

## ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.509.331

# Статистический анализ эпизодов экстремальной засухливости и увлажненности на территории РФ

Д.Н. Уткузова, В.М. Хан, Р.М. Вильфанд\*

*Гидрометцентр России*

*123242, г. Москва, Большой Предтеченский пер., 11–13*

Поступила в редакцию 19.07.2014 г.

Статистический анализ экстремальных эпизодов засухливости и увлажненности для территории России был выполнен на основе результатов расчетов и визуализации индекса SPI. При расчете использовали данные месячных осадков по 500 станциям за период с 1966 по 2010 г. Для характеристики пространственно-временной изменчивости эпизодов засухливости и увлажненности были рассчитаны различные статистические параметры. Расчеты позволили выявить увеличение амплитуды экстремальных явлений (засуха/переувлажненность) в последние 20 лет, с преобладанием увлажненных ситуаций над засухливыми. К тому же обнаружено, что засуха для европейской территории России сокращается в июне и августе, а рост распространения явления происходит в июле. Для увлажнения прослеживается противоположная ситуация. На территории азиатской территории России значимые увеличение засухливости и уменьшение увлажненности наблюдаются только в июле.

*Ключевые слова:* осадки, статистический анализ, экстремальная засуха, экстремальная увлажненность, индекс SPI, климатическая изменчивость; precipitation, statistical analysis, extreme drought, extreme wet, SPI index, climate variability.

### Введение

В связи с наблюдаемыми изменениями регионального и глобального климата необходимо проводить новые исследования по переоценкам последствий влияния динамики крупномасштабных циркуляционных процессов на окружающую среду. Статистические выводы, сделанные ранее, должны обновляться и пересматриваться при появлении новой информации с учетом усовершенствованных методик анализа и интерпретации климатических данных. Вследствие изменений климатических условий крупномасштабных процессов повышенный интерес вызывают оценки частоты и продолжительности экстремальных явлений, в том числе засухливости и увлажнения. Задача проведения качественного и количественного синоптико-статистического анализа экстремальных явлений остается актуальной. Изменения режима отдельных звеньев гидрологического цикла рассматриваются как следствие изменения климата. По этой причине периоды засухливости в отдельных регионах меняются, и ожидается, что в будущем засухливость будет проявляться неоднозначно [1]. Например, в статье [2] говорится об ожидаемом росте частоты засухливых явлений за счет уменьшения осадков и увеличения испаряемости на фоне глобального изменения климата.

Для России изменение климатических условий может сопровождаться усилением засухливости [3]

и увеличением повторяемости засух на территории Калмыкии, в Астраханской, Волгоградской и Ростовской областях [4]. Авторы статьи [5] подтверждают появление тенденции к аридизации климата на территории России, последствия которой будут проявляться в большей степени в весенне-летний период.

Наиболее удобными количественными показателями, характеризующими степень засухливости, являются индексы засухливости, разработанные для научного и прикладного использования. В большинстве своем индексы засухливости есть фактическая мера отклонения метеорологических величин от их среднего распределения для той или иной территории. В настоящей статье приводится краткий обзор наиболее популярных индексов засухливости, применяемых на практике как в России, так и за рубежом. В России наиболее популярными являются индекс засухливости Д.А. Педея [6], гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) [7] и коэффициент увлажненности Н.Н. Иванова [8].

В прогностических центрах мира широко используются индекс Палмера (Palmer Drought Severity Index – PDSI) [9] и набирающий все большую популярность индекс стандартизированных осадков (Standardized Precipitation Index – SPI) [10].

### 1. Индексы, применяемые в России

Индекс Д.А. Педея [6], разработанный в середине XX в., позволяет судить о засухе или увлажнении, виде и типе явления по степени отклонения значений температуры и осадков от нормы (среднегодных значений). Индекс Д.А. Педея представляет

\* Диляра Наилевна Уткузова (trini\_di@mail.ru); Валентина Моисеевна Хан (khan@mecom.ru); Роман Менделевич Вильфанд (vilfand@mecom.ru).

собой разность стандартизированных значений аномалий температуры воздуха  $t$  и осадков:

$$S = \Delta t / \sigma(t) - \Delta P / \sigma(P), \quad (1)$$

где  $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение средних месячных значений температуры воздуха и осадков;  $P$  — сумма осадков.

В работе [6] автор утверждает, что, основываясь на расчетах индекса по территории СССР, повторяемость сильных засух/переувлажненности (под «сильной засухой» понимается ситуация, при которой индекс Д.А. Педа  $\geq 3$ ) [11] встречается редко (менее 5% случаев). Автор [12] обнаружил, что вероятность повторяемости засухи/переувлажненности два и более года подряд, равно как и то, что явление может сохраняться более одного месяца, очень низкая. В работе [11] на основе индекса Д.А. Педа сделан вывод о возрастании засушливости в мае–июне и слабой изменчивости количества случаев засухи в июле–августе за период с 1900 по 1979 г. (расчеты проводились по данным, полученным с 40 станций на европейской территории СССР). Благодаря возможности отслеживать изменчивость климатических параметров, входящих в расчет, индекс в последнее время активно применяется в решении исследовательских задач.

Несколько ранее, в конце 20-х — начале 30-х гг. XX в., Г.Т. Селянинов предложил использовать для агрометеорологических задач гидротермический коэффициент [7], который и по сей день широко используется в оперативной практике. Индекс имеет множество различных модификаций для конкретных территорий. В общем виде он представляет собой отношение сумм осадков  $r$ , наблюдаемых в течение продолжительного времени (не менее 1 мес), к сумме активных температур  $t$  за этот же период, уменьшенное в 10 раз:

$$\text{ГТК} = \frac{r}{0,1 \sum t}. \quad (2)$$

Индекс учитывает приходную сторону водного баланса, испаряемость влаги с поверхности исследуемой территории и весьма прост в расчете. Однако он характеризует лишь увлажненность, без принятия во внимание влагозапасов почвы. В работе [13] авторы показали, что обширные засухи, определенные индексом ГТК, могут наблюдаться даже 2 года подряд, а локальные до 3 лет. Однако в работе [12] Д.А. Педь утверждает, что экстремальные засухи не могут образовываться 2 года подряд. Это свидетельствует о том, что индексы имеют разную чувствительность к процессам засушливости и климатическим изменениям.

Коэффициент увлажнения Н.Н. Иванова определяется отношением количества выпавших атмосферных осадков к величине испаряемости [8]. Достаточно простой индекс не столь популярен в оперативной практике по сравнению с предыдущими двумя индексами. Он рассчитывается по формуле

$$E_{\text{мес}} = 0,0018(25 + t)^2(100 - f), \quad (3)$$

где  $t$  — среднемесячная температура воздуха, °С;  $f$  — среднемесячная относительная влажность воздуха, %.

## 2. Наиболее популярные индексы, применяемые в прогностических центрах мира

Широко используется в прогностической деятельности за рубежом индекс PSPI. В основе индекса Палмера [9] лежит уравнение «водного баланса», учитывающее количество осадков, выпавших на данной территории, а также влагообеспеченность, сток, испарение и еще множество эмпирических зависимостей, разработанных и полученных Палмером в 1965 г. Итоговая формула расчета индекса PDSI имеет вид

$$\text{PDSI}_i = 0,897\text{PDSI}_{i-1} + Z_i/3, \quad (4)$$

где  $i$  — месяц, для которого ведется расчет;  $Z$  — индекс аномалии влажности Палмера, который рассчитывается как

$$Z = Kd. \quad (5)$$

Здесь  $K$  — весовой климатический фактор, который необходим для приведения индекса к данной местности, для которой производится расчет;  $d$  — параметр, представляющий собой разность между значениями суммы месячных осадков  $P$  за текущий период и уравнением водного баланса  $\hat{P}$ :

$$d = P - \hat{P}. \quad (6)$$

Практически доказано, что индекс Палмера адекватно отображает степень засушливости или избыточной увлажненности территории и его можно широко использовать для прогнозирования засухи, в исследовательских целях, а также в оперативной практике [6]. Важнейшим свойством индекса является его способность учитывать суммарные эффекты продолжительности явления. В работе [5] на базе PDSI сделан вывод о тенденциях уменьшения влажности и увеличения количества случаев с опасными засухами в глобальном масштабе. Однако в работе [2] авторами сделан вывод о том, что значения индекса могут быть неправильно определены в период аномальной засухи в условиях глобального изменения климата, так как в основе расчета индекса лежит упрощенная модель испаряемости. Более того, в связи с тем что в расчет индекса входят значения констант (факторы длительности), рассчитанные по двум североамериканским станциям, индекс не является универсальным и не может адекватно описывать ситуации засушливости/переувлажненности для других территорий. Индекс Палмера в России в оперативной практике применяется крайне редко. Тем не менее следует отметить, что в результате сравнительного анализа двух индексов засушливости был сделан вывод о большей чувствительности индекса Палмера к изменяющемуся климату и входным параметрам расчета, чем ГТК Селянинова [1].

Значительную популярность в прогностической практике всего мира в последние годы приобрел стандартизированный индекс осадков (SPI) [9]. Индекс прост в расчете благодаря простой интерпретации и единственному входному параметру — осадкам. Более того, результаты расчета индекса являются универсальными для любого региона и не требуют введения поправочных коэффициентов даже в условиях глобальной изменчивости климата. Подробная методика расчета индекса приведена в разд. 4. Несомненно, преимущественным достоинством индекса SPI является его свойство — приведение месячных сумм осадков к терминам индекса, а именно к нормальному (гауссовому) распределению.

Авторы статьи [14] провели сравнительный анализ изменения засухливости в XX в. с использованием индексов SPI и PDSI для Европы и России. В результате был сделан вывод, что оба индекса адекватно отражают рост явлений засухливости на территории Восточной Европы и в некоторых областях России, однако индекс SPI оказался более чувствительным к экстремальным климатическим явлениям. К тому же на участках со сложным рельефом индекс SPI демонстрирует более однородные результаты, чем индекс PDSI.

В исследовании [13] дается сравнительный анализ популярных индексов засухливости, таких как ГТК, показатель увлажнения (ПУ) Д.И. Шашко  $Md$ , индекс засухливости Д.А. Педа  $S$ , SPI и стандартизированный индекс «осадки—испарение» (SPEI). На сегодняшний день некоторые из этих индексов (ГТК,  $Md$ ,  $S$ ) применяются в прогностической практике в России. Сравнительный анализ индексов засухливости проведен для территорий Волгоградской и Саратовской областей в отдельно взятые годы (1995, 1998, 1999, 2002 и 2010). Одним из главных достоинств этого анализа является наглядное сравнение поведений индексов при одних и тех же условиях в разное время. В табл. 1 продемонстрированы результаты значений индексов за июль 1995 г.

Например, для Волгоградской области значение индекса SPI составило  $-1,63$ , что в градациях этого индекса обозначает «сильную засуху», а индекс ГТК Селянинова показал  $0,5$ , что в градациях индекса ГТК трактуется как «средняя засуха». Для Саратовской области, наоборот, индекс SPI =  $-0,59$  — «слабая засуха», а ГТК Селянинова =  $0,33$  — «сильная засуха». Расчеты коэффициентов множественной корреляции между различными индексами и урожайностью, представленные в настоящей статье, демонстрируют низкие показатели корреляции индексов SPI и Д.А. Педа, остальные индексы имеют значения выше  $0,3$ .

В конце 2012 г. Всемирная метеорологическая организация разработала методическое руководство [10] по использованию индекса SPI в практической деятельности метеорологических служб. Рекомендовано применение данного индекса наряду с ранее существовавшими индексами. Следует отметить, что в российской практике индекс SPI использовался ранее весьма ограниченно.

Авторы настоящей статьи выделили две основные цели данной работы. Первая заключается в изучении адекватного воспроизведения индексом SPI условий засухливости и избыточного увлажнения на территории РФ. Второй целью является изучение пространственно-временных характеристик засухливости на территории РФ.

Адаптация и положительные результаты тестирования индекса SPI в процессе выполнения исследовательских работ и решений практических задач климатологии позволят внедрить индекс для мониторинга засух/переувлажненности в прогностическую практику и, возможно, повысить качество прогнозов.

Попытка провести статистический анализ климатической изменчивости периодов засухливости/переувлажненности на фоне меняющегося климата позволила авторам сделать важные выводы о повторяемости засухливых/переувлажненных эпизодов, выявленных с помощью данного индекса.

### 3. Материалы и методы

Расчет SPI осуществлялся с использованием базы данных, полученных из единого государственного фонда данных ФГБУ «ВНИГМИ-МЦД». Они представляют собой месячные суммы осадков за период с 1966 по 2010 г. по 518 неравномерно распределенным по территории России метеорологическим станциям. Станции, результаты наблюдений в которых характеризовались большим количеством пропусков в измерениях, были исключены из анализа. В конечном итоге для расчета индекса использовались данные 500 станций. При обнаружении незначительных пропусков (1–2 пропуска) в измерениях недостающие данные восполнялись средними значениями за месяц по этой станции. В рамках поставленных задач, как уже отмечалось выше, были использованы месячные суммы атмосферных осадков за летние месяцы с июня по август.

Для расчета и визуализации индекса SPI были разработаны коды в пакете прикладных программ MATLAB. Достоверность результатов, полученных с помощью программы, созданной авторами, была проверена путем сравнения их с результатами расчетов, получаемых по программе расчета SPI, предложенной Национальным центром по смягчению последствий засухи (США) [15] и распространенной в сети Интернет. Результаты оказались идентичными, поэтому дальнейшая работа с индексом SPI осуществлялась программой, написанной авторами.

### 4. Расчет и визуализация индекса SPI

Методика расчета индекса такова, что данные осадков трансформируются в нормальное (гауссово) распределение, где среднее значение SPI в рассматриваемый период равно нулю, а среднеквадратическое отклонение — единице [9]. На первом этапе подбирается функция гамма-распределения  $\Gamma(\alpha)$  с наиболее близкой аппроксимацией к частотному распределению фактически наблюдавшихся сумм месячных

осадков для каждой станции (рис. 1, а) [16]. Для этой функции необходимо построить функцию распределения плотности вероятностей

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}, \text{ для } x > 0. \quad (7)$$

Коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  подбираются таким образом, чтобы теоретическая и фактическая кривые совпадали наилучшим образом.

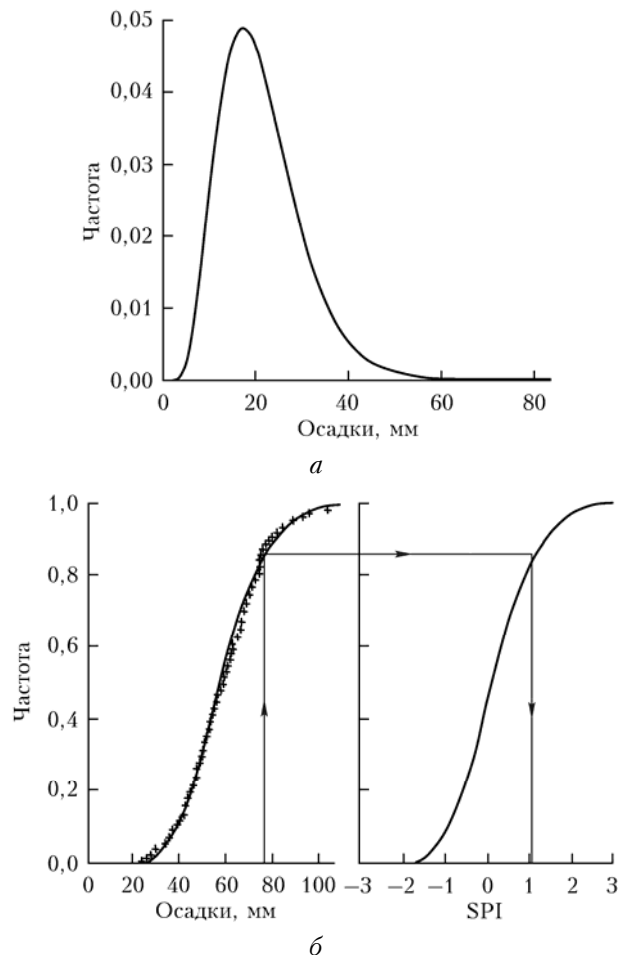


Рис. 1. Пример расчета индекса SPI. Графики функций: а – гамма-распределения; б – кумулятивной вероятности

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

$$H(x) = q + (1 - q)G(x). \quad (8)$$

Далее функция трансформируется в функцию стандартизированного нормального распределения, у которого среднее значение равно нулю, а стандартное отклонение – единице (рис. 1, б). Исходя из аппроксимированных параметров нормального распределения, производят расчет SPI [16]:

$$\text{SPI} = - \left( u - \frac{c_0 + c_1 u + c_2 u^2}{1 + k_1 u + k_2 u^2 + k_3 u^3} \right),$$

$$\text{SPI} = + \left( u - \frac{c_0 + c_1 u + c_2 u^2}{1 + k_1 u + k_2 u^2 + k_3 u^3} \right), \quad (9)$$

где

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

$$u = \sqrt{\ln \left( \frac{1}{(1 - H(x))^2} \right)} \text{ для } 0,5 < H(x) < 1; \quad (10)$$

$$c_0 = 2,515\ 517; \quad k_1 = 1,432\ 788;$$

$$c_1 = 0,802\ 853; \quad k_2 = 0,189\ 269;$$

$$c_2 = 0,010\ 328; \quad k_3 = 0,001\ 308$$

( $u, k, c$  – расчетные коэффициенты).

Таким образом, SPI – это число стандартных отклонений от нуля, где все значения меньше 0 есть дефицит осадков, выше нуля – избыток осадков. 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.

После проведения процедуры визуализации индекса выявлено, что в большинстве случаев значения индекса варьируют в пределах от  $-2$  до  $+2$ . В случаях превышения этого значения явлению присваивается градация «экстремальное», значения в диапазонах  $(-2-1,5)$  и  $(1,5-2)$  характеризуют случаи в градации «сильное»,  $(-1,5-1,0)$  и  $(1,0-1,5)$  – «умеренное», значения индекса в пределах от 1 до +1 демонстрируют нейтральное состояние. Цветовая шкала, используемая для визуализации полей SPI, имеет стандартную цветовую гамму [17, 18].

## 5. Анализ характеристик пространственного распределения SPI

В качестве примера расчета и визуализации индекса SPI приведены два наиболее ярких случая экстремальной засухи на территории России, которые имели место в летние месяцы в 1972 (рис. 2, цв. вклейка) и 2010 гг. (рис. 3, цв. вклейка). Красным и бордовым цветом обозначены области экстремальной засухливости, фиолетовым – области экстремальной увлажненности.

Летом 1972 г. на большей части территории России развилась катастрофическая засуха. В большей степени это явление образовалось за счет формирования блокирующего антициклона: в июне над центральной частью азиатской территории России (АТР), а ближе к августу – на юге европейской территории России (ЕТР). На фоне аномально холодной зимы и глубокого промерзания почвы часть выпавших

Таблица 1

## Значения индексов засухи и ее интенсивность

Индекс	Волгоградская область		Саратовская область	
	Июль			
	Значение	Градация	Значение	Градация
SPI	-1,63	Сильная	-0,59	Слабая
SPEI	-0,71	Слабая	-0,53	Слабая
Индекс Педа S	2,48	Средняя	1,17	Слабая
ГТК Селянинова	0,50	Средняя	0,33	Сильная
ПУ Шашко	0,10	Сильная	0,05	Сильная

зимой и весной осадков ушла в сток, что спровоцировало начавшуюся в мае засуху. В июне засуха образовалась над АТР (см. рис. 2, цв. вклейка), к июлю явление пошло на убыль, а для ЕТР, наоборот, ситуация начала усугубляться. Постоянный приток сухого арктического воздуха на юг ЕТР привел к все новым вторжениям арктического воздуха и к формированию устойчивого антициклона, который разрушился только в конце месяца. Авторы [19] считают, что большую роль в формировании засухи летом 1972 г. сыграл Азорский максимум.

Летом 2010 г. над ЕТР установился блокирующий антициклон, под влиянием которого здесь наблюдалась жаркая и сухая погода. Однако предпосылки, усугубившие положение, были идентичны условиям лета 1972 г. Так же, как и летом 1972 г., в 2010 г. отмечались дефицит осадков в зимний и весенний периоды, а также низкие температуры в зимние месяцы с глубоким промерзанием почвы и медленным оттаиванием. Почва не была увлажнена должным образом, к тому же установилось мощное барическое образование высокого давления на ЕТР в третьей декаде июня, которое просуществовало в общей сложности 55 дней и нарушило привычный западно-восточный перенос воздушных масс с нисходящими потоками воздуха. Более того, эта барическая ситуация препятствовала облакообразованию и, как следствие, выпадению осадков, что и привело в конечном итоге к возникновению катастрофической засухи [20].

Пик засухи наблюдался в июле с максимальными характеристиками интенсивности и распространения. Как видно из рис. 2 и 3 (цв. вклейки), пространственное распределение индекса SPI адекватно

отобразило распространение засухи в приведенных примерах. Для количественной оценки распределения SPI по территории авторы воспользовались площадной характеристикой  $PI$ , отражающей степень пространственного охвата засухой/переувлажнением в процентах от общей площади макрорегиона. В связи с тем что ЕТР и АТР находятся в большей степени под влиянием разных воздушных масс и, как следствие, разных барических образований, ареалы экстремальной засушливости/увлажненности имеют разный генезис, анализ распределения ареалов для каждого макрорегиона был проведен отдельно.

В табл. 1 отражены случаи экстремальной засушливости/увлажненности с наибольшим охватом по территории. Было выделено таких случаев для ЕТР – 6 для засухи и 6 для увлажнения, для АТР – 7 случаев для засухи и 6 для увлажнения. Таким образом, чем больше значение  $PI$ , тем большую территорию охватывает явление. Например, в июне 1972 г. на АТР, а в августе на ЕТР значения  $PI$  в градациях «экстремальная засуха» наибольшие. Действительно, засуха 1972 г. была катастрофической и затронула большую часть территории бывшего Советского Союза.

## 6. Анализ характеристик частотного распределения

Анализ частотного распределения явлений осуществлялся на базе расчета основных статистических характеристик – квантиля, эксцесса, асимметрии, медианы среднееквдратического отклонения (СКО) и размаха, результаты которого сведены в табл. 2.

Таблица 2

### Значения площадной характеристики значительных пиков засушливости и увлажнения на ЕТР и АТР

Месяц	Год	(-2)		(0)		(2)		
		Экстремальная засушливость для ЕТР	Год	Экстремальная засушливость для АТР	Год	Экстремальная увлажненность для ЕТР	Год	Экстремальная увлажненность для АТР
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Июнь	1972	3	1972	12	1981	3	1970	3
Июль		5		1		0		0
Август		31		2		0		0
Июнь	1979	12	1981	4	1998	1	1973	0
Июль		0		3		4		2
Август		1		8		3		1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Июнь		0		7		0		2
Июль	1994	14	1983	0	2000	4	1979	0
Август		1		1		0		0
Июнь		0		2		0		1
Июль	1996	0	1998	8	2003	0	1980	2
Август		17		5		5		0
Июнь		1		0		3		1
Июль	2002	3	2000	1	2005	0	1988	2
Август		14		6		0		4
Июнь		11		2		0		1
Июль	2010	18	2003	3	2006	1	2006	0
Август		0		6		4		4
Июнь						2		
Июль	—	—	—	—	2007	5	—	—
Август						3		

Примечание. В скобках даны индексы SPI.

В связи с наблюдаемыми изменениями климата, в целях выявления тенденции изменчивости статистических характеристик SPI, целесообразно проводить сравнения изменчивости по десятилетиям. В нашем случае 45-летний ряд данных был разделен на четыре 11-летних периода (I период для отрезка 1966–1976 гг., II – для 1977–1987 гг., III – для 1988–1998 гг., IV – для 1999–2010 гг.), которые были соотнесены между собой. Результаты занесены в табл. 3. Сравнительный анализ статистических характеристик от месяца к месяцу за различные временные периоды показал следующее: для ЕТР в июне в последние годы линия асимметрии смещена в сторону отрицательных значений, следовательно, происходит преобладание увлажненных ситуаций над за-

сушливыми. За исключением июня для ЕТР и июля для АТР наблюдается уменьшение показателя эксцесса в последние годы, и, таким образом, увеличивается интенсивность явлений, или так называемых «хвостов». Более того, в пользу этого утверждения говорит увеличение показателя «размах» в августе для ЕТР, в июне и июле для АТР. Стоит отметить небывалое минимальное значение в июле в IV период для АТР, которое составило –5, что говорит об экстремальной засухе, которая имела место в указанное время. А максимальное значение, характеризующее экстремальное увлажнение, отмечалось в августе во второй период, со значением 3,97 для этой же территории. Увеличение интенсивности также можно проверить 5%-м квантилем.

Таблица 3

## Результаты расчетов статистических характеристик для ЕТР и АТР

Период I (1966–1976) II (1977–1987) III (1988–1998) IV (1999–2010)	Левый квантиль 0,95 (увлажненность)	Правый квантиль 0,05 (засуха)	Медиана	СКО	Асимметрия	Эксцесс	Min	Max
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ЕТР								
<i>Июнь</i>								
I	–1,78	1,38	–0,09	0,93	–0,25	3,14	–3,53	2,66
II	–1,70	1,63	0,13	1,02	–0,40	3,52	–4,52	2,85
III	–1,49	1,65	0,16	0,96	–0,19	3,04	–3,46	2,89
IV	–1,91	1,59	0,08	1,06	–0,39	3,21	–4,10	2,78
<i>Июль</i>								
I	–1,71	1,43	0,07	0,94	–0,47	3,49	–4,04	2,68
II	–1,57	1,54	0,18	0,96	–0,50	3,66	–3,93	2,72
III	–1,77	1,67	0,11	1,02	–0,24	3,17	–4,12	3,00
IV	–1,93	1,57	–0,04	1,05	–0,20	2,89	–3,53	3,17
<i>Август</i>								
I	–1,87	1,41	–0,01	0,99	–0,41	3,70	–4,53	3,20
II	–1,51	1,59	0,15	0,95	–0,22	3,23	–3,72	3,12
III	–1,75	1,54	0,13	0,99	–0,40	3,10	–3,45	3,04
IV	–1,74	1,66	0,03	1,04	–0,13	3,00	–3,77	3,63

1	2	3	4	5	6	7	8	9
АТР								
<i>Июнь</i>								
I	−1,63	1,58	0,04	0,96	−0,09	3,13	−3,86	3,39
II	−1,87	1,58	0,01	1,04	−0,25	3,19	−4,14	3,24
III	−1,67	1,52	0,05	0,98	−0,31	3,13	−3,80	3,04
IV	−1,65	1,67	0,12	1,01	−0,08	2,91	−3,49	3,60
<i>Июль</i>								
I	−1,65	1,56	0,13	0,98	−0,33	3,21	−3,65	3,05
II	−1,52	1,56	0,06	0,94	−0,11	3,03	−3,77	3,36
III	−1,98	1,57	0,02	1,07	−0,34	3,17	−4,09	3,57
IV	−1,67	1,59	0,04	1,00	−0,27	3,31	−5,00	3,14
<i>Август</i>								
I	−1,72	1,56	0,07	1,00	−0,27	3,05	−3,90	3,06
II	−1,79	1,61	0,06	1,03	−0,21	3,04	−3,78	3,97
III	−1,80	1,59	0,08	1,03	−0,32	3,32	−4,30	3,47
IV	−1,60	1,53	0,06	0,95	−0,19	3,15	−3,89	2,97

Обнаруживается тенденция к увеличению значений левого квантиля в июне и июле, а в августе – увеличение значений правого квантиля для ЕТР. Для АТР с I по III период в июле и августе значение левого квантиля растет, а в последний период уменьшается. Правый квантиль имеет тенденцию к росту в июне и июле, а в августе ситуация неоднозначная.

В июле и августе асимметрия постепенно уменьшается и приближается к медиане, к тому же происходит снижение показателя эксцесса в последние годы, что говорит о сокращении числа экстремальных явлений в этот месяц.

Для АТР статистические характеристики распределяются следующим образом: в июне асимметрия в последний период близко располагается к нулю, эксцесс также имеет наименьшее значение в последний период, интенсивность явлений сокращается за счет уменьшения засухи и увеличения интенсивности увлажненности. Таким образом, в последние годы прослеживается преобладание увлажненных ситуаций над засушливыми.

В июле и августе в последний период наблюдается увеличение числа экстремальных явлений, экстремумы преобладают в градации «засушливость» и уменьшаются в градации «увлажненность».

Среднеквадратическое отклонение позволяет оценить меру разброса SPI относительно нормы. В условиях изменения климата значения СКО имеют тенденцию к увеличению. Расчет СКО для рассматриваемого отрезка времени (1966–2010 гг.) подтверждает это. Также отмечено, что для всех случаев прослеживается тенденция к левосторонней асимметрии, что свидетельствует о преобладании увлажненных ситуаций над засушливыми. Более того, для ЕТР характерна следующая особенность: если в июне значения засушливости высоки, а увлажненность незначительна, то к августу интенсивность увлажненности возрастает, а засушливости, наоборот, начинает уменьшаться. Для АТР в июне обе градации проявляют себя достаточно активно: к июлю засуха преобладает, а увлажненность начинает падать, в августе обе

градации имеют тенденцию к сокращению. Эта тенденция стала четко прослеживаться в последние годы.

Характеристикой пространственного распределения «хвостов» экстремальных явлений стал 95%-й процентиль, значения которого были нанесены на карту для летних месяцев для засушливости и увлажненности по отдельности.

Анализ пространственного распределения 95%-го percentиля (рис. 4, цв. вклейка) показал, что в целом наибольшие значения засушливости отмечаются в южных, западных районах, на Европейском Севере, юге Сибири, Приморья, Хабаровского края; наименьшие значения отмечаются в северных областях. В течение летнего периода распространение явления по территории изменяется: так, в июне «экстремальная засушливость» (градация в терминах индекса SPI [14]) сконцентрирована преимущественно в юго-западных областях, в июле явлением охвачен весь юг, Мурманская область, юг Дальнего Востока, а в августе «экстремальная засушливость» распространена почти по всей территории страны.

По полученным значениям показателя 95%-го percentиля увлажненности наиболее распространенным диапазоном «хвостов» также является градация «сильная» (рис. 5, цв. вклейка).

Наряду с этим отмечается значительное число случаев в диапазоне «умеренная» увлажненность. В диапазоне «экстремальная» увлажненность отмечаются единичные случаи. Однако в сравнении со значениями 95%-го percentиля засушливости значения 95%-го percentиля увлажненности затрагивают почти всю территорию страны, к тому же охватывают больше северных регионов, а именно Якутию, Чукотку и Красноярский край. При этом наибольшие значения увлажненности отмечаются в июне, а наименьшие – в июле.

## 7. Оценка долгопериодной изменчивости

Статистический анализ засушливости/увлажненности был дополнен анализом долгопериодных

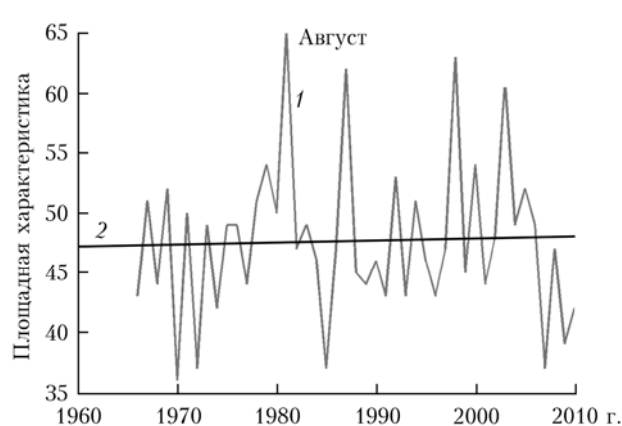
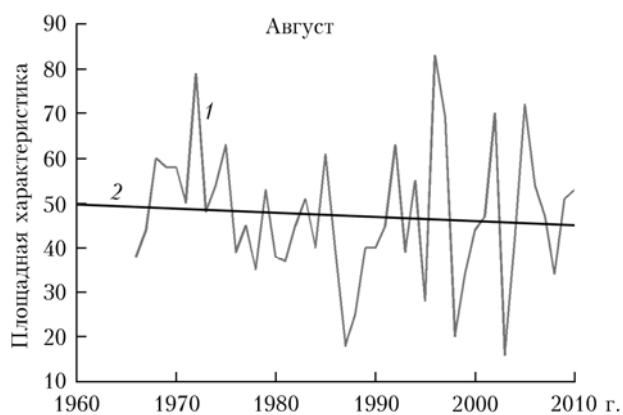
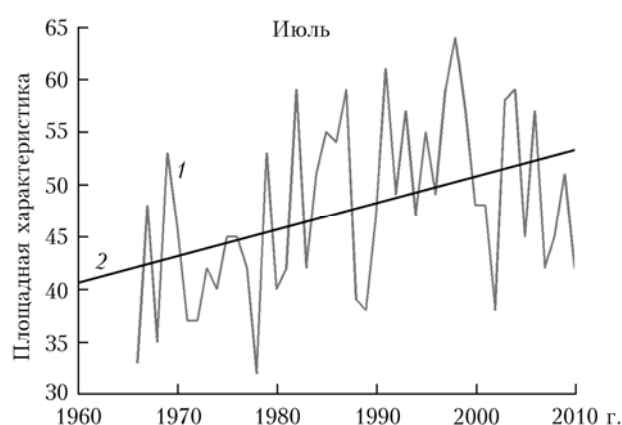
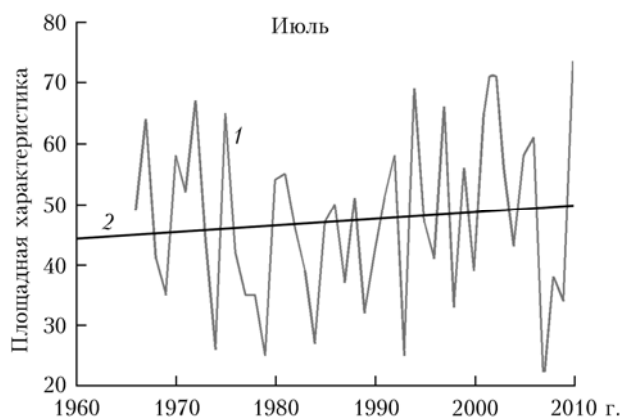


Рис. 6. Графики долгопериодных тенденций изменений распространения засухливости на ЕТР

Рис. 7. Графики долгопериодных тенденций изменений распространения засухливости на АТР

тенденций изменений распространения засухливости (рис. 6, 7) и увлажненности для ЕТР и АТР за каждый летний месяц.

Таким образом, для ЕТР отмечается уменьшение засухливости в июне и в августе, а рост явления в июле (см. рис. 6).

Для увлажнения результаты противоположные: рост в июне и в августе и уменьшение в июле. При этом коэффициент линейного тренда для обоих явлений имеет наибольшее значение в июле с разницей в знаке, т.е. засухливость возрастает, а увлажненность сокращается. Статистическая значимость коэффициентов линейных трендов подтверждается в июне для засухи с вероятностью 93%, для увлаж-

нения с вероятностью 92,5%. В июле и августе коэффициент Стьюдента статистически не значим для обоих явлений. В июне происходят ежегодное сокращение площади распространения засухливости со скоростью 0,33 единицы площадной характеристики (процент от территории) и, соответственно, увеличение площади распространения увлажненности по территории со скоростью 0,32 единицы.

Для АТР были рассчитаны идентичные графики линейных трендов распределения засухливости и увлажненности, на которых прослеживаются интенсивное увеличение засухливости (см. рис. 7) и уменьшение увлажненности.



Статистическая значимость коэффициентов уравнений линейных трендов подтверждается для засухи в июне и в июле с вероятностью 68 и 99% соответственно, для увлажнения коэффициент Стьюдента значим только в июле с вероятностью 99%. Для остальных случаев значимость не обнаруживается. Ежегодный рост площади распространения засушливости происходит в июне со скоростью 0,1 единицы, а в июле со скоростью 0,25 единицы площадной характеристики (процент от территории). Уменьшение площади распространения увлажненности по территории происходит в июне со скоростью 0,11 единицы и в июле со скоростью 0,26 единицы.

### Заключение

Впервые был проведен пространственно-временной анализ с использованием индекса SPI по территории России. Благодаря способности индекса нормализовать осадки он удобен в использовании для решения задач анализа засух и увлажнения, а также для решения прогностических задач и использования в прогностических статистических схемах. Проведенный анализ показал, что в период с 1966 по 2010 г. для территории России индекс адекватно представляет засушливость и увлажненность. С помощью расчетов индекса удалось выявить увеличение амплитуды экстремальных явлений (засуха/переувлажненность) в последние 20 лет, с преобладанием увлажненных ситуаций над засушливыми. Выявлены наиболее засушливые районы и тенденции к распространению засухи за летний период на территории России. Таким образом, для ЕТР засушливость сокращается в июне и августе, рост явления наблюдается в июле. Увлажненность увеличивается в июне и в августе, а сокращается в июле. Для АТР прослеживаются увеличение засушливости и уменьшение увлажненности.

Результаты работы позволили количественно и качественно оценить региональные изменения пространственных и временных характеристик режимов засушливости/увлажненности. Такого рода информация может быть полезной в процессах валидации климатических моделей и разработки схем долгосрочного прогнозирования. В дальнейшем выделенные случаи засушливости/увлажненности, а также полученные результаты планируется подвергнуть подробному синоптическому анализу.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 13-05-90433, 13-05-00562, РФФИ № 14-37-0053 и проекта CLIMSEAS Project (Ref. N 247512; PEOPLE-2009-IRSES) of the Seventh Framework Program of the European Union.

1. *Методы* оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем: Монография / Под ред. С.М. Семенова. М.: Росгидромет, 2012. 506 с.

2. *Sheffield J., Wood E.F., Roderick M.L.* Little change in global drought over the past 60 years // *Nature (Gr. Brit.)*. 2012. V. 491, N 7424. P. 435–438.
3. *Третье* национальное сообщение Российской Федерации / Под ред. Ю.А. Израэля. М., 2002. 158 с.
4. *Национальный доклад* по проблемам изменения климата. М., 2002. 29 с.
5. *Сиротенко О.Д., Клещенок А.Д., Павлова В.Н., Абашина Е.В., Семендяев А.К.* Мониторинг изменений климата и оценка последствий глобального потепления для сельского хозяйства // *Агрофизика*. 2011. № 3. С. 31–39.
6. *Педь Д.А.* О показателе влажности и избыточного увлажнения // *Тр. Гидрометцентра СССР*. 1975. № 156. С. 19–38.
7. *Селянинов Г.Т.* О сельскохозяйственной оценке климата // *Тр. по сельскохозяйственной метеорол.* 1928. № 20. С. 165–177.
8. *Иванов Н.Н.* Показатель биологической эффективности климата // *Изв. Рус. геогр. общества*. 1962. Т. 94, № 1. С. 65–70.
9. *Lloyd-Hughes B., Saunders M.A.* A drought climatology for Europe // *Int. J. Climatol.* 2002. V. 22, N 13. P. 1571–1592.
10. *Standardized Precipitation Index. User Guide*, WMO. 2012. V. 1090. P. 18.
11. *Козельцева В.Ф., Педь Д.А.* О некоторых климатических особенностях атмосферной засушливости в западной половине территории СССР // *Тр. Гидрометцентра СССР*. 1985. № 261. С. 34–46.
12. *Педь Д.А.* Климатические особенности атмосферных засух и избыточного увлажнения // *Тр. Гидрометцентра СССР*. 1975. № 156. С. 39–63.
13. *Страшная А.И., Максименкова Т.А., Чуб О.В.* Агрометеорологические особенности засухи 2010 г. в России по сравнению с засухами прошлых лет // *Тр. Гидрометцентра России*. 2011. № 345. С. 171–188.
14. *Лаврова И.В., Узрюмов А.И.* Классификация полей индекса атмосферной засушливости в связи с проблемой современных изменений климата // *Метеорол. и гидрол.* 2008. № 12. С. 25–32.
15. *Национальная служба океана и атмосферы.* Национальный климатический центр данных: пример визуализации индекса SPI. URL: <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/prelim/drought/spi.html>
16. *Guttman N.B.* Accepting the Standardized Precipitation Index: A calculation algorithm // *J. Amer. Water Resour. Assoc.* 1999. V. 35, iss. 2. P. 311–322.
17. *Национальный центр по смягчению последствий засухи (США): программа расчета индекса SPI.* URL: <http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx>
18. *Университет Гамбурга:* пример визуализации индекса SPI. URL: <http://icdc.zmaw.de/spi.html?&L=1>
19. *Черенкова Е.А., Кононова Н.К.* Анализ опасных атмосферных засух 1972 и 2010 гг. и макроциркуляционных условий их формирования на территории европейской части России // *Тр. ГГО*. 2012. № 565. С. 165–187.
20. *Шакина Н.П., Иванова А.Р., Бирман Б.А., Скриптунова Е.Н.* Блокирование: условия лета 2010 г. в контексте современных знаний // *Сб. докладов совмест. заседания Президиума науч.-тех. совета Росгидромета и науч. совета РАН «Исследования по теории климата Земли»*. М.: Триада, 2010. С. 6–21.

*D.N. Utkuzova, V.M. Han, R.M. Vil'fand.* **Statistical analysis of extreme drought and wet conditions in Russia.**

Statistical analysis of extreme drought and wet conditions in Russia has been conducted using the SPI index calculated over 500 stations with records from 1966 to 2010. Different parameters of SPI frequency distribution and long-term tendencies were calculated, as well as spatial characteristics indicating drought and moisture propagation. Results of the analysis demonstrate a tendency toward an increase in the intensity of drought and moisture extremes in Russia during last years. There are fewer drought in the northern regions. The drought propagation decreases for the European territory of Russia in June and August and increases in July. The tendency for the moisture is opposite. For the Asian territory of Russia, the drought propagation significantly increases in July along with a decrease in moisture.

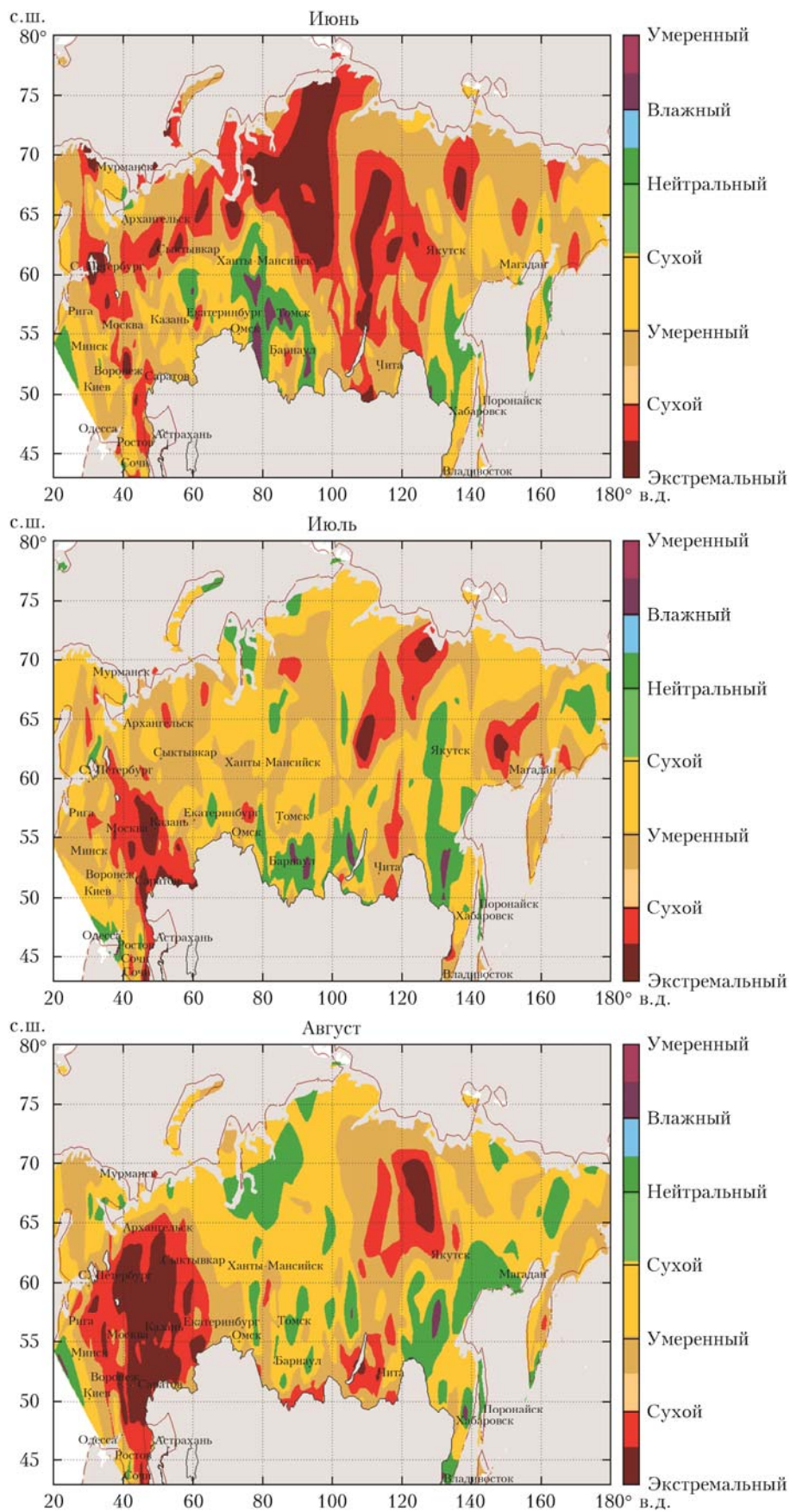


Рис. 2. Расчет индекса SPI для июня, июля и августа 1972 г.

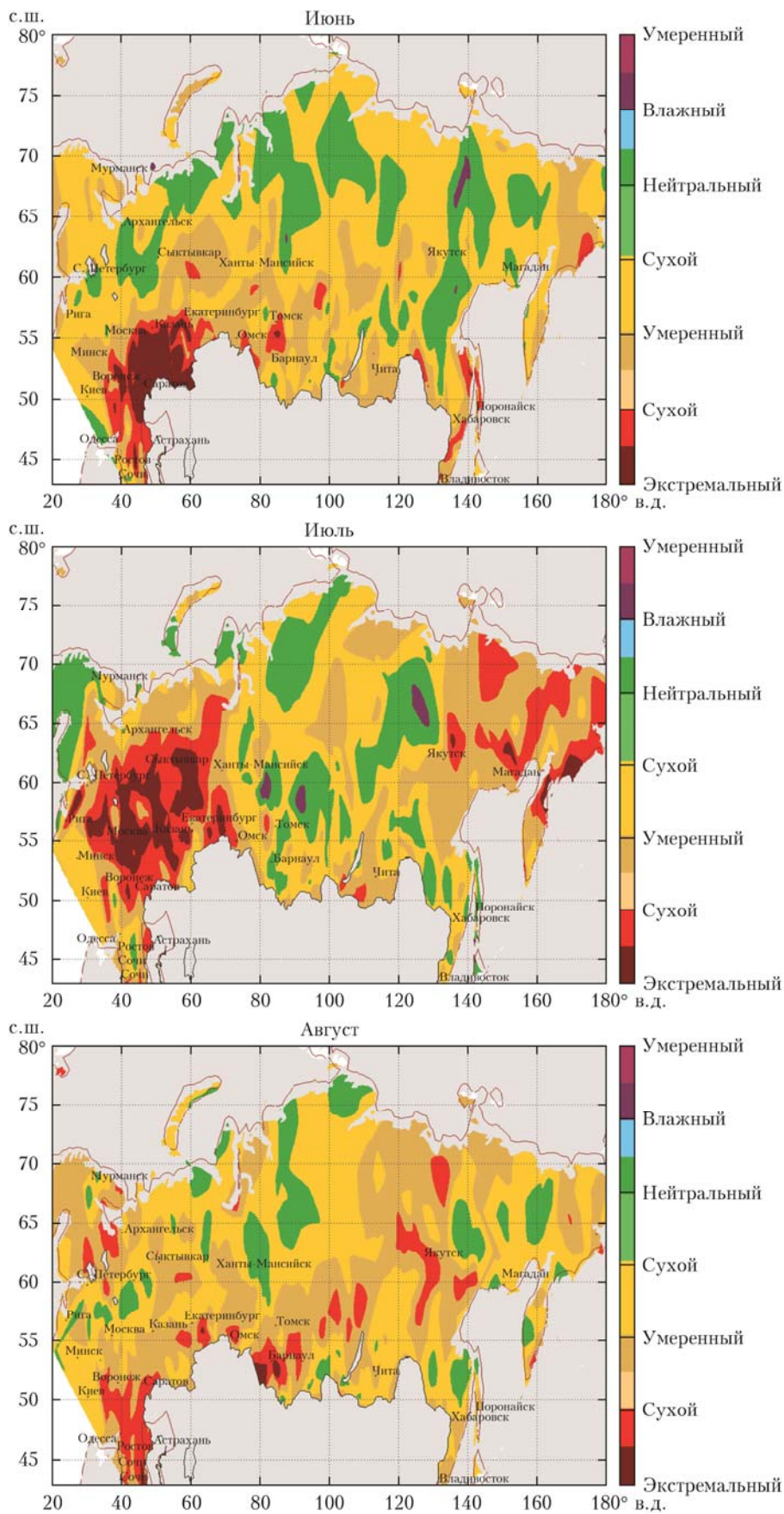


Рис. 3. Расчет индекса SPI для июня, июля и августа 2010 г.

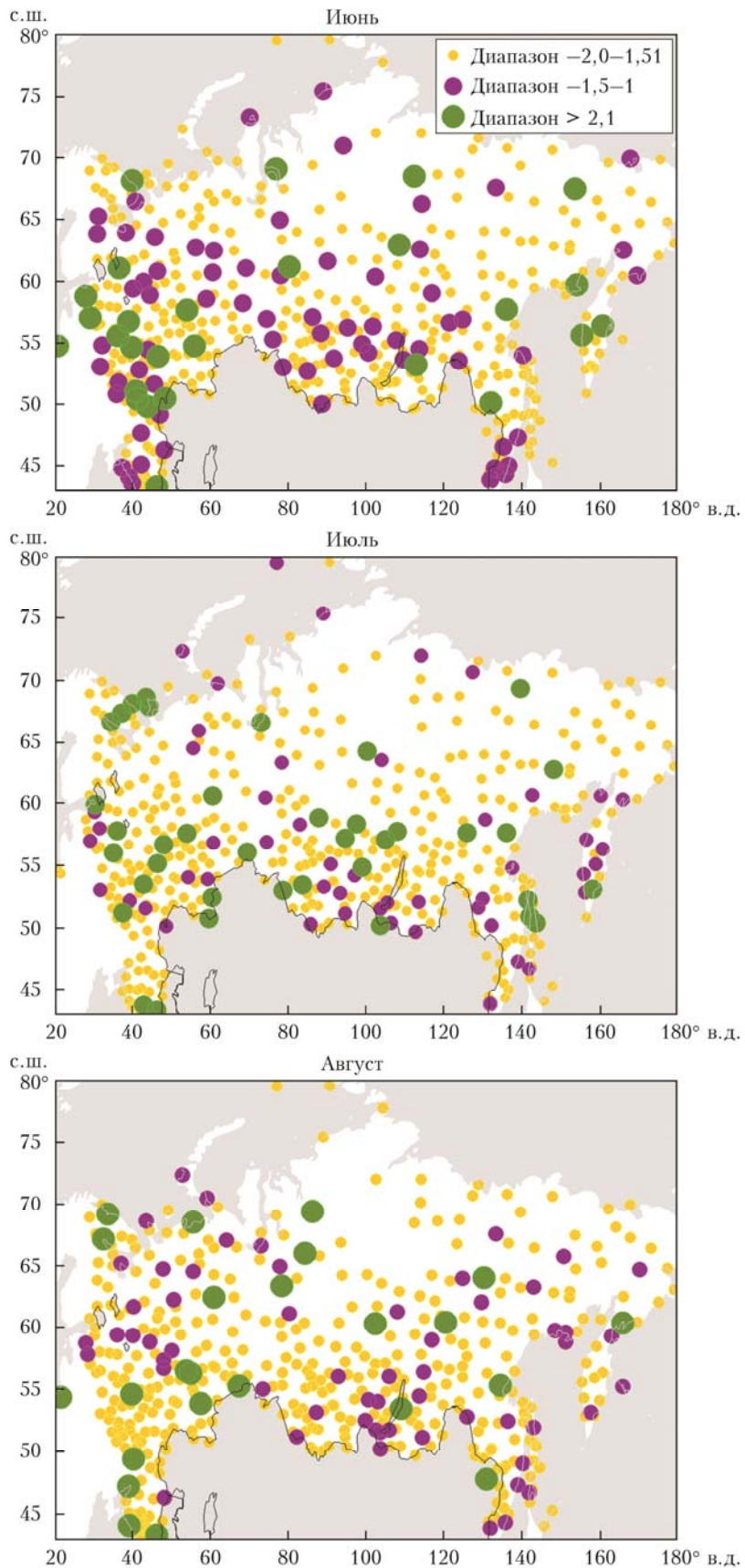


Рис. 4. Пространственное распределение 95%-го процента засухливости по территории РФ (фиолетовые маркеры – умеренная засуха, желтые – сильная засуха, зеленые – экстремальная засуха, градация использована в терминах индекса SPI)

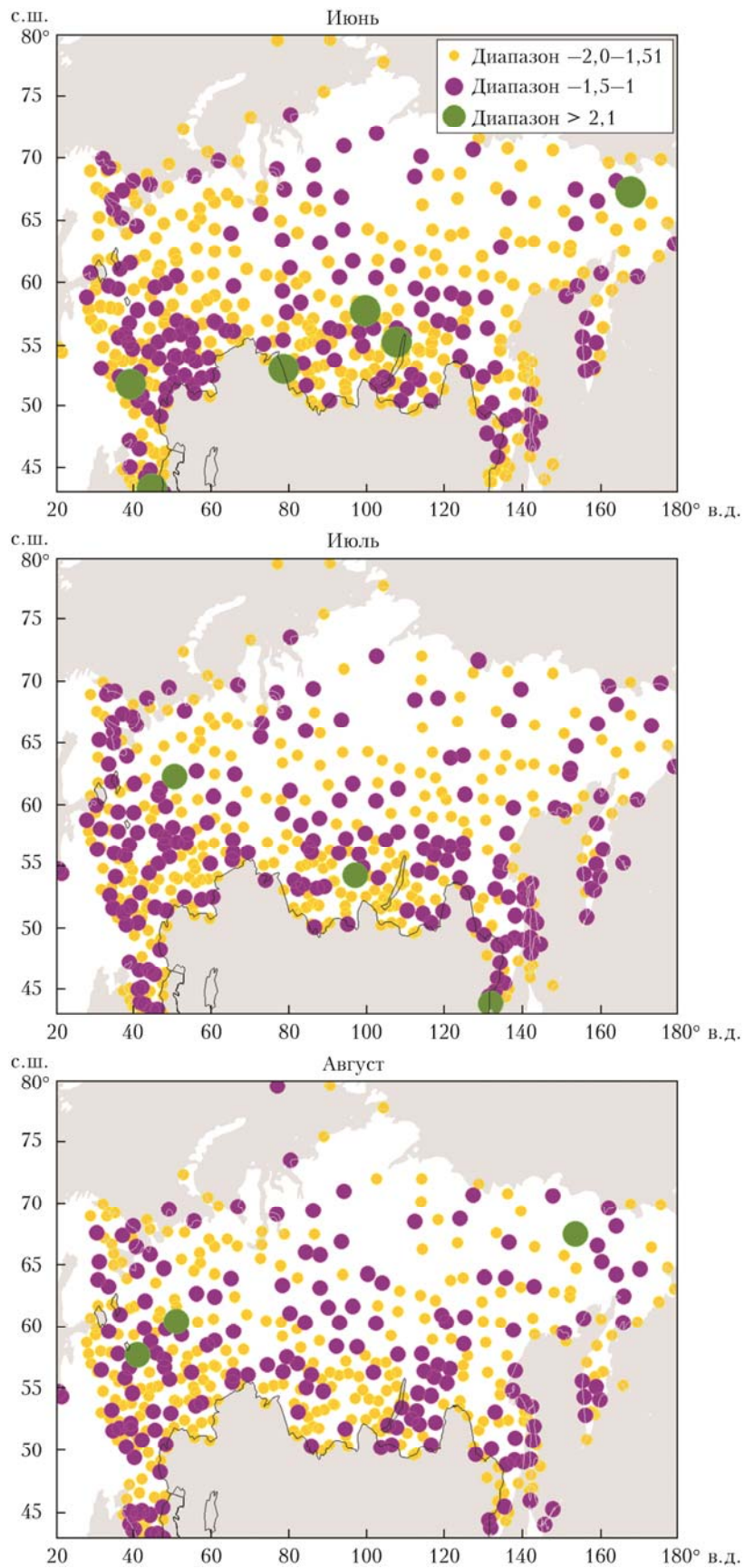


Рис. 5. Пространственное распределение 95%-го процента увлажненности по территории РФ (фиолетовые маркеры – умеренная увлажненность, желтые – сильная увлажненность, зеленые – экстремальная увлажненность)