

А. А. Павловский

ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И ПОВТОРЯЕМОСТЬ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГИДРОТЕРМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

Засуха – одно из наиболее опасных для общества бедствий, имеющих метеорологическое происхождение. Проблема засух посвящено большое количество исследований, проведенных в разные годы, но она продолжает привлекать пристальное внимание и в настоящее время. Однако в дополнение к задачам составления каталогов засух и определения границ их распространения применительно к условиям конкретного года в последние десятилетия все большее значение стала приобретать задача прогнозирования изменений повторяемости засух и степени их экстремальности в связи с современным глобальным потеплением.

К основным метеорологическим показателям, используемым при оценке засушливости, относятся количество осадков, температура воздуха (или их аномалии по отношению к нормам), испаряемость, число суховейных дней и показатели радиационного и теплового балансов.

Главным агрономическим показателем засухи является величина снижения продуктивности различных видов и сортов сельскохозяйственных культур, возделываемых при заданном фоне агротехники и при учете особенностей сельскохозяйственных полей. Что же касается агрометеорологических показателей, они учитывают динамику физических показателей приземного слоя воздуха и корнеобитаемого слоя почвы, а также временной ход биологических показателей роста, развития и увеличения фитомассы растений. Из большого количества агрометеорологических показателей в исследованиях российских ученых при анализе засушливых явлений наиболее широко используется гидротермический коэффициент (ГТК), вычисляемый по формуле

$$\text{ГТК} = \Sigma P(T > 10^\circ\text{C}) / \Sigma T(T > 10^\circ\text{C}),$$

где ΣP и ΣT – суммы атмосферных осадков и температур воздуха за период года, когда температура превышает 10°C . Обычно ГТК рассчитывается в целом за вегетационный сезон конкретного года. Применительно к климатическим условиям зерносеющей территории России, если в вегетационный сезон года значение ГТК < 1 , этот год следует считать засушливым; при значениях ГТК $< 0,4$ считается, что данный год был сильно засушливым. Другим также весьма распространенным в работах российских авторов показателем засушливости является индекс S , вычисляемый по формуле [1]

$$S = \Delta P / \sigma_P + \Delta W / \sigma_W - \Delta T / \sigma_T,$$

в которой ΔP , ΔW и ΔT – средние месячные аномалии атмосферных осадков, количества почвенной влаги и температуры воздуха; σ_P , σ_W и σ_T – средние квадратические их отклонения.

В зависимости от целей исследования можно предложить несколько методик анализа повторяемости засушливых явлений. При этом следует принимать во внимание следующее. Наиболее полной и в принципиальном смысле точнее была бы методика, базирующаяся на полностью достоверном и детальном прогнозе изменений климата в конкретном регионе сельскохозяйственного производства и полностью адекватной динамической модели продуктивности конкретной культуры. Конечными результатами расчетов по такой методике стали бы абсолютно точная оценка урожайности заданной культуры и величина допускаемых потерь от не полностью благоприятных в этот год внешних факторов.

Следует признать, что в настоящее время практически обоснованной может быть лишь компилятивная методика оценки изменений агроклиматических показателей при ожидаемом в XXI столетии глобальном потеплении. Это относится как к расчету изменений средних величин агроклиматических характеристик, так и к оценкам экстремальных агроклиматических явлений, например засухам. Важнейшим звеном таких компилятивных эмпирических методик должен быть анализ фактической информации о динамике урожайности сельскохозяйственных культур и влияющих на нее метеорологических факторов, прежде всего температуры и осадков.

Задаваясь целью разработать практическую методику анализа засушливых явлений, пригодную для оценок их повторяемости при ожидаемых изменениях климата, следует принимать во внимание, что засухи, как и годы с особо высокими урожаями, являются аномальными явлениями. Расширение понятия «аномальный год» и включение в него и годов с особо высокой урожайностью позволяют более правильно сформулировать задачу об оценке повторяемости подобных явлений при глобальном потеплении. Для выявления годов аномальной урожайности, включающих как годы ее падения (не только из-за засух), так и годы положительных аномалий, может быть применена методика, базирующаяся на выделении детерминированной компоненты урожайности – ее временного тренда, вызванного в первую очередь экономическими факторами. При разработке методики анализа аномальных агроклиматических явлений необходимо ориентироваться на конкретную сельскохозяйственную культуру и ме-

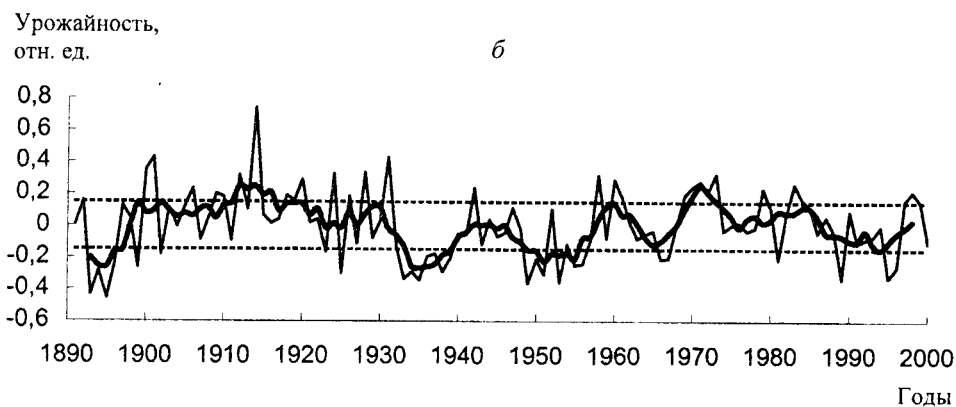
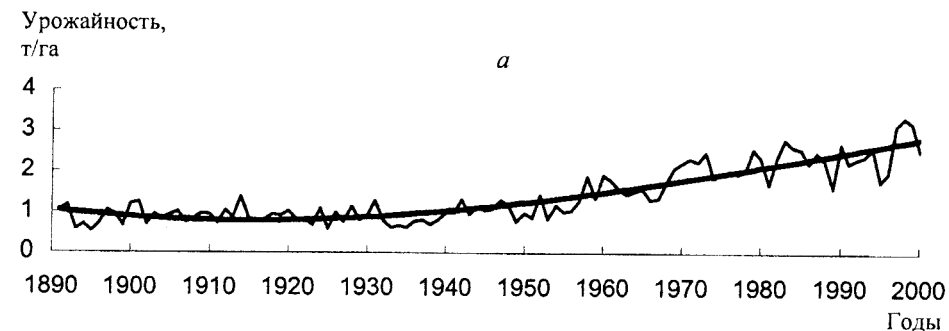


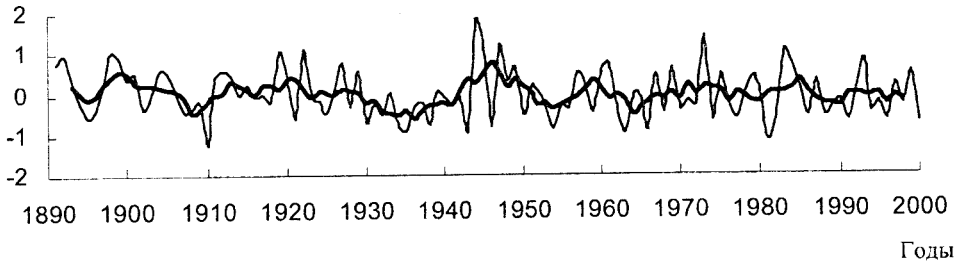
Рис. 1. Межгодовые изменения (тонкие линии) и сглаженные значения (утолщенные) показателей
а – урожайность (т/га); б – относительные отклонения урожайности;

теорологическую информацию. К сожалению, в настоящее время использование данных о многолетней динамике урожайности сельскохозяйственных культур в России затруднено. Поэтому, излагая методику, будем пользоваться информацией об урожайности пшеницы в главных зернопроизводящих штатах США, которая была получена из архивов Министерства сельского хозяйства США (<http://www.usda.gov/nass>).

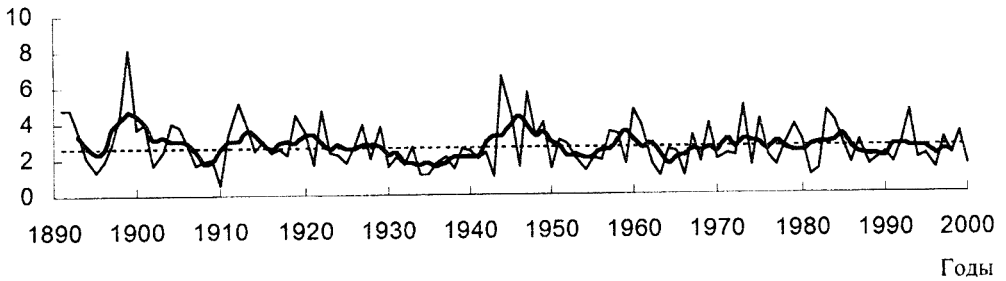
Рост урожайности сельскохозяйственных культур, называемый «зеленой революцией», начавшийся в развитых странах в середине XX в. и продолжающийся в настоящее время, вызван главным образом факторами совершенствования агротехнологий. Применяя все более интенсивные методы возделывания сельскохозяйственных культур, развитые, а за ними и развивающиеся страны существенно повысили урожаи всех культур. Известно, что основными факторами повышения урожаев являются рост использования удобрений, механизация и энерговооруженность сельского хозяйства, внедрение высокоурожайных сортов и культур, чувствительных к удобрениям и оптимальной агротехнике. Поэтому в принципиальном смысле было бы наиболее оправданным при вычислении параметров временных трендов урожайности пользоваться информацией о таких агротехнологических факторах [2]. К сожалению, эту методику расчета экономических трендов не всегда легко реализовать. Основная сложность состоит в том, что информация о динамике экономических факторов сельскохозяйственного производства главным образом недоступна. К тому же расчеты удельных значений экономических факторов требуют дополнительного привлечения данных о площадях возделывания культур и долях использования удобрений под каждой из них, о необрунных площадях и другой малодоступной информации. Помимо этого процедура расчета такого многопараметрического экономического тренда является более сложной, чем априорного малопараметрического. Дополнительно к сказанному, следует упомянуть и о том, что для относительно малых по площади территорий внутри крупных стран требуемая для расчетов по данной методике информация просто отсутствует. Потому такой метод анализа экономических трендов урожайности используется редко; исследователи ограничиваются выделением гладких трендов с помощью априорно задаваемых гладких малопараметрических функций от времени.

На рис. 1, а приведены фактические данные об урожайности пшеницы в штате Канзас и ее малопараметрический экономический тренд. Динамику изменения относительных аномалий урожайности в конкретный год от зна-

Индекс засушливости,
отн. ед.



Коэффициент,
мм/°С



урожайности озимой пшеницы и агрометеорологических факторов в штате Канзас (США).
в – индекс засушливости S ; г – гидротермический коэффициент.

чения экономического тренда $\eta_i = (Y_i - Y_i^r)/Y_i^r$, а также динамику скользящих 5-летних средних значений относительных аномалий урожайности иллюстрирует рис. 1, б.

При построении эмпирико-статистической методики анализа повторяемости аномальных явлений можно воспользоваться данными о динамике как ГТК, так и индекса Педя. Это объясняется достаточно надежной корреляцией их между собой. Для выбранного штата США – Канзас – корреляция между S и ГТК превышает 0,9 (рис. 2). Коэффициенты корреляции этих показателей с относительными аномалиями урожайности пшеницы, хотя и не столь высоки, но статистически значимы на 99%-м уровне. Очевидное влияние таких агроклиматических показателей на урожайность можно отметить, анализируя характерные черты их временной динамики (рис. 1, в, г) и сравнивая их с особенностями динамики относительных аномалий урожайности. Утолщенной кривой на этих графиках показан временной ход средних пятилетних скользящих значений этих индексов, вычисленный по данным метеорологических наблюдений на станции Канзас-сити.

Как было показано в начале статьи, динамика относительных аномалий урожайности сельскохозяйственных культур – надежный и удобный показатель потерь урожаев сельскохозяйственных культур, в первую очередь связанных с неблагоприятными погодно-климатическими условиями. Потому необходимо использовать такие данные при анализе аномальных в сельскохозяйственном отношении условий, имевших место в различных географических регионах и странах мира в последние десятилетия, который даст возможность выявить характерные тренды их изменений, когда глобальное потепление стало заметно проявляться в изменениях региональных климатов. С этой целью были обработаны данные, содержащиеся в архивах Международной организации по пищевым ресурсам и сельскому хозяйству (FAO) об урожайности пшеницы в различных странах Европы за последние 40 лет.

Для исследователя особенный интерес представлял анализ данных об урожайности пшеницы в небольших по площади регионах по той причине, что значения урожайности культуры по большим территориям менее информативны в силу значительного осреднения и взаимной компенсации потерь урожаев при отрицательных аномалиях (засухи) в одной части региона и, наоборот, превышающих норму в другой. Заметим, что в расчетах экономические тренды урожайности во всех странах представлялись линейно зависящими от времени. Анализ показал, что

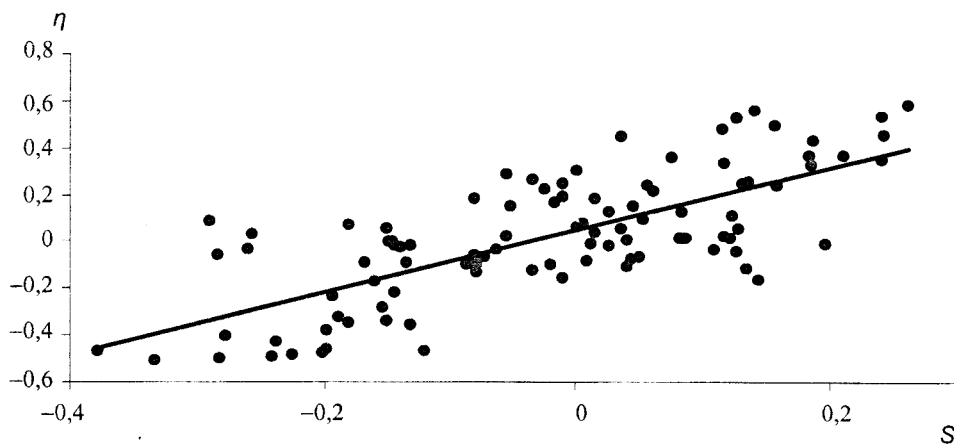


Рис. 2. Зависимость (прямая линия) между 11-летними скользящими значениями индекса сухости и аномалий относительной урожайности для штата Канзас (США).

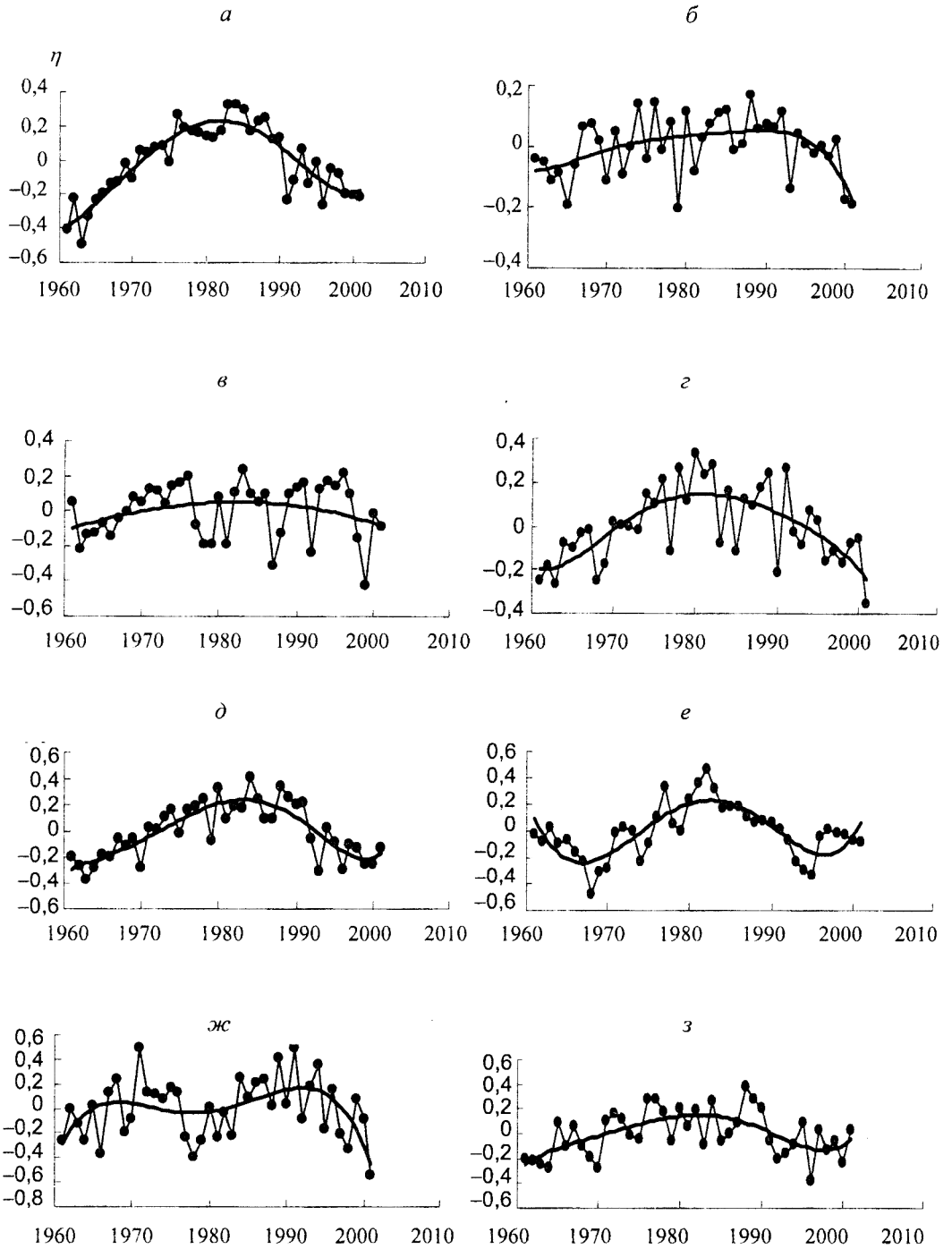
это предположение вполне оправдано в силу того, что в таких расчетах использовались относительно короткие ряды урожайности, когда нелинейные эффекты в трендах выражены незначительно.

Тренды показателя η в 1960–2001 гг. в некоторых странах Европы показаны на рис. 3. Из анализа рассчитанных трендов можно сделать интересный вывод о том, что 20-летний период – с начала 1970-х и до начала 1990-х годов – для таких стран как Албания, Греция, Венгрия, Мальта, Польша, Австрия, Румыния был благоприятным и характеризовался в среднем положительными отклонениями урожайности от экономического тренда. В этот период в указанных странах засушливые годы, когда потеря урожайности была больше 15%, практически отсутствовали. Исключения составили лишь пять лет: 1979 г. – для Австрии, 1991 г. – для Албании, 1993 г. – для Венгрии, 1990 г. – для Греции, 1974 г. – для Мальты. Помимо указанной особенности характерной чертой изменений относительных аномалий урожайности являются также их отрицательные тренды после середины 1990-х годов как в этих странах, так и в большинстве других стран Европы (см., например, рис. 3, ж).

Выше было показано, что показатель относительной аномальности является достаточно надежным интегральным индикатором повторяемости аномальных явлений при производстве сельскохозяйственных культур, учитывающим как отрицательные аномалии урожайности, вызванные в первую очередь засухами, так и положительные, когда значения урожайности существенно выше трендовых. Каждый регион сельскохозяйственного производства в зависимости от агроклиматического режима может быть оценен величиной средней многолетней амплитуды отклонений урожайности от экономического тренда, которая характеризует данный регион по показателю устойчивости его климатических условий. Величина η зависит прежде всего от средней многолетней увлажненности региона и соответствия его термического режима физиологическим требованиям конкретной культуры. Как уже выше отмечалось, его можно оценить, используя корреляционную зависимость от одного из комплексных агроклиматических индексов S или ГТК.

Основной целью данного исследования было получение оценок изменений повторяемости экстремальных условий в регионах сельскохозяйственного производства, которое может произойти при ожидаемых изменениях глобального климата. Чтобы получить более надежное представление об ожидаемых изменениях повторяемости экстремальных явлений в различных регионах, важно представить себе картину территориального распределения показателя аномальности, соответствующую «невозмущенному» климатическому режиму, т. е. естественным условиям, которые имели место до того, как начало проявляться современное глобальное потепление. Можно предположить, что до середины 1980-х годов это проявление было незначительным, поэтому оценки, полученные для многолетних средних значений индекса аномальности урожайности, рассчитанные с использованием данных об урожае за предыдущие годы, могут характеризовать «невозмущенный» антропогенными факторами климат. В свое время подобная разработка была выполнена, и были рассчитаны территориальные распределения индекса аномальности урожайности в регионах бывшего СССР и Северной Америки [3].

Исходя из выявленной связи между показателем аномальности урожайности пшеницы и агроклиматическими индексами, при расчете которых используются поддающиеся прогнозированию климатические параметры, прежде всего температура и осадки, можно попробовать предсказать изменения этого индекса в будущем и получить оценки возможных изменений количества засушливых явлений в будущем. Понятно, что такие оценки будут раз-



Годы

Рис. 3. Динамика аномалий относительной урожайности пшеницы (ломаные линии) и их сглаженные тренды (гладкие линии) в некоторых странах Европы.

a – Албания; *б* – Австрия; *в* – Финляндия; *г* – Греция; *д* – Венгрия; *е* – Мальта; *ж* – Португалия; *з* – Румыния.

Изменения урожайности пшеницы (% от нормы за 1975–1985 гг.) и межгодовой изменчивости урожаев (%) согласно палеоклиматическим сценариям изменений климата при глобальном потеплении к 2015 и 2050 гг.

Регион	2015 г.		2050 г.	
	Урожайность	Изменчивость	Урожайность	Изменчивость
Штаты США				
Северная Дакота	-1	+20	+35	-20
Южная Дакота	-4	+22	+31	-19
Небраска	-5	+18	+29	-24
Колорадо	0	+3	+25	-22
Канзас	0	+8	+24	-15
Оклахома	+4	+1	+21	-11
Миннесота	0	+14	+32	-16
Айова	-1	+16	+27	-15
Миссури	+1	+8	+19	-12
Иллинойс	0	+10	+24	-13
Мичиган	+2	+11	+23	-9
Огайо	+1	+8	+21	-8
Регионы России				
Ленинградская обл.	+19	0	+36	-20
Воронежская обл.	+7	+5	+26	-21
Тульская обл.	+8	+5	+29	-17
Липецкая обл.	+7	+4	+31	-19
Белгородская обл.	+8	+4	+31	-18
Краснодарский край	+17	-17	+31	-31
Волгоградская обл.	+12	-18	+52	-35
Нижегородская обл.	+8	-8	+35	-24
Республика Татарстан	+8	-7	+38	-25
Оренбургская обл.	+17	-18	+58	-37
Челябинская обл.	+13	-13	+42	-35
Алтайский край	+14	-19	+44	-28
Страны Европы				
Польша	+14	+4	+35	-22
Испания	+6	-2	+22	-25
Франция	+9	-3	+28	-12
Германия	+7	+2	+23	-17
Италия	+4	-5	+16	-20
Румыния	+10	-5	+31	-23
Болгария	+12	-8	+28	-20
Великобритания	+17	0	+21	-5
Венгрия	+3	-3	+16	-20
Украина	+5	-5	+20	-24
Балтия	+16	+3	+32	-24
Дания	+16	+3	+26	-11

личаться при применении разных сценариев изменений климата. Потому важно определиться с тем, какой из сценариев использовать в расчетах. Исследования последних лет предоставляют для этого три возможности. Первая – обратиться к сценариям, базирующимся на расчетах по моделям общей циркуляции глобальной атмосферы и океана. Однако выбрать ту из моделей, которая обеспечивает наиболее адекватное восстановление современного климата, практически невозможно. Результаты расчетов по рекомендованным, например, IPCC моделям не могут в

полной мере удовлетворить данному требованию, в особенности при восстановлении режима атмосферных осадков [4]. Вторая возможность – это воспользоваться сценариями изменений климатических параметров, получаемыми при экстраполяции их современных трендов. В силу слабой научной обоснованности прогнозы, базирующиеся на подобных предположениях, трудно считать надежными. И, наконец, при прогнозировании можно воспользоваться палеоклиматическими сценариями для оценки ожидаемых изменений климата. Трудно сказать, что именно они являются наиболее обоснованными, однако здесь мы воспользуемся именно ими [5].

К сожалению, палеоклиматические сценарии ожидаемых изменений климата в принципиальном смысле не могут обеспечить желаемое для наших оценок временное разрешение, например месячное для температуры и осадков, с тем, чтобы рассчитать значения агроклиматических параметров в вегетационный период. По этой причине методика расчета изменений средней величины показателя аномальности урожайности по данным об изменениях климатических характеристик была модифицирована так, чтобы в качестве единственного прогностического критерия в ней выступали изменения годовых норм атмосферных осадков.

В таблице представлены результаты расчетов изменений средних значений показателя межгодовой изменчивости (аномальности) урожаев пшеницы в некоторых регионах России, странах Европы и штатах США при изменениях климата к 2015 и 2050 гг., согласно палеоаналоговым сценариям оптимумов голоцена и плейстоцена, соответствующим глобальному потеплению на 1 и 3–4 °С. В ней приведены также данные расчетов изменений климатической нормы продуктивности пшеницы, полученные при использовании модели продуктивности, учитывающей влияние на продуктивность температуры, атмосферных осадков и повышения концентрации углекислого газа к 2015 и 2050 гг. соответственно [6]. Поясним, что в приведенной таблице положительные значения изменений нормы продуктивности характеризуют прирост потенциальной урожайности пшеницы (изменения в благоприятную сторону), положительные значения изменений показателя аномальности указывают на возможное увеличение амплитуды межгодовых колебаний урожайности (неблагоприятные изменения).

Комментируя оценки, приведенные в таблице, можно заметить, что в период глобального потепления до 2010 г. в регионах США возможно учащение аномальных в сельскохозяйственном отношении лет, которое объясняется особенностью выбранного сценария. При этом и оценки прироста нормы продуктивности применительно к зоне зернопроизводства в США меньше, чем в России и странах Европы. На фоне более крупного глобального потепления к середине XXI в. такой эффект пропадает, так как, согласно сценарию оптимума плейстоцена, количество осадков в сельскохозяйственных регионах США, России и Европы должно существенно возрасти.

Summary

Pavlovsky A. A. The climate changes and recurrence of extreme hydrothermal events.

Modern anthropogenic global warming, which has already begun to manifest itself in many of the geographical regions, is the main factor for the occurrence of droughts causing low crop yields in some countries. In the past few decades we observed uniformity in the occurrence of droughts and crop productivity in major wheat-producing regions of the world. In general, in the regions of the moderate latitudes of the Northern Hemisphere, a global warming exceeding 1°C will be favorable for obtaining higher and stable agricultural production. This should promote the planting of more productive thermophilic crops in the northern areas and more hydrophilic cultivars in current arid zones. Considering the perspective of future research in this field, it is necessary to notice that the weakest and the most complex component of such research is the development of the reliable forecasts of regional climate changes. Although recent research work on predicting climate change has made great advances at the global scale, predictions of regional climate change are still unreliable. While there are considerable improvements in the reliability of predictions of regional climate change, we cannot expect to see much progress in forecasting agroclimatology and long-term drought prediction.

Литература

1. Педь Д. А. О показателе засухи и избыточного увлажнения // Труды Гидрометцентра СССР. 1975. Вып. 156.
2. Менжулин Г. В., Николаев М. В., Савватеев С. П. Оценки экономической и погодных составляющих урожайности зерновых культур // Труды Гос. гидролог. ин-та. 1983. Вып. 280.
3. Менжулин Г. В., Коваль Л. А., Николаев М. В., Савватеев С. П. Агроклиматические последствия современных изменений климата. Сценарий для Северной Америки // Труды Гос. гидролог. ин-та. 1987. Вып. 327.
4. Менжулин Г. В., Савватеев С. П., Шамшурин В. И., Петерсон Г. Н. Анализ показателей текущих изменений климата и оценки адекватности сценариев глобального потепления, рекомендуемых межправительственной комиссией ООН для расчета его последствий // Стокгольм-Рио-Йоганнесбург. Вехи кризиса / Отв. ред. В. И. Данилов-Данильян, Ф. Т. Яншина. М., 2004.
5. Budyko M. I., Borzenkova I. I., Menzhulin G. V., Shiklomanov I. A. Cambios Antropogenicos del Clima en America // Ser. de la Academia Nacional de Agronomia y Veterinaria. 1994. N 19.
6. Menzhulin G. V. Global warming, carbon dioxide increase and the prospects of crop potential: The Assessments for Russia using alternative climate change scenarios // Food production and environmental improvement under climate change: Spec. Issue of the J. Agricultural Meteorology of Japan. 1997. Vol. 52, N 5.

Статья поступила в редакцию 15 марта 2006 г.