анализа эпизодов экстремальной засушливости и увлажненности был рассчитан индекс SPI с использованием месячных сумм осадков за летний период с июня по август. Данные с 518 неравномерно распределенных по территории России метеорологических станций за период 1966–2013 гг. были взяты из Мирового центра данных Всероссийского научно-исследовательского гидрометеорологического института (ВНИГМИ-МЦД). Станции, ряд наблюдений в которых имел большое число пропусков в измерениях, были исключены из анализа. В конечном итоге для расчета индекса использовались данные 478 станций. При выявлении одного или двух пропусков в измерениях недостающие данные восполнялись средними значениями за месяц. Разработаны коды для расчета и визуализации индекса SPI в среде MATLAB.

В методике расчета данные осадков трансформируются в индекс SPI, имеющий нормальное (Гауссово) распределение, где среднее значение в рассматриваемый период равно нулю, а среднееквадратическое

отклонение – единице. По сути, SPI – это число стандартных отклонений от нуля, где все значения меньше 0 – есть дефицит осадков, выше нуля – избыток осадков. На первом этапе подбирается функция (1) гамма-распределения $\Gamma(\alpha)$ с наиболее близкой аппроксимацией к частотному распределению фактически наблюдавшихся сумм месячных осадков для каждой станции (рис. 1а) [17].

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} \times e^{-\frac{x}{\beta}}, \text{ для } x > 0. \quad (1)$$

Коэффициенты α и β подбираются таким образом, чтобы теоретическая и фактическая кривые совпадали наилучшим образом.

Так как гамма-распределение не определено для $x = 0$ и $q = P(x = 0) > 0$, необходимо построить функцию кумулятивной вероятности (2) с поправкой на то, что вероятность нулевых осадков q не равна нулю. Тогда кумулятивная функция распределения $G(x)$ трансформируется в конечный вид:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x). \quad (2)$$

Далее функция трансформируется в функцию стандартизированного нормального распределения, у которого среднее значение равно нулю, а стандартное отклонение – единице (рис. 1б). На основе аппроксимированных параметров нормального распределения производят расчет SPI по формулам (3) и (4) [17]:

$$SPI = - \left(u - \frac{(c_0 + c_1 u + c_2 u^2)}{(1 + d_1 u + d_2 u^2 + d_3 u^3)} \right),$$

$$SPI = + \left(t - \frac{(c_0 + c_1 u + c_2 u^2)}{(1 + d_1 u + d_2 u^2 + d_3 u^3)} \right); \quad (3)$$

$$u = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-H(x))^2}\right)} \quad \text{для } 0 < H(x) \leq 0,5,$$

$$u = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-H(x))^2}\right)} \quad \text{для } 0,5 < H(x) < 1. \quad (4)$$

$$\begin{matrix} c_0 = 2,515517 & d_1 = 1,432788 \\ c_1 = 0,802853 & d_2 = 0,189269 \\ c_2 = 0,010328 & d_3 = 0,001308 \end{matrix}$$

(u, d, c – расчетные коэффициенты)

¹ Standardized Precipitation Index. User Guide – WMO, 2012. http://www.wamis.org/agm/pubs/SPI/WMO_1090_EN.pdf

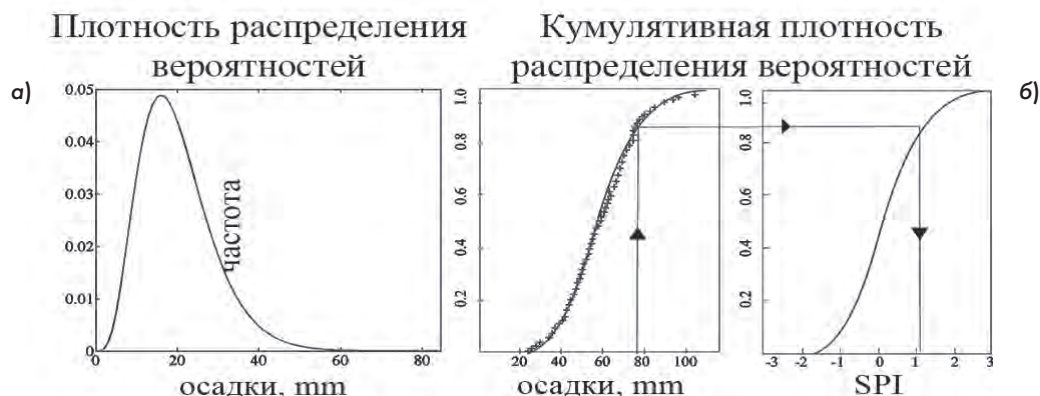


Рис. 1. Пример расчета индекса SPI. Графики функций: а) гамма распределения; б) кумулятивной вероятности

Таким образом, можно судить о засушливости и увлажненности в терминах индекса SPI. Одним из важных плюсов индекса SPI является возможность применения расчетов и визуализации индекса для любой местности за счет нормализации сумм осадков. Подробные методики подготовки данных и расчета индекса SPI приведены в статье [17].

В связи с тем, что Европейская территория России (ЕТР) и Азиатская территория России (АТР) расположены в разных климатических зонах и находятся под влиянием генетически разных воздушных масс и, как следствие, разных барических образований, ареалы экстремальной засушливости/увлажненности имеют разную природу. Поэтому анализ распределения ареалов для каждого макрорегиона был проведен отдельно.

В табл. 1 собраны случаи экстремальной засушливости/увлажненности с наибольшим охватом по территории России. Таких случаев было выделено: для ЕТР – 6 случаев засухи и 6 случаев увлажнения, для АТР – 7 случаев засухи и 6 случаев увлажнения. Для количественной оценки распределения SPI по территории России использована характеристика PI – доля (%) площади макрорегиона, охваченная данным явлением.

Был произведен статистический анализ эпизодов экстремальной засушливости и увлажненности (здесь и далее понятия засуха и увлажненность приводятся в терминах индекса SPI) [17]. Результаты расчета индекса позволили выявить наиболее значимые случаи экстремальной засушливости и увлажненности, которые в дальнейшем были подвергнуты детальному синоптическому анализу.

Синоптический анализ осуществлялся с использованием программы «Синоптик-Долгосрочник» (автор В.Ю. Цепелев [19]). Это средство интерактивного анализа и визуализации данных разработано и функционирует в среде IDL 5.3. На основе данных реанализа NCEP/NCAR² были построены карты барической топографии AT500 и AT850, поля приземного

давления (SLP), осредненные карты поля AT500 по естественно-синоптическим периодам отдельно для Европейской части территории России (20–60° в. д.) и Азиатской части территории России (61–180° в. д.).

Анализ был дополнен специально разработанными картами, где поля приземного давления совмещены с визуализированными значениями индекса SPI.

Региональные синоптические процессы для территорий ЕТР и АТР

Территориальное разделение России на два макрорегиона обосновывается отличием синоптических процессов в естественных синоптических районах (ЕСР) [13]. К первому синоптическому району относятся территории от 0 до 80° в. д., ко второму – территории от 81 до 170° в. д. [13]. Подготовлено на основе нескольких источников [8, 18] и нормативных документов³. Краткое описание преобладающих синоптических процессов, которые обуславливают формирование погодных особенностей на ЕТР и АТР, приводится ниже.

Результаты

Европейская территория России

Зональная циркуляция над ЕТР определяется атмосферными процессами, которые развиваются над северной Атлантикой. Значительное количество циклонов и антициклонов перемещается через Балтийское море и Финский залив, что влияет на резкое различие погоды севернее 60-й параллели и южнее её. Помимо этого выделяют траектории циклонов, пере-

² <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>

³ Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. – Ч. 2, вып. 2. Урал и Сибирь. – Л.: Гидрометеоздат, – 1986. – 175 с.; Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. – Ч. 2, вып. 1. Европейская часть СССР и Закавказье. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – 298 с.; Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. – Ч. 2, вып. 5. Дальний Восток. – Л.: Гидрометеоздат, 1988. – 199 с.

Табл. 1

Значения показателя PI (доля в % площади макрорегиона, охваченная указанным явлением) пиков засушливости и увлажненности на Европейской (ЕТР) и Азиатской (АТР) части территории Российской Федерации

Месяцы	Год	Экстремальная засушливость для ЕТР	Год	Экстремальная засушливость для АТР	Год	Экстремальная увлажненность для ЕТР	Год	Экстремальная увлажненность для АТР
Июнь Июль Август	1972	3 5 31	1972	12 1 2	1981	3 0 0	1970	3 0 0
Июнь Июль Август	1979	12 0 1	1981	4 3 8	1998	1 4 3	1973	0 2 1
Июнь Июль Август	1994	0 14 1	1983	7 0 1	2000	0 4 0	1979	2 0 0
Июнь Июль Август	1996	0 0 17	1998	2 8 5	2003	0 0 5	1980	1 2 0
Июнь Июль Август	2002	1 3 14	2000	0 1 6	2005	3 0 0	1988	1 2 4
Июнь Июль Август	2010	11 18 0	2003	2 3 6	2006	0 1 4	2006	1 0 4
Июнь Июль Август	–	–	–	–	2007	2 5 3	–	–

мещающихся через Скандинавские горы, после которых часть циклонов, разделившись на два отдельных возмущения, продолжает дальнейшее движение. В целом интенсивность циклонических образований в теплый период над ЕТР невелика, однако повторяемость циклонов выше, чем в холодный период. Циклоны над ЕТР делятся на *западные, южные и ныряющие*. Быстрое перемещение южных и ныряющих циклонов приводит к возникновению значительных температурных контрастов, которые обостряют атмосферные фронты и служат причиной выпадения большого количества осадков.

Основной причиной образования дефицита атмосферных осадков, что в терминах индекса SPI мы называем «засушливостью», являются антициклоны. Сильную засушливость вызывают меридиональные типы циркуляции, при которых наблюдается ситуация стационарирования антициклонов. Примерами негативного последствия стационарных антициклонов (блокирующей ситуации) являются засухи 1972 и 2010 гг.

В летний период для территории ЕТР можно выделить следующие классы антициклонов: *антициклоны, смещающиеся с запада, севера и юга; заключительный антициклон; местные антициклоны*.

Азиатская территория России

Особенности рельефа и различие термических условий континента и океана обуславливают формирование устойчивых меридиональных потоков в тропосфере. В связи с этим зональный поток в тропосфере над этой территорией возмущен значительно сильнее, чем над другими территориями. Барическое поле летнего периода в основном определяется положением высотного гребня, ориентированного с Северо-Восточного Китая на восточные районы Якутии и Магаданскую область. По обе стороны от этих регионов располагаются две ложбины: одна направлена с полярного бассейна на Берингово море, а вторая – с Таймыра на Забайкалье. Как отмечено [1], из-за термических условий подстилающей поверхности АТР летом циклоны над континентом перемещаются с меньшими скоростями, чем над морем, а около береговой черты они набирают скорость.

Орография этого региона оказывает значительное влияние на пути траекторий циклонов и антициклонов. Так, хребет Сихотэ-Алинь является естественным препятствием для свободного перемещения отрогов антициклонов на юго-запад, поэтому в большей степени они не распространяются западнее восточных склонов хребта или даже не выходят за пределы прибрежной полосы. Циклоны редко перемещаются через Камчатку, Сахалин [1].

Осадки по территории распределены неравномерно, наибольшее количество осадков выпадает в юго-восточной части Камчатки и на Курилах. В целом на Дальнем Востоке в летний период количество осадков больше, чем в остальное время.

Анализ синоптических ситуаций в периоды повышенной засушливости/увлажненности

Методика выделения эпизодов экстремальной засушливости и увлажненности для территорий ЕТР и АТР на основе анализа индекса SPI подробно описана ранее [17]. Синоптический анализ был проведен на

основе «Совмещенных карт», которые представляют собой совмещенные поля приземного давления с визуализированным индексом SPI. В результате было обнаружено, что очаги экстремальной засушливости/переувлажненности совпадают с очагами барических образований (антициклонами/циклонами), а выделенные случаи хорошо описываются и соотносятся с типизацией атмосферной циркуляции по Кацу [7]. Случаи экстремальной засушливости и увлажненности по конфигурации барического поля объединялись в несколько классов. Классификация проводилась вручную с использованием комплекта карт приземного давления, барической топографии высот АТ850 и АТ500 гПа, совмещенных карт. Выделенные случаи экстремальной засушливости для территорий ЕТР и АТР, а затем и увлажненности для ЕТР, перебирались вручную. В зависимости от рассматриваемой территории определялись барические центры, их локализация сравнивалась с типами процессов, описанных Кацем. Это позволило присвоить каждому рассматриваемому случаю определенный тип процесса.

Анализ высотных карт абсолютной топографии (АТ500 и АТ850) позволил выявить наличие процесса блокирования во всех выделенных случаях экстремальной засушливости (6 и 7 случаев засушливости для ЕТР и АТР соответственно и по 6 случаев экстремальной увлажненности для обеих территорий). На картах АТ500 для ЕТР во всех случаях, кроме 2002 г., прослеживается тип блокирования «расщепленный поток» (диполь). Для территории АТР аналогичная ситуация с дипольным типом блокирования наблюдается в большинстве случаев, кроме 1983 и 2012 гг. Процессы, приводящие к формированию длительного блокирования, мало изучены. В ряде работ [3, 6, 11, 22] авторы провели исследования наиболее интенсивных блокирующих ситуаций для территории России (1972 и 2010 гг.), которые позволили сделать выводы о возможных причинах возникновения длительного блокирования. В 1972 и 2010 гг. наблюдались наиболее показательные случаи блокирующего антициклона, которые привели к возникновению экстремальной засухи, в первом случае – по всей территории России, а во втором – на большей части ЕТР. Подробное синоптическое описание этих двух случаев приводится в разных источниках, в том числе [6, 23]. В работе [17] в качестве примера приведены совмещенные карты пространственного распределения индекса SPI за летний период 1972 г. и карты приземного давления для демонстрации распространения засухи по территории России от месяца к месяцу. Экстремальная засушливость в июне отмечалась на обширной территории АТР, а в августе область экстремальной засушливости переместилась на ЕТР.

Совмещенные карты, показанные на рис. 2, наглядно демонстрируют сложившуюся синоптическую ситуацию – высотный антициклон стационарировал над Карским морем, блокируя зональный перенос в северных и центральных районах ЕТР, на территории Урала, Сибири, вплоть до Дальнего Востока. Циклоны могли проходить лишь по южным регионам со сложной орографией, в которых и выпадали сильные осадки, что спровоцировало экстремальную увлажненность в некоторых районах Казахстана. К июлю зональный поток не восстановился, однако засуха ослабела и наблюдалась лишь в западных районах

ЕТР. В августе постоянный заток сухого арктического воздуха на юг ЕТР привел к формированию устойчивого антициклона, который разрушился только в конце лета. Авторы статьи [21] считают, что большую роль в формировании засухи летом 1972 г. сыграл Азорский максимум, который в этот год был весьма активным и охватывал южные и умеренные широты. При этом в полярных регионах Северного полушария отмечалась интенсивная циклоническая циркуляция.

Засушливость

Все выделенные эпизоды засушливости по критериям аналогичности синоптических ситуаций и положений барических центров были объединены в четыре группы: две по ЕТР и две по АТР.

Европейская территория России

К первой группе (с центром над Восточной Европой) отнесены ситуации в июне 1979 г. и в июле 1994 г. Оба случая объединяет схожая локализация синоптических объектов. Причиной возникновения засушливости является антициклон, который располагался в регионе 40–60° с. ш. и 10–40° в. д., причем к востоку от него находился глубокий циклон (50–100° в. д.), который подпитывался воздухом из Арктики (рис. 3).

Ко второй группе (с центром над ЕТР) отнесены три случая: август 1972 г., август 1996 г., июль 2010 г. Антициклон расположен восточнее в сравнении с первой группой и охватывает почти всю ЕТР, вплоть до 70° в. д. Соответственно циклон также смещается восточнее вплоть до 140° в. д. (рис. 4). Для этой группы характерна экстремальная засуха на ЕТР.



Рис. 2. Совмещенные карты пространственного распределения SPI и приземного давления в июне, июле и августе 1972 г.: Н – низкое давление; В – высокое давление; линиями обозначены изобары

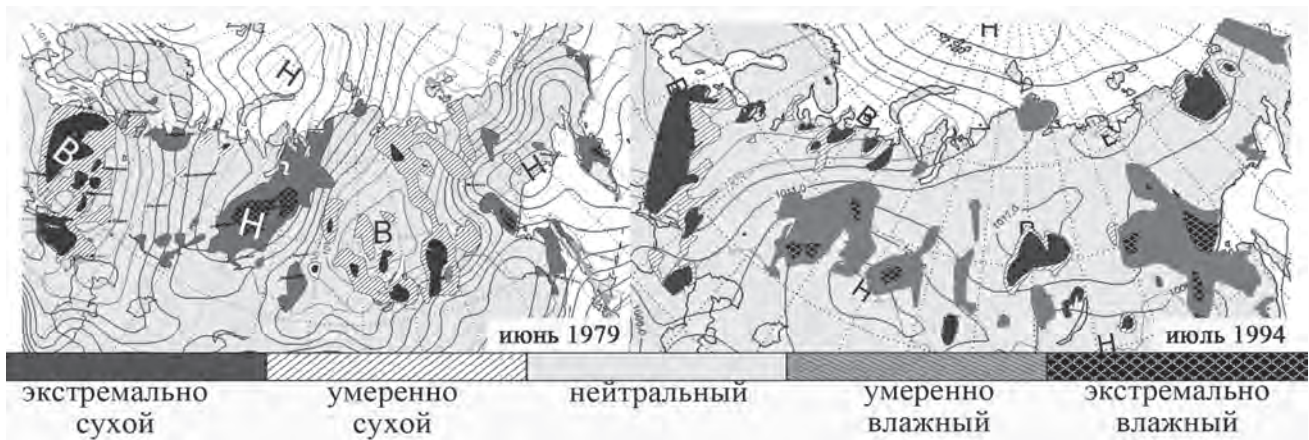


Рис. 3. Синоптические ситуации, вошедшие в первую группу. Совмещенные карты пространственного распределения SPI и приземного давления в июне 1979 г. и июне 1994 г.: Н – низкое давление; В – высокое давление; линиями обозначены изобары



Рис. 4. Синоптические ситуации, вошедшие во вторую группу. Совмещенные карты пространственного распределения SPI и приземного давления в августе 1972 г., августе 1996 г., июле 2010 г.: Н – низкое давление; В – высокое давление; линиями обозначены изобары

Азиатская территория России

К третьей группе (с центром антициклона над Уралом и Западной Сибирью) отнесены следующие эпизоды: июнь 1972 г., август 1981 г., июль-август 2013 г. В данной группе барическое образование высокого давления занимает почти половину территории России (50–120° в. д.) и определяет экстремальную засуху на огромной территории. На западе и востоке от антициклона находятся две ложбины, которые, как правило, обуславливают на этих территориях экстремальную и умеренную увлажненность. На рис. 5 наглядно показано расположение очагов экстремальной засухливости.

К четвертой группе относятся случаи в июне 1983 г., июле 1998 г., августе 2003 г., июне-июле 2012 г. Для этой группы можно выделить один основной антициклон, площадь которого в два раза меньше, чем в группе 3, и который способствует дефициту осадков в регионе. Восточнее этого антициклона барическое поле неустойчиво. Расположение этого антициклона находится в долготном интервале 65–100° в. д. (рис. 6). Ярким примером этой группы является эпизод 2012 г. Так, с начала июня и до первой декады августа 2012 г. над Сибирью, в особенности центральными и южными регионами, наблюдалась экстремальная засуха, сопровождаемая лесными пожарами.

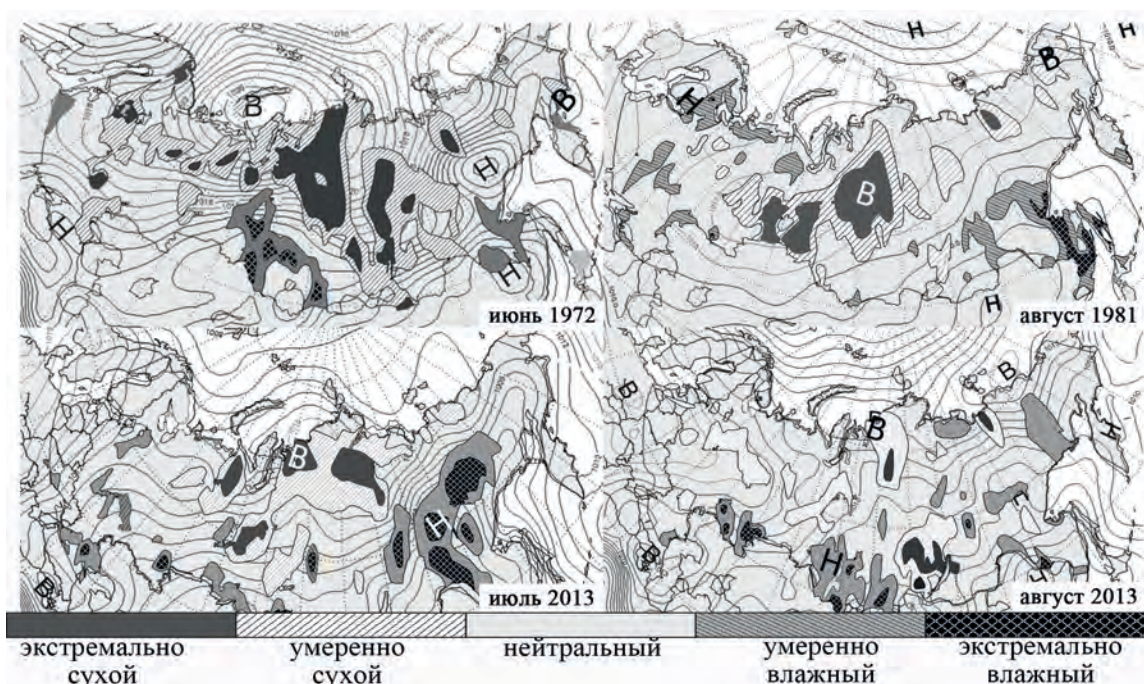


Рис. 5. Синоптические ситуации, вошедшие в третью группу. Совмещенные карты пространственного распределения SPI и приземного давления в июне 1972 г., августе 1981 г., июле-августе 2013 г.: Н – низкое давление; В – высокое давление; линиями обозначены изобары



Рис. 6. Синоптические ситуации, вошедшие в четвертую группу. Совмещенные карты пространственного распределения SPI и приземного давления в июне 1983 г., июле 1998 г., августе 2003 г., июне-июле 2012 г.: Н – низкое давление; В – высокое давление; линиями обозначены изобары

Выделенные группы далее были сопоставлены с предложенной Кацем [7] типизацией погодных процессов. В этой типизации предусмотрены зональный и четыре меридиональных процесса, которые характеризуются индексами циркуляции. Различное сочетание знаков градиентов давления (индексов циркуляции) указывает на географическую локализацию основных характеристик высотного барического поля. К примеру, последовательное сочетание двух положительных и двух отрицательных знаков градиентов давления при зональных градиентах геопотенциала означает, что в районе, где знак градиента меняется с положительного на отрицательный, расположена ось высотной ложбины (центр циклона), по обе стороны от которой находятся высотные гребни [7]. Для зонального типа характерен перенос воздушных масс с запада на восток вдоль круга широт. Различные сочетания знаков градиентов были объединены в четыре формы меридиональной циркуляции:

- форма циркуляции «Ц» (центральное положение гребня относительно Европы и Западной Сибири) означает, что над центром Европейской части России расположен высотный гребень, к западу и востоку от которого находятся высотные ложбины;

- форма циркуляции «В» (восточное положение высотного гребня) предполагает наличие высотной ложбины над Западной Европой и высотного гребня на востоке ЕТР и над Западной Сибирью;

- форма циркуляции «З» (западное положение высотного гребня) характеризуется тем, что высотный гребень расположен над Западной Европой (или Британскими островами), а к востоку от него есть высотная ложбина, ось которой направлена на крайний юго-восток ЕТР/ Западной Сибири;

- форма циркуляции «С» (смешанный тип) представляет собой два гребня, которые находятся на западе и востоке от высотной ложбины, ось которой проходит через центр Европейской территории России; таким образом, эта форма циркуляции является сочетанием двух форм циркуляции «З» и «В» [7].

Визуальная оценка выделенных групп эпизодов экстремальной засушливости выявила, что первая и вторая группы (процессы над ЕТР) относятся к типу циркуляции «Ц» (центральный тип), а третью и четвертую группы (процессы над АТР) можно отнести к типу циркуляции «С» (смешанный тип).

Увлажненность

При расчете индекса SPI значения выше нуля характеризуют увлажнение территории. Увлажненность связана с осадками, которые выпадают, как правило, в зоне атмосферных фронтов. Описывать это явление среднемесячными картами не представляется возможным, так как на них фронты сглаживаются. В связи с этим для проведения синоптического анализа генезиса осадков использована информация о естественно-синоптических периодах (ЕСП) для каждого месяца. Информация о ЕСП первого естественно-синоптического района хранится в ФГБУ «Гидрометцентр России» в отделе долгосрочных прогнозов погоды. В связи с отсутствием информации о ЕСП по второму району, который покрывает АТР, эта территория в данной работе не рассматривается, за исключением случая экстремального увлажнения на Дальнем Востоке в 2013 г.

Синоптический анализ был проведен на основе карт барической топографии высот АТ500 и АТ850

и приземного давления. Каждый месяц, в котором наблюдалось экстремальное увлажнение, был разделен на ЕСП. В пакете программ MATLAB были построены карты распределения фактических осадков (так как использованы данные за летний период, под термином «осадки» надо понимать «дождь») в градации «сильные» и «очень сильные» (основываясь на наставлении по Выпуску краткосрочных прогнозов погоды⁴, градация «сильный дождь» присваивается явлению с количеством осадков 15–49 мм за 12 часов, а градация «очень сильные» – при выпадении от 50 мм и выше за 12 часов). Эти карты позволили выявить причины распространения сильных осадков.

На рис. 7 продемонстрирован набор карт, использованных при проведении этого синоптического исследования.

В результате этой работы была установлена связь между количеством выпавших осадков и длительностью ЕСП с преобладающей циклонической деятельностью, которая, как показали расчеты, существенно влияет на увлажненность территории.

Если при появлении экстремальной засухи почти во всех случаях наблюдался блокирующий тип процесса над исследуемой территорией, то экстремальная увлажненность формируется как при меридиональных процессах, так и при зональном типе циркуляции при условии прохождения серии циклонов по одной территории. В отдельных случаях оба типа циркуляции могут наблюдаться в течение одного месяца в разных ЕСП, что может обуславливать выпадение экстремальных осадков.

Эпизод, отмеченный в июне 2005 г., наглядно описывает такую ситуацию. Тогда в течение двух разных ЕСП выпали очень сильные осадки. Первый период наблюдался с 6 по 11 июня, когда с зональным типом в умеренных широтах ЕТР проходила серия активных циклонов, принесших сильные осадки. Во второй период, с 20 по 23 июня, произошла перестройка ПВФЗ, над ЕТР сформировался глубокий активный насыщенный влагой циклон, который с запада и востока был заблокирован антициклонами. И поэтому такая конфигурация ПВФЗ стала причиной выпадения продолжительных осадков.

Эпизоды экстремальной увлажненности также были сопоставлены с каталогом типизации по Кацу [7]. Оценка выделенных случаев увлажненности на территории ЕТР выявила, что июнь 1981 г., июнь 2005 г., август 2006 г. можно отнести к типу циркуляции «С»; а случаи в июле 1998 г., июле 2000 г., августе 2003 г., июле 2007 г. – к типу циркуляции «В».

В верхней тропосфере существуют переходные зоны между высокими холодными циклонами и высокими теплыми антициклонами, которые называются высотными фронтальными зонами (ВФЗ) [15]. Отдельные ветви ВФЗ, переходя одна в другую, опоясывают полушарие, образуя планетарную высотную фронтальную зону (ПВФЗ), которая тесно связана с процессами образования и развития циклонов и антициклонов и, как следствие, с возникновением волновых процессов в атмосфере. Поскольку сильные осадки, выпадающие в глубоких циклонах, связаны с существенным отклонением ПВФЗ к югу, внимание было акцентировано на динамике и трансформации

⁴ Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения: РД 52.27.724-2009 : утв. Росгидромет 25.12.2009; введ. в действие с 15.01.2010.

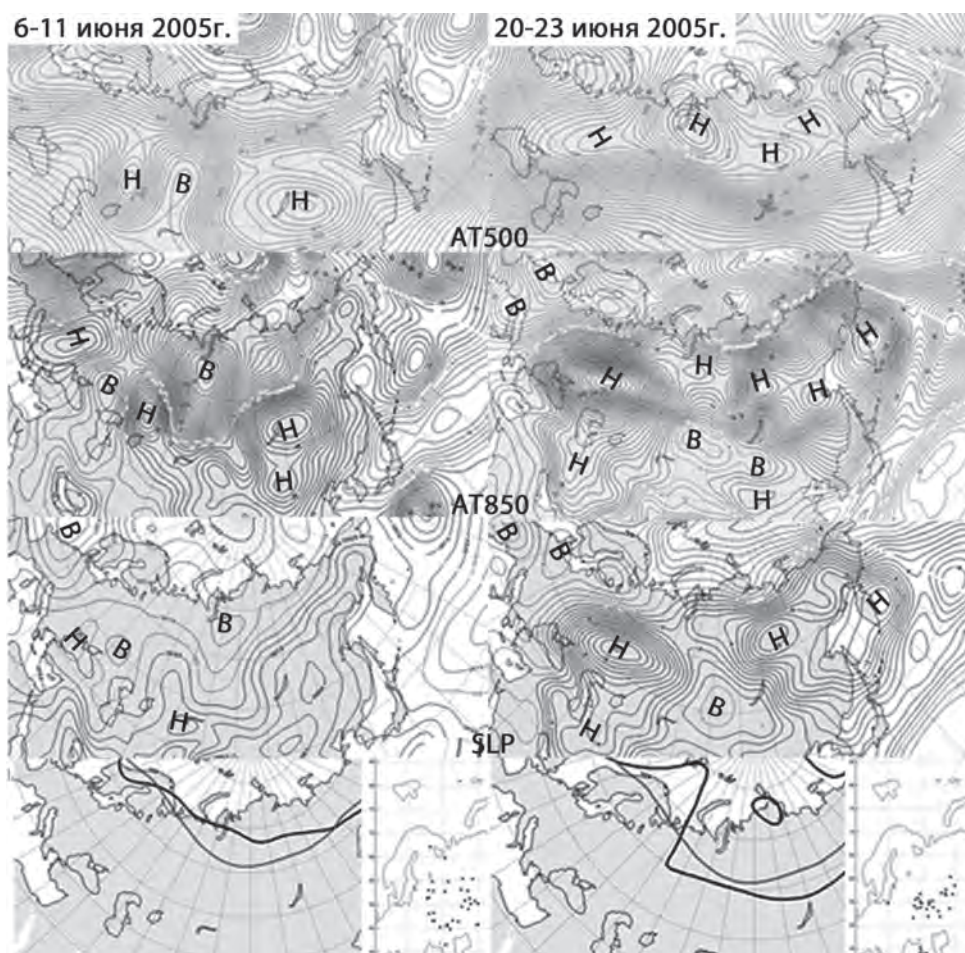


Рис. 7. Карты синоптического анализа увлажненности для ЕТР за июнь 2005 г., разделены на ЕСП. Сверху вниз: АТ500, АТ850, SLP. Карты фактических планетарных высотных фронтальных зон (ПВФЗ) и средних нормальных ПВФЗ в 1966–2013 гг. для ЕСП II и ЕСП IV в июле 2005 г. по отдельности, карты распределения фактических осадков в градации «сильные» и «очень сильные» для рассматриваемого ЕСП:

Н – низкое давление; В – высокое давление; линиями обозначены изобары

этих фронтальных зон. Для оценки отклонений таких ПВФЗ в выделенных случаях экстремальной увлажненности в программе «Долгосрочник-синоптик» [19] была рассчитана характерная изогипса для каждого месяца летнего сезона за период с 1966–2013 гг. и было проведено сравнение характерной изогипсы в ЕСП, в котором наблюдались экстремальные осадки (фактическая изогипса), с климатическим положением этой изогипсы (нормальная изогипса). На рис. 7 в качестве примера приводится карта с двумя ПВФЗ: черной линией обозначена нормальная изогипса, серой – фактическая. Проведенный анализ позволил выявить смещение фактической изогипсы относительно нормальной к югу в случаях экстремального увлажнения с типом циркуляции «В». Смещение изогипсы наблюдалось на 5–25° к югу относительно климатического положения.

Для АТР был проведен анализ экстремальных летних осадков в июле-августе 2013 г. на Дальнем Востоке, где сложилась аномальная синоптическая обстановка. Сильные осадки отмечались с середины июля до начала сентября, что привело к катастрофическим паводкам. ВФЗ в этот период сместилась далеко на юг и сформировалась над бассейном р. Амур (рис. 8), эта территория и пострадала в большей степени от наводнения. Схожего смещения ВФЗ на юг за рассмотренный период (1966–2013 гг.) на терри-

тории России обнаружено не было. По данным [9] в июне-августе в районе бассейна реки Амур выпало 600–800 мм осадков, что превышало среднюю климатическую норму в 2–2,5 раза. Авторы статьи [9] подробно описали этот случай и указали возможные причины сильного наводнения на Дальнем Востоке в 2013 г. Осадки были вызваны приземными циклогенезом, обусловленным конфигурацией ВФЗ. К тому же блокирование западно-восточного переноса антициклоном, стационарировавшим в июле над Тихим океаном вблизи п-ва Камчатка, не позволило циклонам перемещаться на восток [9]. Ситуация усугубилась тем, что на Дальнем Востоке почва была переувлажнена в зимне-весенний период.

Обсуждение

Одной из актуальных проблем современной климатологии является оценка нестабильности макроциркуляционных режимов атмосферы, представляющих собой сложную динамическую систему с активным воздействием на климат. Экологическое состояние в регионе зависит, среди прочего, от цикло/антициклонической деятельности. Возникновение и частая повторяемость засушливых ситуаций приводит к изменению природной среды: в летний период – к сокращению лесных массивов, обмелению рек и др., а чрезмерное увлажнение может стать причиной таких

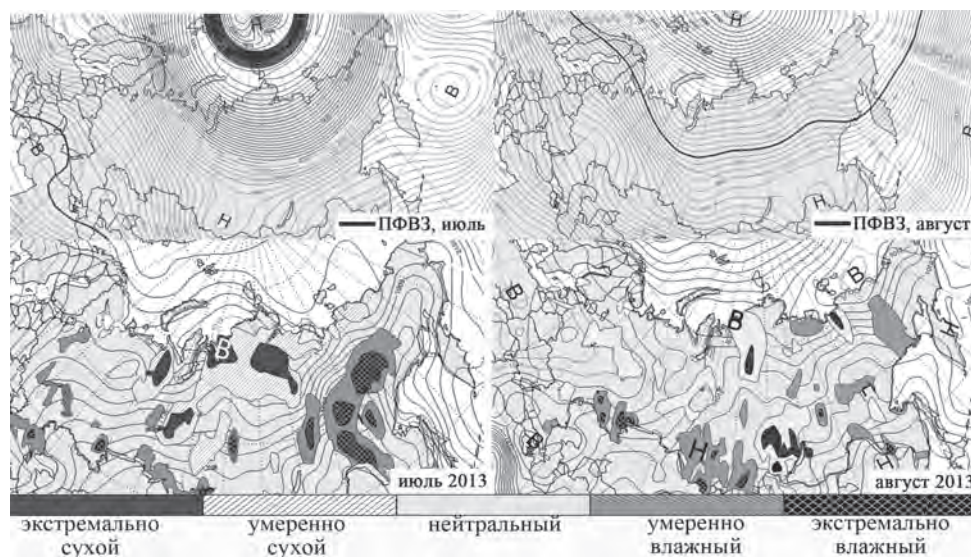


Рис. 8. Карты абсолютной топографии для высот 500 гПа, совмещенные карты пространственного распределения SPI и приземного давления в июле и августе 2013 г.:

Н – низкое давление; В – высокое давление; линиями обозначены изобары

негативных последствий, как загрязнение пресных вод, заболачивание местности и т. д.

Так как важным фактором развития засух и наводнений являются макроциркуляционные процессы, в данной работе проведен синоптический анализ эпизодов экстремальной засушливости и увлажненности на территории России. Для этого был создан каталог экстремальных ситуаций за период 1966–2013 гг. Выделенные эпизоды были проанализированы с помощью синоптических карт (приземного давления, барической топографии высот АТ 850 и АТ 500 гПа) и затем объединены в типы и подтипы по схожим синоптическим признакам отдельно для ЕТР и АТР. Региональное разделение обусловлено необходимостью детального анализа метеорологических процессов, так как ЕТР и АТР находятся под влиянием разных климатических и синоптических условий вследствие географического положения и орографии. Полученные эпизоды экстремальной засушливости были объединены по синоптическим признакам в четыре группы, которые затем были сопоставлены с каталогом типизации процессов по Кацу.

Была обнаружена тесная связь между высокими барическими образованиями разного знака и ареалами засушливости/увлажненности, которые описываются предложенным индексом SPI. Обнаружены закономерности динамики и трансформации ПВФЗ, выявлено их смещение и особенности их конфигураций.

Анализ высотных карт абсолютной топографии показал, что в большинстве случаев экстремальной засушливости прослеживается тип блокирования

«расщепленный поток». Для экстремальной увлажненности обнаружено, что ситуация может формироваться как при меридиональном, так и при зональном типе циркуляции при условии прохождения серии циклонов через одну территорию. А длительность ЕСП влияет на интенсивность увлажнения территории.

На основе типизации по Кацу удалось определить, что для ЕТР засушливость образуется при типе циркуляции «Ц» (центральный тип), а увлажненность при двух типах – «С» (смешанный тип) и «В» (восточный тип). Для АТР засушливость наблюдается при типе циркуляции типа «С».

Во всех случаях экстремальной увлажненности и засушливости циклоны и антициклоны были высокими, то есть прослеживались на картах не только АТ850 гПа, но и АТ500 гПа.

Анализ динамики и трансформации планетарных фронтальных зон выявил смещение фактической изогипсы относительно климатического положения изогипсы к югу в случаях экстремального увлажнения с типом циркуляции «В». Смещение изогипсы наблюдалось на 5–25° к югу относительно климатического положения.

Выявленные особенности конфигурации ПВФЗ и приземных барических полей могут служить в качестве прогностических указателей возникновения экстремально засушливых и увлажненных условий при составлении прогноза погоды на средние и долгие сроки.

Работа выполнена при частичной поддержке грантом РНФ № 14-37-0053.

Литература

1. Архангельский В.Л. Пути и скорости перемещения циклонов и антициклонов в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке // Труды ДВНИГМИ. – 1956. – № 1. – С. 97–113.
2. Барцев С.И., Дегерменджи А.Г., Иванова Ю.Д., Щемель А.Л. Влияние неопределенно-

- сти оценки параметров минимальной биосферной модели на прогноз биосферной динамики // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – Т. 11. – С. 1413–1418.
3. Володин Е.М. О природе некоторых сверх-экстремальных аномалий летней температу-

- ры // Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 г. / Под ред. Н.П. Шакиной. – М. : Триада ЛТД, 2011. – С. 48–57.
4. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, общее резюме / Ред. Т.В. Лешкевич. – М., 2014. – 59 с.
5. *Дзержевский Б.Л., Курганская В.М., Витвицкая З.М.* Типизация циркуляционных механизмов в Северном полушарии и характеристика синоптических сезонов // Труды НИУ ГУГМС. – Л. : Гидрометиздат, 1946.
6. *Иванова А.Р., Шакина Н.П., Богаевская Н.И.* Сравнение динамических характеристик блокирующего антициклона летом 2010 года с более ранними эпизодами // Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 г. / Под ред. Н.П. Шакиной. – М. : Триада ЛТД, 2011. – С. 66–72.
7. *Кац А.Л.* Сезонные изменения общей циркуляции атмосферы и долгосрочные прогнозы. – Л. : Гидрометиздат, 1960. – 270 с.
8. *Кобышева Н.В., Акентьева Е.М., Богданова Э.Г.* и др. Климат России // СПб. : Гидрометеиздат, 2001. – 655 с.
9. *Крыжов В.Н., Вильфанд Р.М.* Макрометеорологические условия формирования сильных осадков в бассейне р. Амур в июне-сентябре 2013 г. и успешность их прогнозирования // Сборник докладов: Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации. – М. : Росгидромет, 2014. – С. 40–53.
10. *Кузин В.И., Крупчатников В.Н., Крылова А.И., Фоменко А.А.* Математическое моделирование климата Сибири // Вычислительные технологии. – 2006. – Т. 11. – С. 52–59.
11. *Мохов И. И.* Аномальное лето 2010 года в контексте истории изменений климата и его аномалий // Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 г. / Под ред. Н.П. Шакиной. – М. : Триада ЛТД, 2011. – С. 41–47.
12. *Пагава С.Т.* Основы синоптического метода долгосрочных прогнозов погоды малой заблаговременности // Труды НИУ ГУГМС. – Сер. II, вып. 20. – 1946.
13. *Пагава С. Т., Аристов Н.А., Блюмина Л.И., Туркетти З.Л.* Основы синоптического метода сезонных прогнозов погоды. – Л. : Гидрометеиздат, 1966. – 363 с.
14. *Петров М.П.* Пустыни СССР и их освоение. – М. ; Л. : Наука, 1964.
15. *Савичев А.И.* Синоптические методы анализа атмосферных процессов. – Л. : ЛПИ им. М.И. Калинина. – 100 с.
16. Третье национальное сообщение Российской Федерации межведомственной комиссии Российской Федерации по проблемам изменения климата / Ред. Ю.А. Израэль. – М., 2002. – 158 с.
17. *Уткузова Д.Н., Хан В.М., Вильфанд Р.М.* Статистический анализ эпизодов экстремальной засухливости и увлажненности на территории РФ // Оптика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 1. – С. 67–75.
18. *Хандождко Л.А.* Региональные синоптические процессы. – Л. : Изд-во ЛГМИ, 1988. – 103 с.
19. *Цепелев В.Ю.* Специализированная информационно-вычислительная система анализа пространственно-временных рядов гидрометеорологических характеристик и ее использование в задачах разработки прогнозов погоды на месяц // Труды научного семинара Национальной академии наук Украины и Российского фонда фундаментальных исследований. – Киев : Ника, 2011. – 180 с.
20. *Черенкова Е.А., Кононова Н.К.* Связь опасных атмосферных засух в европейской России в XX веке с макроциркуляционными процессами // Изв. Росс. акад. наук. Сер. географ. – 2009. – № 1. – С. 73–82.
21. *Черенкова Е.А., Кононова Н.К.* Анализ опасных атмосферных засух 1972 и 2010 гг. и макроциркуляционных условий их формирования на территории Европейской части России // Труды ГГО. – 2012. – № 565. – С. 165–187.
22. *Черенкова Е.А., Кононова Н.К.* Засуха на юге Европейской России летом 2010 года и циркуляционные условия ее формирования // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. Оценка рисков возникновения чрезвычайных ситуаций. XI научно-практическая конференция. 5–6 октября 2011. Доклады и выступления – М. : Центр «Антистихия», 2012. – С. 230–236.
23. *Шакина Н.П., Иванова А.Р., Бирман Б.А.* и др. Блокирование: условия лета 2010 г. в контексте современных знаний // Сборник докладов совместного заседания Президиума Научно-технического совета Росгидромета и Научного Совета РАН «Исследования по теории климата Земли», Москва, 2010. – М. : Триада, 2010. – С. 6–21.
24. *Allan R., Lendesay J., Parker D.* El Nino: Southern Oscillation and Climatic Variability. – CSIRO Publ., 1996. – 416 p.
25. *Cook E.R., Seager R., Cane M.A., Stahle D.W.* North American drought: reconstructions, causes, and consequences // Earth-Science Reviews. – 2007. – Т. 81. – С. 93–134.
26. *Field C. B.* et al. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability // Working Group II Contribution to the IPCC 5th Assessment Report. Technical Summary. – 2014. – P. 176.
27. *Lloyd-Hughes B., Saunders M.A.* A drought climatology for Europe // Int. J. Climatol. – 2002. – Vol. 22. – P. 1571–1592.
28. *Pulwarty R.S., Sivakumar M.* Information systems in a changing climate: Early warnings and drought risk management // Weather and Climate Extremes. – 2014. – Vol. 3. – P. 14–21.
29. *Solh M., van Ginkel M.* Drought preparedness and drought mitigation in the developing world's drylands // Weather and Climate Extremes. – 2014. – Vol. 3 – P. 62–66.
30. *Trenberth K.E., Guillemot C.J.* Physical processes involved in the 1988 drought and 1993 floods in North America // J. Climate. – 1996. – Vol. 9. – P. 1288–1298.