

УДК 551.583

## ИЗМЕНЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ СИНОПТИЧЕСКИХ ДОЖДЕВЫХ ПЕРИОДОВ В ЕВРОПЕ С 1950 ПО 2008 ГОДЫ И ИХ СВЯЗЬ С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМИ ОСАДКАМИ

© 2011 г. О. Г. Золина

Представлено академиком Р.И. Нигматулиным 29.12.2009 г.

Поступило 03.09.2010 г.

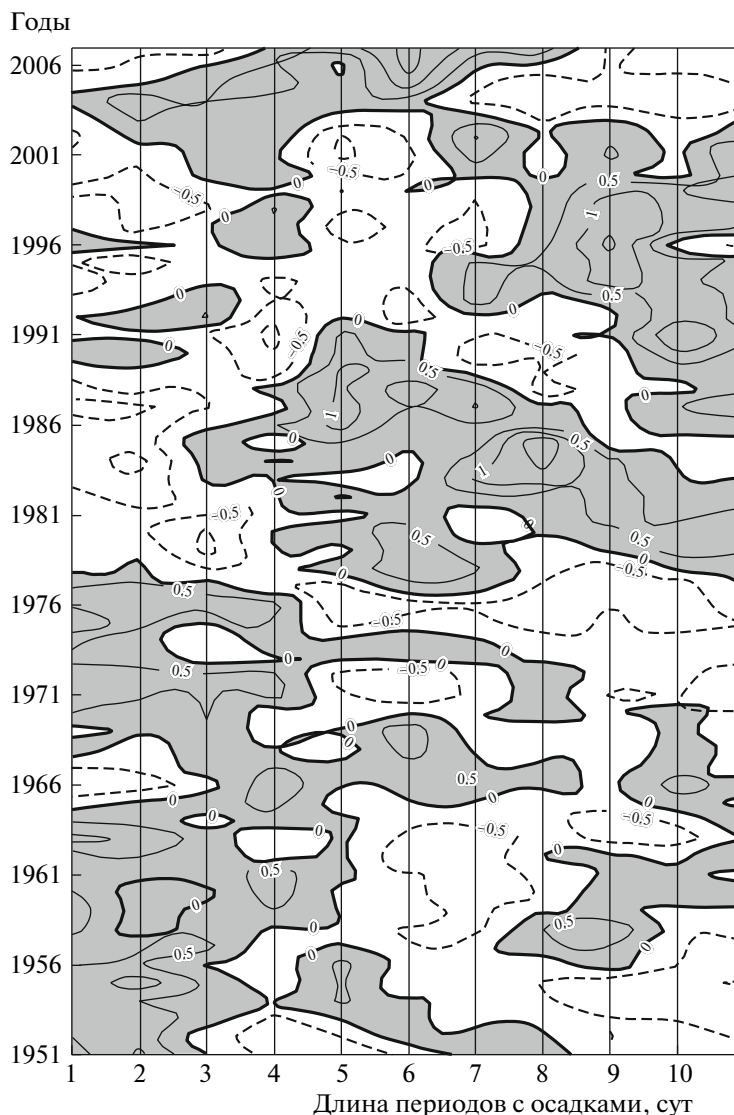
В течение последних десятилетий в Европе наблюдается значительное увеличение количества средних и экстремальных осадков. Осадки, измеренные на станциях и полученные по модельным данным, демонстрируют аналогичные тенденции [1–4]. Кроме возрастания абсолютной величины экстремальных осадков наблюдается также существенный рост доли сильных осадков по отношению к общему их количеству [5–9]. На территории Европы эти изменения составляют в среднем 3–4% в десятилетие. Однако в упомянутых работах анализировались только отдельно взятые сутки с осадками и не рассматривалась продолжительность таких периодов. Тем не менее эта характеристика важна при описании характера осадков. Так, например, осадки средней интенсивности, выпадающие в течение нескольких суток подряд, могут оказывать намного более существенное влияние на изменение влажности почвы (и, как результат, на возникновение наводнений), чем очень сильные, но кратковременные. Катастрофические наводнения на реках Европы обычно связаны с аномально длинными периодами осадков, которые инициируются сериями циклонов, приходящих из Северной Атлантики. В настоящее время существует всего несколько работ, рассматривающих продолжительность периодов осадков на синоптическом уровне. Например, при анализе изменений экстремальных осадков в США [10, 11] исследовались серии суток без осадков и с осадками, которые получали из сумм, превышающих выбранное пороговое значение, т.е. периоды с осадками как таковые не анализировались.

В данной работе рассматриваются изменения продолжительности периодов осадков в Европе, включая европейскую часть России, за последние 60 лет по данным измерений на метеорологиче-

ских станциях с суточным разрешением. Осадки, выпадающие непрерывно в течение нескольких суток, определяются как период с осадками. При этом необходимо понимать, что фактически один период осадков при данном определении может состоять из нескольких кратковременных (продолжительностью менее суток) дождей.

Для анализа использовались ежесуточные изменения осадков в Европе, собранные в Королевском метеорологическом институте Голландии (KNMI), известные как European Climate Assessment (ECA) daily dataset [12]. Архив включает более 1600 станций с измерениями осадков в Западной Европе и европейской части России. При проверке качества данных найдено 57 станций в России, Белоруссии и Украине, содержащих ошибочную информацию. Эти станции были заменены оригинальными станциями из архива Росгидромета. Кроме того, к архиву были добавлены 32 российские станции. Из всех имеющихся рядов наблюдений были выбраны только те, для которых количество пропущенных значений составляет менее 10% от всех наблюдений. В итоге результаты представлены для 699 станций за период с 1950 по 2008 г.

Для оценки периодов с непрерывно наблюдающимися осадками значимыми считались осадки больше 1 мм/сут. Это пороговое значение выбрано из-за ограниченной точности измерения осадков на осадкомерных станциях и для того, чтобы исключить очень слабые дожди, которые измеряются недостаточно точно [5]. В среднем, в распределении длительности дождевых периодов наблюдается четко выраженная экспоненциальная зависимость количества периодов от их продолжительности с наиболее часто (примерно в 50% случаев) встречающимися однодневными осадками. На рис. 1 показаны аномалии доли количества суток с осадками для периодов разной продолжительности по отношению к общему количеству влажных суток, нормализованные на общее количество суток с осадками с 1950 по 2008 г. Они рассматривались как



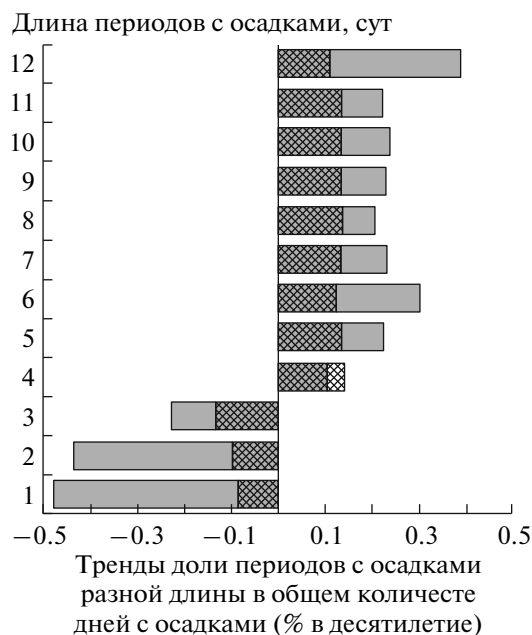
**Рис. 1.** Нормализованные аномалии доли количества суток с осадками для периодов разной продолжительности по отношению к общему количеству влажных суток.

$$P'(x) = \frac{P(x) - \bar{P}(x)}{\sigma P(x)}, \quad (1)$$

где  $x$  – анализируемый параметр (длина периода с осадками),  $P(x)$  – вероятностное распределение  $x$  для конкретного года,  $\sigma P(x)$  – среднеквадратичное отклонение повторяемости заданной продолжительности периодов осадков,  $P'(x)$  – нормализованная аномалия вероятностного распределения для данного года. Черта сверху означает оператор осреднения. С 1950 по 2008 г. для периодов с продолжительностью более 4 сут аномалии преимущественно положительные, что свидетельствует об увеличении количества суток с осадками, сгруппированных в длинные периоды. В то же время для коротких периодов (продолжительностью менее 4 сут) наблюдаются в основном

отрицательные аномалии. На рис. 2 показаны тренды нормализованных аномалий, представленных на рис. 1, вместе с оценками их значимости на уровне 95% ( $t$ -тест Стьюдента). Практически все оценки трендов статистически значимы. Для повторяемости периодов с продолжительностью менее 4 сут наблюдаются статистически значимые отрицательные тренды, а для длинных периодов – положительные.

Крайне важно отметить, что увеличение длительности периодов осадков не было обусловлено увеличением общего количества суток с осадками, для которых за последние 60 лет наблюдаются положительные тренды до 3.6% в десятилетие. Нами проведена серия экспериментов, в которых методом Монте-Карло генерировались тренды (1, 2 и 3% в десятилетие) количества суток с осад-



**Рис. 2.** Тренды нормализованных аномалий длительности периодов с осадками (серый цвет) вместе с оценками их значимости (штриховка) на уровне 95% (*t*-тест Стьюдента).

ками, а затем оценивалось их влияние на изменение длительности периодов осадков. Аналогичный подход использовался в работе [13] для анализа влияния пропусков в рядах осадков на оценки трендов. Всего проведено 3 серии экспериментов (табл. 1). Сначала осуществлялась случайная равномерно распределенная генерация трендов в рядах количества суток с осадками. Этот эксперимент показал, что увеличение количества суток с осадками может приводить даже к уменьшению длительности периодов осадков, так как случайным образом может увеличиваться количество односуточных осадков. Затем тренды генерировались в соответствии с квазиреальным распределением суток с осадками для периодов разной длины. И наконец, был проведен “экстремальный” эксперимент, когда тренды в количестве суток с осадками генерировались как один консолидированный дождевой период. Из табл. 1 видно, что максимально возможное увеличение длины периодов осадков, даже в случае “экстремального” нереалистичного эксперимента для тренда 3% в десятилетие составляет лишь  $0.471 \pm 0.254\%$ , что описывает лишь 10% наблюдаемых реальных изменений длины дождевых периодов.

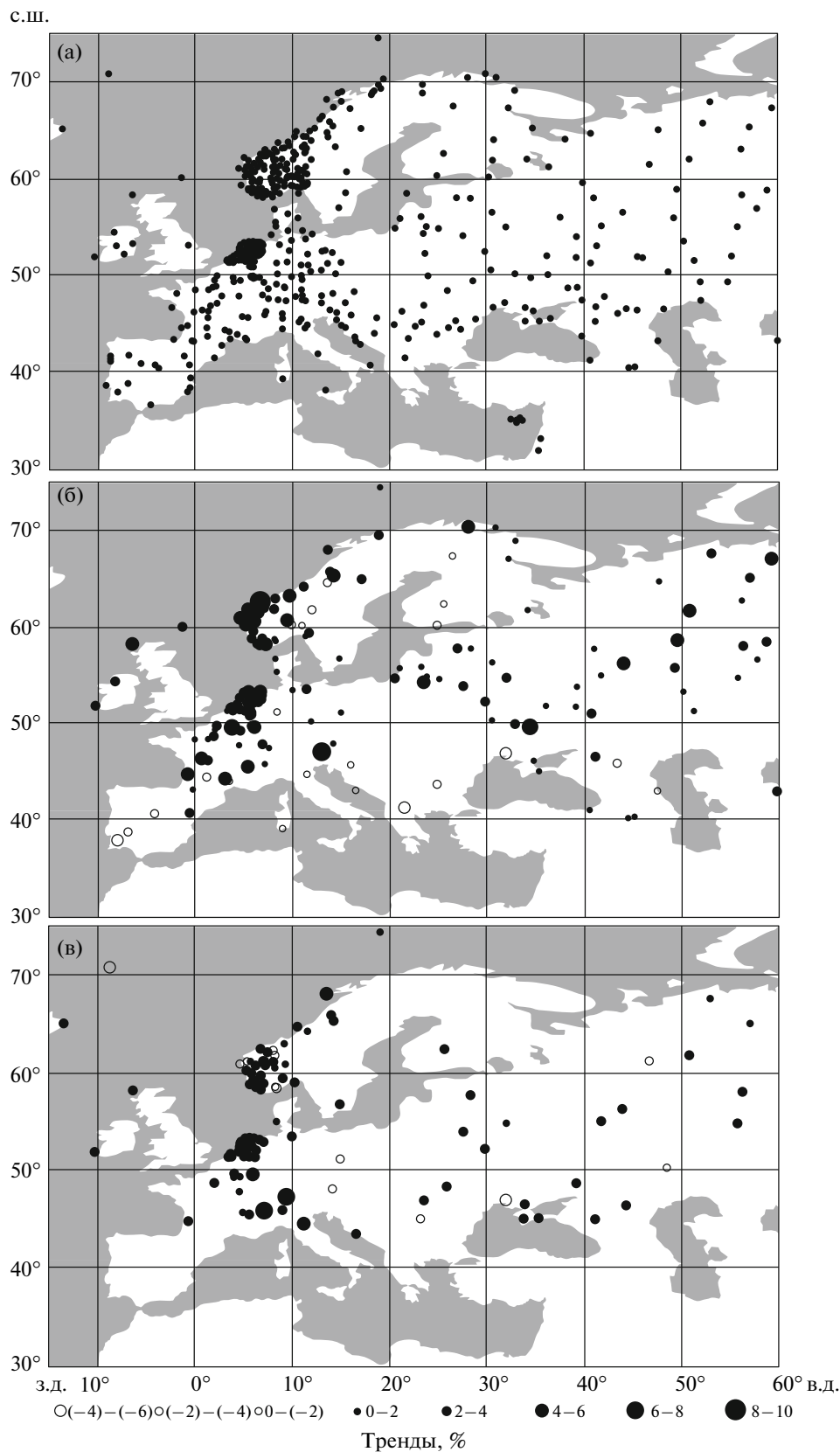
Увеличение продолжительности периодов осадков проявляется по-разному в разных географических районах. Географическое расположение метеостанций, использованных в работе, приведено на рис. 3а. На рис. 3б показано географическое распределение линейных трендов в длительности периодов с осадками с 1950 по 2008 г. В центральной части Западной Европы, в большей части Скандинавии и на севере европейской части России тренды преимущественно положительные и составляют от 2 до 4–5% в десятилетие. Таким образом, длина периодов осадков увеличивается в Западной Европе на 0.6–0.7 сут за 60 лет и на 0.5 сут в европейской части России. Линейные тренды количества и интенсивности осадков в целом в Западной Европе также положительные для большинства станций и составляют 1.5–2.5% в десятилетие в северной части континентальной Западной Европы, 2–3% в Скандинавии и до 4% в восточной части Западной Европы [8, 9]. Наблюдающаяся перегруппировка суток с осадками из коротких в более длинные периоды (рис. 1 и 3б) показывает, что увеличение общего количества осадков за последние 60 лет происходило в основном за счет осадков, выпавших в течение более длинных периодов.

Нами рассчитаны линейные тренды вклада осадков, выпадавших в течение относительно коротких периодов (менее 50% от максимальной длины, обычно 1–2-суточные периоды) и относительно длинных периодов (более 50% от максимальной длины, обычно имеющих продолжительность 3 сут и больше), в суммарные осадки (рисунок не приводится). Для коротких периодов

**Таблица 1.** Оценки возможных трендов (% в десятилетие) в продолжительности периодов осадков за счет эффекта увеличения количества дождливых суток с 1950 по 2008 г. для всех европейских станций

Эксперимент	Анализируемые тренды в количестве суток с осадками		
	1%	2%	3%
Случайное равномерное распределение увеличения суток с осадками	$0.004 \pm 0.006$	$0.009 \pm 0.017$	$0.013 \pm 0.022$
Увеличение суток с осадками в соответствии с смоделированным квазиреальным распределением суток с осадками по периодам	$0.084 \pm 0.051$	$0.131 \pm 0.089$	$0.197 \pm 0.114$
“Экстремальный” нереалистичный эксперимент (увеличение суток с осадками представлено одним консолидированным периодом)	$0.171 \pm 0.102$	$0.314 \pm 0.193$	$0.471 \pm 0.254$

Примечание. Реальные положительные тренды в количестве суток с осадками изменяются от 0.3 до 3.6% в десятилетие.



**Рис. 3.** а – географическое расположение метеостанций, использованных в работе. б – географическое распределение оценок линейных трендов в длительности периодов с осадками (% в десятилетие) с 1950 по 2008 г. в – линейные тренды (% в десятилетие) доли количества экстремальных осадков, связанных с относительно длинными периодами, в количестве суммарных осадков. Все тренды значимы на уровне 95% (*t*-тест Стьюдента).

наблюдается уменьшение их вклада в общее количество осадков на 3–5% в десятилетие. Самые большие тренды отмечаются в восточной части Европейской России (более 5% в десятилетие). В то же время доля в общем количестве осадков длиннопериодных эпизодов увеличивается почти повсеместно от 1–3% в десятилетие в Западной Европе до 4–6% на востоке европейской части России. Таким образом, вклад коротких периодов с осадками в общее количество осадков уменьшается в течение последних 60 лет с 46–48% до 28–33%, в то время как вклад длинных периодов суток с осадками увеличивается примерно от 50% в 1950-х до 70% в 2000-х годах.

Крайне важен вопрос о связи экстремальных осадков с длительностью дождевых периодов. Для оценки влияния изменений в структуре осадков на Европейском континенте на опасные природные явления, такие как ливневые паводки и наводнения [14], очень важно знать насколько продолжительным был период, связанный именно с экстремальными осадками. Также в климатическом аспекте важным является вопрос, как изменялась длина периодов, в которых выпадали экстремальные осадки. В данной работе экстремальные осадки были определены как величины, превышающие 95%-ое пороговое значение суточных осадков. Результаты, полученные при аппроксимации гамма-распределения или распределения экстремальных значений, практически совпали с нашими оценками. Для определения доли экстремальных осадков в общем количестве осадков рассматривались 5% случаев с наиболее сильными осадками за год [7]. Оценки экстремальных осадков, полученные с использованием распределения частичного вклада [8], показывают аналогичные результаты.

Анализ статистического распределения длин дождевых периодов, с которыми связаны экстремальные осадки, показывает, что в среднем для Европы экстремальные осадки наиболее часто выпадают в периоды продолжительностью 2–3 сут. Для района Скандинавии экстремальные осадки ассоциированы с периодами длиной 3–4 сут. Это отражает доминирующее влияние атмосферных циклонических систем при образовании осадков в этом районе. В европейской части России экстремальные осадки связаны по большей части с 1–2-суточными дождливыми периодами. Это связано с более континентальным типом климата в этом районе, при котором роль конвективных (кратковременных) осадков существенно возрастает по сравнению с фронтальными осадками. Исследование временной эволюции аномалий количества эпизодов экстремальных осадков, выпадавших в дождевые периоды разной длительности для всех европейских станций, показывает, что в течение 1950–2008 гг. экстремальные осадки, связанные с более длинными периодами, ста-

ли наблюдаться значительно чаще (тренд составляет 3–4% в десятилетие). В то же время экстремальных осадков, связанных с короткими периодами, наблюдалось значительно меньше (тренд до 3% в десятилетие). В частности, повторяемость экстремальных осадков, связанных с периодами короче 3 сут, уменьшилась с 60% в 1950–1960 до 45% в 1990–2000 гг., при этом количество эпизодов экстремальных осадков, связанных с длинными дождливыми периодами, увеличилось с 40 до 55%. На рис. 3в показаны линейные тренды доли количества экстремальных осадков, связанных с относительно длинными периодами, в количестве суммарных осадков. Очевидно, что экстремальные осадки, связанные с длинными периодами, стали обеспечивать существенно большую часть суммарного количества годовых осадков за последние 60 лет. Положительные тренды составляют от 2–3 до более 5% в десятилетие для разных регионов. Это соответствует реальному увеличению интенсивности от 4 до 9 мм/сут за 60 лет. В то же время экстремальные осадки, связанные с короткими периодами, не показывают каких-либо существенных трендов. В частности, в центральной части Западной Европы можно лишь отметить уменьшение на 2–4% в десятилетие.

Наше исследование показало, что помимо увеличения общего количества осадков в Европе и увеличения интенсивности экстремальных осадков за последние 60 лет существенно изменилась их структура: произошла перегруппировка осадков из преимущественно одно- и двухсуточных в многосуточные. При этом экстремальные осадки, связанные с длительными периодами, становились все более интенсивными (на 12–18%), а связанные с короткими дождевыми периодами – менее интенсивными. Длина дождевых периодов является очень важной характеристикой изменчивости осадков, которая может помочь напрямую связать количество осадков и возникновение наводнений, в частности, проанализировать роль циклонов при возникновении наводнений в Европе. Вывод нашего исследования об увеличении продолжительности дождевых периодов косвенно свидетельствует, что перенос влаги среднеширотными циклонами играет более значительную роль в формировании осадков над Европейским континентом, чем изменение локальных температур [15]. Несомненно, интересным продолжением этого исследования может быть более детальный анализ связи продолжительности периодов с осадками с их интенсивностью в синоптическом масштабе.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант 08–05–00878-а), грантом Президента РФ для государственной поддержки молодых ученых – кандидатов наук (МК-345.2009.5), контрактом с Министерством образования и науки РФ № 02.740.11.0019, а также гран-

том Правительства Российской Федерации для привлечения ведущих ученых в российские образовательные учреждения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zolina O., Kapala A., Simmer C., et al.* // *Global and Planet. Change.* 2004. V. 44. P. 129–161.
2. *Zolina O., Kapala A., Simmer C., et al.* // *J. Geophys. Res.* 2008. P. D06110-1–D06110-17.
3. *Groisman P.Ya., Knight R.W., Easterling D.R. et al.* // *J. Climate.* 2005. V. 18. P. 1326–1350.
4. *Киктев Д.Б., Секстон Д.М., Александер Л.В., Фолланд К.К.* // *Метеорология и гидрология.* 2002. № 11. С. 13–24.
5. *Klein Tank A.M.G., Koennen G.P.* // *J. Climate.* 2003. V. 16. P. 3665–3680.
6. *Moberg A., Jones P.D., Lister D.H., et al.* // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. At. D22106.
7. *Zolina O., Simmer C., Belyaev K.M., et al.* // *J. Hydrometeorol.* 2009. V. 10. P. 701–716.
8. *Шмакин А.Б., Попова В.В.* // *Изв. РАН. ФАО.* 2006. Т. 42. № 2. С. 157–166.
9. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 1. Изменения климата. М.: Росгидромет, 2008.
10. *Kunkel K.E., Andsager K., Easterling D.R.* // *J. Climate.* 1999. V. 12. P. 2515–2527.
11. *Kunkel K.E., Easterling D.R., Redmond K., et al.* // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. P. CLM51–SLM54.
12. *Klok E.J., Klein Tank A.M.G.* // *Intern. J. Climatol.* 2009. V. 29. P. 182–191.
13. *Zolina O., Simmer C., Kapala A., et al.* // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32.
14. *Meyer V., Haase D., Scheuer S.* // *Integrat. Environ. Assessment and Management.* 2009. V. 5. № 1. P. 17–26.
15. *Trenberth K.E., Dai A., Rasmussen R.M., et al.* // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2003. V. 84. P. 1205–1217.