

ГЛАВА 5

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ПРОДУКТИВНОСТЬ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

О. Д. Сиротенко, В. Н. Павлова

Климат существенно влияет на формирование урожая сельскохозяйственных культур. Он в значительной мере определяет средний уровень урожайности, ее межгодовую изменчивость и пространственную структуру национального и мирового сельскохозяйственного производства. Как повлияют изменения климата и увеличение содержания CO₂ в атмосфере на сельское хозяйство? Существует множество версий: ускорится развитие растений, изменятся урожайность и стабильность производства продуктов питания, расширятся (сократятся) посевные площади, изменятся набор сельскохозяйственных культур и специализация сельского хозяйства, трансформируется агротехника, изменится эффективность орошения и средств химизации.

В идеале необходимо знать сумму всех этих факторов. Постановка конкретных задач этого круга зависит от определения основного направления воздействия климата и его изменений на сельское хозяйство. При анализе системы климат — сельское хозяйство выделяются два аспекта (Болин и др., 1989): климат как природный ресурс и климат как риск для производителей продукции. В соответствии с этим сформировались два направления исследований: одно из них связано с оценкой влияния медленных изменений средних значений климатических параметров, второе — с оценкой влияния изменений повторяемости климатических экстремумов — существенного источника рисков для сельского хозяйства.

Известно, что долговременные изменения температуры или осадков менее важны для

сельского хозяйства, чем такие экстремальные явления, как засухи, сильные морозы, переувлажнение почвы, пыльные бури. Воздействие этих относительно редких явлений на урожай приводит к экономическому стрессу, который ускоряет адаптацию сельского хозяйства к изменениям климата. Концепции “медленных изменений” и “изменений риска” не исключают, а дополняют друг друга при решении задачи идентификации новых, обусловленных изменениями климата, функций распределения урожайности.

На рис. 5.1 приведена диаграмма прямых и обратных связей в системе климат — сельское хозяйство, учет которых представляется необходимым для адекватной оценки влияния изменений климата на производство продовольствия. Как видно на этом рисунке, уменьшение урожаев ведет к уменьшению поступления в почву органических веществ в виде корневых и пожнивных остатков и, следовательно, содействует дальнейшему уменьшению продуктивности агроэкосистем, изменениям видового и сортового состава возделываемых культур. Уменьшение урожаев ведет к адаптации технологии производства: уменьшает объем производства, сокращает запасы продукции и приводит к повышению цен. Вместе с тем повышение цен стимулирует увеличение посевных площадей, приводит к изменениям географического распределения посевов, увеличению объемов капиталовложений. Политико-экономический аспект взаимодействия климата и сельского хозяйства в

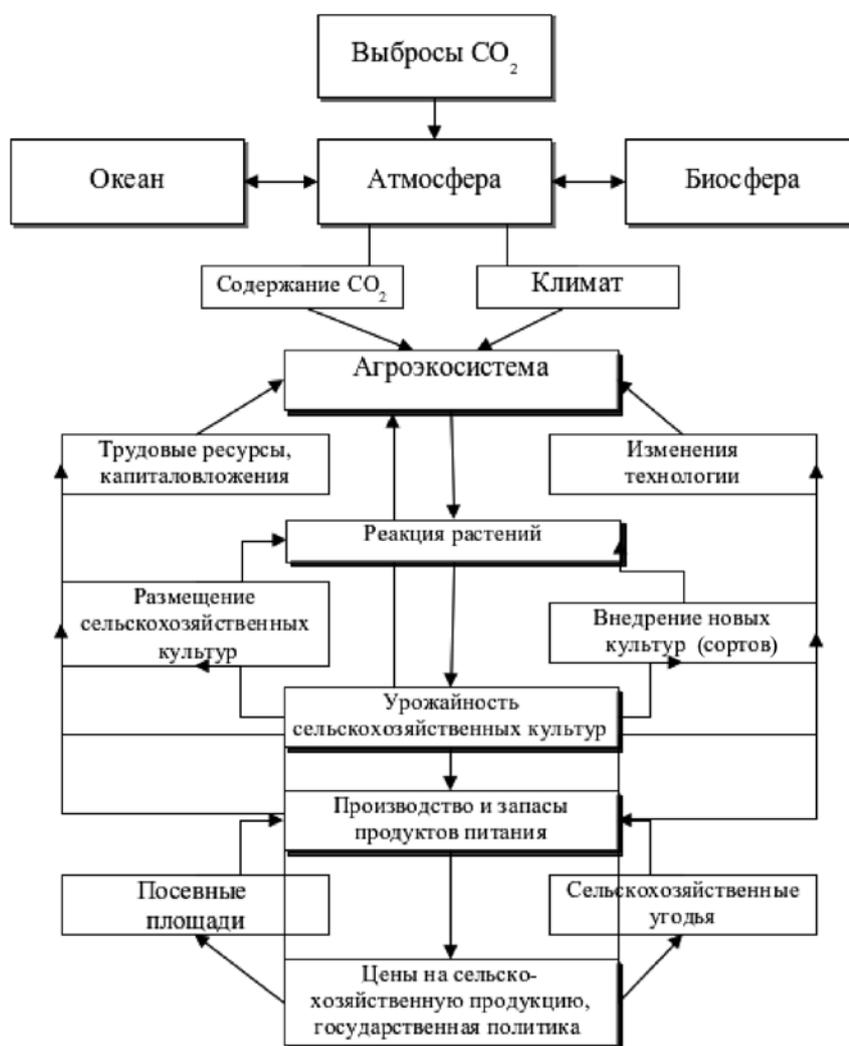


Рис. 5.1. Важнейшие прямые и обратные связи, определяющие изменения продуктивности растениеводства при изменении климата.

конечном итоге является определяющим для понимания долговременного влияния глобальных изменений климата на производство продуктов питания и обеспечение продовольственной безопасности.

Представим основные обобщающие монографические публикации по проблеме оценки влияния изменений климата на сельское хозяйство: Болин и др., 1989; Parry, 1990; Предстоящие изменения климата..., 1991; Глобальные проявления изменений климата..., 2004; Гордеев и др., 2006; Оценочный доклад..., 2008; Глобальные изменения климата..., 2009,

а также основные работы, посвященные методическим вопросам: Lobell, Field, 2007; Сиротенко, 2007; Сиротенко, Павлова, 2010а.

ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЙ АГРОКЛИМАТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

Термические ресурсы

Сведения о термических (тепловых) ресурсах вегетационного периода растений необходимы для решения разнообразных задач

Глава 5. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства

сельскохозяйственного производства: определения сроков сева и созревания, оптимизации сортового и видового состава возделываемых сельскохозяйственных культур, оценки вероятности повреждения растений высокой и низкой температурой и т. д.

Доступные для растений термические ресурсы определяются годовым ходом температуры воздуха и почвы. Наблюдаемое в настоящее время потепление климата не сводится к простому смещению вверх кривой годового хода среднесуточной температуры воздуха. Современное потепление, помимо повышения средней температуры, сопровождается изменениями ее годовой и суточной амплитуды, что может иметь как положительные, так и отрицательные последствия. Так, увеличение продолжительности безморозного периода безусловно положительный фактор, но сокращение периода налива зерна и более раннее созревание при повышении температуры часто ведет к уменьшению урожая. Для адекватной оценки влияния изменений климата на термические ресурсы нельзя ограничиться каким-либо одним показателем. Необходимо использовать возможно более широкий набор показателей — климатических индексов — для оценки термических ресурсов, применяемых в агроклиматологии. Важнейшими из них являются следующие:

— суммы среднесуточных значений температуры воздуха за период календарного года со среднесуточной температурой, превышающей 0, 5 и 10°C;

— даты устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 0, 5 и 10°C весной и осенью;

— продолжительность периодов календарного года со среднесуточной температурой, превышающей 0, 5 и 10°C, а также периодов со среднесуточной температурой от 5 до 15°C (климатическая весна) и от 15 до 5°C (климатическая осень);

— средняя температура самого холодного и самого теплого месяцев календарного года.

Рассмотрим значения прикладных климатических индексов на протяжении современной волны глобального потепления, за начало которой часто принимают 1970-е годы. С этого момента продолжительность периода с температурой выше 5°C на территории Ростовской области, например, увеличилась на 7—11 сут, а средняя температура января повысилась на 1,3—2,1°C (табл. 5.1). При этом сумма среднесуточных температур, превышающих 10°C, с 1970 г. практически не изменилась. Не изменилась и средняя температура июля за этот период.

Трансформация годового хода температуры воздуха за последние десятилетия наглядно представлена на рис. 5.2. Вследствие

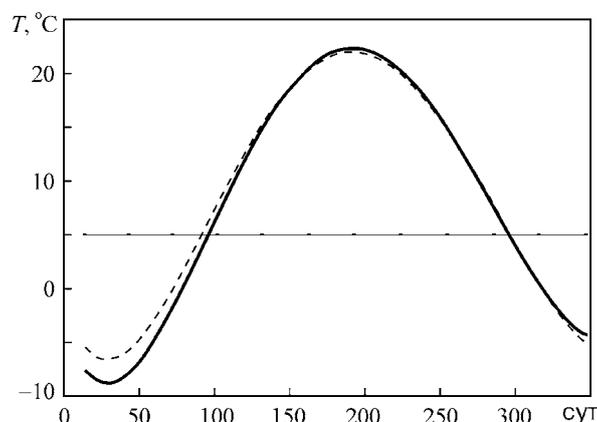


Рис. 5.2. Годовой ход среднесуточной температуры воздуха двух 20-летних периодов, заканчивающихся в 1970 г. (сплошная линия) и в 2003 г. (штрихпунктир).

Глава 5. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства

Таблица 5.1. Изменения показателей термического режима территории Ростовской области за 1950—2003 гг. Приведены средние значения за двадцатилетие, предшествующее указанному году

Гидрометеорологическая станция	Год				
	1970	1980	1990	2000	2003
Продолжительность календарного периода со среднесуточной температурой воздуха, превышающей 5°C, сут					
Чертково	203	205	205	210	213
Ремонтное	215	220	220	223	226
Таганрог	221	225	225	226	228
Сумма среднесуточных значений температуры воздуха за период календарного года со среднесуточной температурой, превышающей 10°C					
Чертково	2970	2937	2937	2995	2985
Ремонтное	3409	3396	3392	3442	3435
Таганрог	3466	3462	3447	3488	3493
Средняя температура января, °C					
Чертково	-7,6	-8,7	-7,3	-5,6	-5,5
Ремонтное	-5,3	-6,9	-5,7	-3,5	-3,5
Таганрог	-4,1	-5,4	-4,2	-2,8	-2,8
Средняя температура июля, °C					
Чертково	21,8	21,3	21,0	21,5	21,9
Ремонтное	24,2	23,8	23,6	24,0	24,2
Таганрог	23,7	23,3	23,0	23,5	23,8

повышения температуры первых четырех месяцев года восходящая ветвь кривой заметно смещена вверх, тогда как нисходящая ветвь кривой годового хода практически осталась без изменений. В результате этого особенно сильно увеличивается продолжительность периода календарного года со среднесуточной температурой, превышающей 0°C, и в меньшей степени — продолжительность периодов со среднесуточной температурой, превышающей 5 и 10°C, а продолжительность периода с температурой, превышающей 15°C, остается практически без изменений.

Обратимся к наблюдаемым агрометеорологическим изменениям условий холодного периода года на примере Ростовской области (табл. 5.2), при этом были использованы данные гидрометеорологической станции Чертково.

Приведенные в табл. 5.2 значения средних оценок математического ожидания M случайной величины x и среднеквадратических от-

клонений σ полностью определяют положение и форму соответствующих скользящих кривых распределения в рамках предположения о нормальности закона распределения. Изменение M сдвигает кривую распределения следующим образом: вправо — при увеличении M , влево — при уменьшении M . Изменение среднеквадратического отклонения деформирует кривую распределения — делает ее более плоской при увеличении σ и более островершинной при уменьшении σ . При этом могут возникать интересные эффекты. Например, при повышении средней температуры января вероятность вымерзания озимых культур может увеличиться, если одновременно увеличится изменчивость (дисперсия) средней температуры этого месяца.

Оценим по данным табл. 5.2 изменения повторяемости мягких зим, благоприятных для перезимовки сельскохозяйственных культур. Мягкой называется зима, для которой средняя температура самого холодного месяца не ниже

Глава 5. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства

Таблица 5.2. Изменение агроклиматических показателей скользящих двадцатилетних периодов (гидрометстанция Чертково, Ростовская область)

Последний год периода	Продолжительность периода со среднесуточной температурой, превосходящей 5°C, сут			Средняя температура января, °C		
	<i>M</i>	σ	$p(x > 213)$	<i>M</i>	σ	$p(x > -5^\circ\text{C})$
1950	199	10,54	0,095	-9,1	4,42	0,177
1960	197	7,78	0,023	-8,0	4,52	0,216
1970	203	11,65	0,200	-7,6	3,39	0,223
1975	204	11,55	0,240	-7,8	3,67	0,226
1980	205	12,68	0,282	-8,7	3,54	0,148
1990	205	13,16	0,286	-7,3	4,15	0,290
2000	210	11,93	0,430	-5,6	3,24	0,429
2003	213	12,47	0,500	-5,5	3,34	0,438

Примечание. *M* — оценка математического ожидания случайной величины x ; σ — оценка среднеквадратического отклонения; p — символ вероятности.

-5°C (Шашко, 1985). Из данных табл. 5.2 следует, что 20-летние средние температуры января устойчиво повышались с -9,1°C в 1950 г. до -5,5°C в 2003 г. Это подтверждается хорошо известным фактом — глобальное потепление в умеренных широтах проявляется прежде всего в повышении температуры холодного периода года. Отметим тенденцию к уменьшению межгодовой изменчивости январских температур, среднеквадратическое отклонение которых за рассматриваемый период уменьшилось с 4,4 до 3,3°C, т. е. более чем на 1°C. В результате изменения параметров *M* и σ распределения январских температур повторяемость (т. е. вероятность $\times 100\%$) мягких зим увеличилась с 18% в 1950 г. до 44% в 2003 г. Увеличение повторяемости мягких зим в 2,5 раза с середины прошлого века по настоящее время безусловно оказало существенное позитивное влияние на сельское хозяйство.

Оценим теперь изменение продолжительности периода календарного года со среднесуточной температурой выше 5°C, эта величина является расчетной оценкой продолжительности вегетационного периода. За вторую половину XX в. средняя продолжительность указанно-

го периода увеличилась на две недели (с 199 до 213 дней), что не связано с повышением июльских температур. Увеличение продолжительности теплого периода года обусловлено уменьшением степени континентальности климата, в результате чего кривая годового хода температуры воздуха стала более плоской и удлинился период между датами перехода температуры через 5°C весной и осенью. Наблюдаемая тенденция изменения обеспеченности также подтверждает вывод об устойчивом увеличении продолжительности периода вегетации сельскохозяйственных культур. Действительно, если современная (равная в среднем 213 дням) продолжительность вегетационного периода в 1950—1960-е годы наблюдалась менее раза за 10 лет, то с 1975 по 2003 г. этот показатель увеличился в два раза — с 24 до 50%.

В качестве важнейшей закономерности наблюдаемых изменений климата отметим уменьшение степени континентальности климата практически на всей территории России за исключением севера европейской части России и Калининградской области (табл. 5.3). Темпы уменьшения годовой амплитуды температуры воздуха на юге Поволжья превышают

Глава 5. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства

Таблица 5.3. Средние скорости изменения (тренды) термических ресурсов на территории России в 1975—2004 гг.

Регион	Тренды температурных показателей календарного года, °С/10 лет				Тренды продолжительности периодов календарного года с температурой в указанных пределах, сут/10 лет	
	Средняя температура		Годовая амплитуда среднемесячной температуры	Сумма средних суточных значений температуры, превышающих 10°С	> 10°С	5—15°С
	январь	июль				
Северный	0,69	0,79	0,10	55	0,8	–
Северо-Западный	1,13	0,95	–0,18	72	1,8	1,7
Калининградский	0,57	0,72	0,15	123	6,2	1,6
Центральный	1,15	0,90	–0,25	33	0,9	3,7
Волго-Вятский	1,01	0,84	–0,17	15	–1,3	1,7
Центрально-Черноземные области	1,32	1,05	–0,27	57	2,3	3,3
Поволжье, север	1,25	0,74	–0,51	28	0,7	3,8
Поволжье, юг	1,04	0,37	–0,67	–17	0,2	4,4
Северный Кавказ	0,74	0,60	–0,14	75	3,1	3,6
Уральский	0,64	0,45	–0,19	23	0,3	0,5
Западно-Сибирский	0,15	0,09	–0,06	77	3,7	–1,5
Восточно-Сибирский	0,85	0,57	–0,28	94	3,2	0,6
Дальневосточный	0,95	0,01	–0,94	43	3,9	–0,1

0,6°С за 10 лет, а связанное с уменьшением континентальности увеличение продолжительности климатической весны достигает 4,4 сут за каждые 10 лет. Понятно, что столь быстрые и кардинальные изменения характера годового хода температуры воздуха не могут не повлиять на сельскохозяйственную деятельность.

Континентальность климата содействует формированию зоны рискованного земледелия. Чем континентальней климат, тем больше температурные различия между зимой и летом, чем короче переходные сезоны — тем

меньше времени остается для сельскохозяйственных работ, многие из которых возможны лишь при незамерзшей почве.

Ресурсы влаги

Увлажненность территории определяется соотношением приходной и расходной составляющих водного баланса почв, т. е. соотношением суммы осадков и испарения. Ниже будет рассмотрен именно этот случай. Испарение достаточно сильно зависит от температуры и

Глава 5. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства

влажности воздуха, облачности, скорости ветра и других факторов.

Для характеристики увлажненности используется множество показателей в виде тех или иных функций от суммы осадков и максимально возможного испарения (т. е. испаряемости). Представим три таких показателя (индекс сухости Будыко (ИС), гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) и коэффициент увлажнения Сапожниковой (КУ)):

$$\begin{aligned} \text{ИС} &= \frac{0,18 \sum T_{>10^{\circ}\text{C}}}{r_{\text{I-XII}}}, \\ \text{ГТК} &= \frac{r_{\text{VI-VIII}}}{0,1 \sum T_{\text{VI-VIII}}}, \\ \text{КУ} &= \frac{0,5 r_{\text{X-III}} + r_{\text{IV-IX}}}{0,18 \sum T_{\text{IV-IX}}}. \end{aligned} \quad (5.1)$$

Здесь T — среднесуточная температура, $^{\circ}\text{C}$, а r — сумма осадков, мм. При вычислении ГТК и КУ при суммировании среднесуточных значений температуры T в нижнем индексе указан период года, за который производится суммирование. При расчете ИС в числителе при суммировании за календарный год используются лишь те значения среднесуточной температуры воздуха, которые превышают 10°C . В нижнем индексе при r указывается период календарного года, которому соответствует сумма осадков.

Показатели увлажненности ГТК и КУ представляют собой безразмерные величины (мм/мм), характеризующие отношение приходной части водного баланса — осадков — к максимально возможной величине его расходной части — испаряемости. При этом испаряемость оценивается как $0,1 \sum T_{\text{VI-VIII}}$ и $0,18 \sum T_{\text{IV-IX}}$ соответственно. Коэффициенты 0,1 и 0,18 в формулах (5.1) для вычисления ГТК и КУ — размерные (мм/ $^{\circ}\text{C}$).

Индекс сухости Будыко — также безразмерная величина — имеет противоположный смысл: это отношение испаряемости к годовой сумме осадков. Испаряемость при расчете ИС определяется по сумме среднесуточных значе-

ний температуры воздуха за период с температурой выше 10°C как $0,18 \sum T_{>10^{\circ}\text{C}}$, что представляется возможным благодаря тесной связи сумм температуры с энергетической характеристикой испаряемости — радиационным балансом. Коэффициент 0,18 в формуле для расчета ИС — размерный (мм/ $^{\circ}\text{C}$).

Индекс сухости — интегральный годовой показатель увлажненности, а коэффициенты увлажнения КУ и ГТК — специальные показатели, характеризующие влагообеспеченность агроэкосистем при естественном увлажнении. При этом КУ характеризует увлажненность почвы с учетом осадков холодного периода года, а ГТК — увлажненность теплого периода года.

Средние скорости изменения в 1975—2004 гг. показателей увлажнения (в расчете на 10-летний период) для регионов России приведены в табл. 5.4. Весной и осенью наблюдается практически повсеместное увеличение количества осадков, за исключением Северного и Северо-Западного регионов осенью и Центрального региона весной. Обращает на себя внимание значительное благоприятное для сельского хозяйства увеличение количества летних осадков на Северном Кавказе. Вместе с тем наблюдается уменьшение осадков на севере Поволжья и в центральных областях России.

Не вдаваясь в детальный анализ этой информации, имеющей существенное значение для развития сельского хозяйства России, отметим здесь следующее. Наблюдается значительное увеличение коэффициентов увлажнения (КУ и ГТК) на Северном Кавказе и — несколько меньшее — на Южном Урале и в Поволжье, т. е. в тех районах, где производится более половины товарного зерна России, отмечается определенное уменьшение аридности климата.

Вместе с тем следует отметить тенденцию к увеличению аридности климата в центральных районах европейской части России и, особенно, на юге Восточной Сибири.

Глава 5. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства

Таблица 5.4. Средние скорости изменения (тренды) показателей увлажнения территории России в 1975—2004 гг.

Регион	Сумма осадков, мм/10 лет				Коэффициенты увлажнения (ГТК, КУ) и индекс сухости Будько (ИС), ед./10 лет		
	зима	весна	лето	осень	ГТК	КУ	ИС
Северный	8,3	3,9	-3,6	-4,1	-0,093	-0,037	0,012
Северо-Западный	4,1	5,4	4,2	-2,0	-0,027	-0,009	0,012
Калининградский	3,8	2,0	2,9	6,0	-0,035	-0,035	0,005
Центральный	-1,6	-2,9	-5,4	7,1	-0,078	-0,043	0,009
Волго-Вятский	0,9	1,3	-6,8	-0,6	-0,090	-0,041	-0,005
Центрально-Черноземный	-6,8	2,0	-6,9	11,6	-0,079	-0,043	0,007
Поволжье, север	7,3	9,4	-7,2	8,4	-0,072	0,003	-0,034
Поволжье, юг	-2,4	4,4	3,2	9,4	0,008	0,020	-0,129
Северный Кавказ	-2,0	4,6	17,2	21,2	0,065	0,048	-0,054
Уральский	4,8	10,2	5,7	5,8	0,005	0,028	-0,043
Западно-Сибирский	6,9	2,7	3,2	3,4	0,007	-0,010	0,001
Восточно-Сибирский	1,9	0,9	7,5	5,0	0,005	-0,024	0,009
Дальневосточный	3,1	1,4	4,1	2,2	0,047	0,014	0,011

ОЦЕНКА БИОКЛИМАТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА И ПРОДУКТИВНОСТИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Биоклиматический потенциал

Биоклиматический потенциал (БКП) — расчетный показатель, характеризующий сельскохозяйственную продуктивность в условиях данного климата. Напомним, что продуктивность агроценоза — суммарная биомасса, синтезированная за вегетационный период. Ее размерность — [ед. массы/(ед. площади · ед. времени)].

Биоклиматический потенциал рассчитывается по следующей формуле:

$$\text{БКП} = K_p \frac{\sum T_{>10^\circ\text{C}}}{\sum T_{>10^\circ\text{C}, \text{ база}}}. \quad (5.2)$$

Здесь T — среднесуточная температура воздуха (причем суммирование ее значений за

календарный год производится лишь по тем суткам, когда она превышает 10°C); K_p — коэффициент биологической продуктивности климата, зависящий от влагообеспеченности. Обычно за базовые условия принимаются такие, где $\sum T_{>10^\circ\text{C}, \text{ база}} = 1000$. Это соответствует северной границе земледелия.

В качестве показателей влагообеспеченности используются отношение годовой суммы осадков к испаряемости за год (Шашко, 1985; Сиротенко, Павлова, 2010а), коэффициент увлажнения КУ (Сапожникова, 1979) и некоторые другие.

Для сельскохозяйственной проблематики адекватной и информативной представляется методология оценки БКП с помощью динамических моделей погоды — урожай (Сиротенко, 1991).

Согласно этой методике, значения первичной биологической продуктивности агроэкосистем рассчитываются для четырех уров-

Глава 5. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства

ней интенсивности земледелия: BKP_0 — для современного низкокзатратного земледелия; BKP_W — для условий оптимального увлажнения; BKP_N — для условий оптимального минерального питания; BKP_{WN} — для оптимальных увлажнения и минерального питания.

В современных условиях биоклиматический потенциал оценивается с помощью математических моделей. При использовании динамических моделей продуктивности агроценозов расчет значений биоклиматического потенциала начинается с даты перехода температуры воздуха через 5°C весной и продолжается до достижения посевом заданного стандартного состояния (листового индекса, равного 5). Затем посев в модели “скашивается”, после чего рост растений продолжается до достижения очередного стандартного состояния посева или понижения температуры воздуха ниже 5°C осенью. Суммарный урожай за год (выраженный сухой биомассой), рассчитанный имитационной моделью агроценоза, представляет собой искомую оценку биоклиматического потенциала.

Рассмотрим результаты расчета БКП для Брянской и Самарской областей, расположенных примерно на одних и тех же широтах, но совершенно разных по условиям увлажнения и уровню плодородия почв, а также для Краснодарского края, почвенно-климатические условия которого обычно принимались за эталонные для территории бывшего СССР. Оценки биоклиматического потенциала для четырех уровней интенсивности земледелия, а

также их приращения $\Delta_W = BKP_W - BKP_0$, $\Delta_N = BKP_N - BKP_0$ и $\Delta_{WN} = BKP_{WN} - BKP_0$ представлены в табл. 5.5.

Величина Δ_W характеризует увеличение БКП за счет возможной оптимизации водного режима посевов, Δ_N — за счет оптимизации режима минерального питания, а Δ_{WN} позволяет оценить эффективность оптимизации этих двух факторов в комплексе.

Согласно данным табл. 5.5, территория Краснодарского края характеризуется более высокими значениями всех четырех типов БКП, что представляется вполне закономерным. Брянская и Самарская области при близких значениях BKP_0 и BKP_{WN} существенно различаются по значению биоклиматического потенциала при оптимальном увлажнении и оптимальном минеральном питании. Разная структура составляющих БКП этих областей свидетельствует о том, что продуктивность сельскохозяйственных культур на территории Брянской области лимитируется уровнем плодородия почв, а Самарской области — условиями увлажнения.

Анализ распределения биоклиматического потенциала на территории России, стран ближнего зарубежья и Европейского союза представлен в монографии (Гордеев и др., 2006). Расчет БКП, основанный на динамических моделях теории продуктивности агроэкосистем, позволил составить стратегический прогноз урожайности зерновых культур для России (Глобальные изменения климата..., 2009).

Таблица 5.5. Оценки биоклиматического потенциала для разных уровней интенсивности земледелия и его приращений за счет оптимизации водного режима и минерального питания, (т сухой биомассы)/(га · год)

Регион	БКП				Приращение БКП		
	BKP_0	BKP_W	BKP_N	BKP_{WN}	Δ_W	Δ_N	Δ_{WN}
Брянская область	5,9	6,0	14,2	14,4	0,1	8,3	8,5
Самарская область	5,4	8,7	9,9	14,5	3,3	4,5	9,1
Краснодарский край	10,8	15,9	12,4	18,1	5,1	1,6	7,3

Глава 5. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства

УРОЖАЙНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР И КАЧЕСТВО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

Урожайность

Методы анализа влияния наблюдаемых и ожидаемых изменений климата на урожайность (т. е. хозяйственно ценную биомассу, получаемую за год с единицы посевной площади, [ед. массы/ед. площади]) и качество сельскохозяйственной продукции существенно различаются. Рассмотрим первую задачу, которая представляется менее сложной.

Необходимо дать оценку влияния наблюдаемых с середины 1970-х годов изменений климата на продуктивность растениеводства. Учитывая, что с начала современного, “взрывного” потепления прошло более 30 лет и получены необходимые для анализа ряды наблюдений, эта задача может быть решена средствами корреляционного и регрессионного анализа. Осложняющим обстоятельством (особенно для территории России) является неоднородность временных рядов урожайности, обусловленная экономической перестройкой, совпавшей с периодом существенных изменений климата.

Приведем в качестве примера оценки влияния изменений глобального климата на урожайность шести важнейших сельскохозяйственных культур за период 1981—2002 гг. (табл. 5.6; Lobell, Field, 2007).

Для выделения климатообусловленных трендов во временных рядах урожайности могут быть использованы следующие подходы: I — первые разности, II — исключение линейного временного тренда, III — исключение кубического сплайн-тренда, а также метод IV — введение временного тренда в регрессию между урожаями (с неисключенным трендом) и климатическими переменными (Lobell, Field, 2007). Результаты расчетов с применением всех указанных подходов представлены в табл. 5.7.

В табл. 5.7 приведены оценки влияния на тренды урожая температуры воздуха в приповерхностном слое атмосферы, которая учитывалась с помощью средних за вегетационный период максимального (max), минимального (min) и среднего (avg) значений за сутки. Все использованные подходы дают достаточно согласованные между собой результаты.

Данные табл. 5.6 позволяют заключить, что наблюдаемое в 1981—2002 гг. изменение климата обусловило уменьшение глобальной

Таблица 5.6. Оценки влияния изменений глобального климата на продуктивность и урожайность шести важнейших мировых сельскохозяйственных культур (Lobell, Field, 2007)

Показатель	Сельскохозяйственная культура					
	Пшеница	Рис	Кукуруза	Соя	Ячмень	Сорго
Посевная площадь в 2002 г., млн. га	214	148	139	79	55	42
Продуктивность в 2002 г., млн. т/год	574	578	602	181	137	54
Изменение урожайности за 1981—2002 гг., кг/га	846	1109	1178	632	473	–80
Климатически обусловленные изменения урожайности за 1981—2002 гг., кг/га	–88,2	–10,5	–90,3	23,1	–144,9	–19,5
Климатически обусловленные изменения продуктивности за 1981—2002 гг., млн. т/год	–18,9	–1,6	–12,5	1,8	–8,0	–0,8

Глава 5. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства

Таблица 5.7. Оценки влияния изменений глобального климата в 1981—2002 гг. на тренды продуктивности мирового сельского хозяйства (млн. т), полученные с использованием разных методов выделения и исключения временных трендов (Lobell, Field, 2007)

Метод	Температурные переменные, °С	Пшеница	Рис	Кукуруза	Соя	Ячмень	Сорго	Всего
I	T_{\min}, T_{\max}	-18,9	-1,6	-12,5	1,8	-8,0	-0,8	-40,0
I	T_{avg}	-14,8	-1,5	-20,7	-1,6	-8,3	-1,0	-48,0
II	T_{\min}, T_{\max}	-13,5	1,1	-5,6	2,8	-5,1	-1,2	-21,5
II	T_{avg}	-10,8	-1,0	-18,4	-0,7	-6,2	-1,2	-38,3
III	T_{\min}, T_{\max}	-13,5	-3,4	-9,3	2,6	-5,2	-0,6	-29,4
III	T_{avg}	-10,8	-0,6	-19,1	-1,2	-6,1	-0,6	-38,4
IV	T_{\min}, T_{\max}	-13,2	-1,2	-5,2	4,4	-6,6	-1,5	-23,3
IV	T_{avg}	-11,0	-1,0	-15,2	-1,0	-6,6	-1,8	-36,5

Примечание. Для температуры T используются средние значения за вегетационный период минимальных (min), максимальных (max) и средних (avg) значений за сутки.

Таблица 5.8. Климатообусловленные тренды урожайности зерновых культур в России в 1975—2006 гг.

Федеральный округ	Фактический средний валовой сбор, млн. т	Зерновые и зернобобовые культуры в целом	Озимая пшеница	Яровой ячмень	Зерновые и зернобобовые в целом	Озимая пшеница	Яровой ячмень				
								Изменение урожайности			
								(ц/га)/10 лет			% /10 лет
Приволжский	21,92	0,32	0,47	0,26	2,6	2,8	2,1				
Южный	26,22	0,30	0,36	0,44	2,2	2,0	3,2				
Центральный	15,31	-0,02	0,06	-0,02	-0,3	0,4	-0,2				
Сибирский	12,84	0,16	—	0,19	1,6	—	2,0				
Дальневосточный	0,41	0,23	—	0,23	2,0	—	1,98				
Уральский	4,75	0,23	0,10	0,15	1,7	0,6	1,1				

Примечание. Фактический валовой сбор всех зерновых и зернобобовых культур в среднем за 2003—2008 гг., млн. т.

урожайности всех важнейших мировых продовольственных культур за исключением сои.

Однако эти климатообусловленные потери мирового сельского хозяйства за указанный период с избытком компенсированы агротехнологическим прогрессом и прямым положительным влиянием увеличения содержания CO_2 в атмосфере на урожайность.

Тенденция конца XX в. — начала XXI в. к уменьшению глобальной климатообусловлен-

ной урожайности зерновых культур вследствие изменения климата не исключает возможности увеличения урожайности в отдельных регионах мира в тот же период времени. На территории России за сопоставимый период при той же методологии расчетов выявлено климатообусловленное увеличение урожайности зерновых и зернобобовых культур — (см. табл. 5.8) (Сиротенко, Павлова, 2010б; Сиротенко и др., 2007, 2009; Павлова, 2009, 2010).

Глава 5. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства

Таблица 5.9. Рассчитанные тренды урожайности озимой пшеницы для основных зернопроизводящих регионов РФ в 1975—2006 гг., обусловленные изменениями климата

Регион	Изменение урожайности	
	(ц/га)/10 лет	%/10 лет
Ростовская область	0,88	3,64
Краснодарский край	3,86	10,50
Ставропольский край	2,75	11,28
Волгоградская область	0,65	2,80
Саратовская область	2,50	14,90
Воронежская область	0,43	1,84
Пензенская область	1,91	11,58
Тамбовская область	0,41	1,97

Климатообусловленное увеличение урожайности в России в 1975—2008 гг. отмечено повсеместно за исключением Центрального федерального округа, где наблюдались малые разнонаправленные изменения урожайности. Особенно быстро увеличивалась климатообусловленная урожайность озимых зерновых культур (табл. 5.9). В отдельных районах Северного Кавказа и Поволжья вследствие изменений климата урожайность озимой пшеницы за последние 30 лет увеличивалась со скоростью примерно 10—15% за 10 лет.

Качество сельскохозяйственной продукции

Изменения климата влияют не только на урожайность сельскохозяйственных культур, но и на качество товарной продукции растениеводства. В результате агрометеорологических исследований выявлено большое число физико-статистических зависимостей между характеристиками условий погоды и показателями, определяющими качество сельскохозяйственной продукции. Этот научный потенциал до сих пор практически не используется для оценок влияния наблюдаемых и ожидаемых изменений климата на сельское хозяйство.

Для территории СССР (Мищенко, 1962) установлена тесная корреляционная связь про-

центного содержания белка (B) в зернах яровой пшеницы и среднего значения суточной амплитуды температуры воздуха за вегетационный период (A):

$$B = 1,29A + 2,1. \quad (5.3)$$

Коэффициент корреляции переменных B и A равен 0,86. Суточная амплитуда температуры воздуха является хорошим показателем влияния на растения климатических условий, определяющих континентальность климата. Выше уже отмечалось, что за последние 30 лет наблюдается существенное уменьшение континентальности климата в основных сельскохозяйственных районах России. Можно предположить, что эта тенденция сильно повлияет на качество зерна пшеницы.

Наряду с термическими условиями на содержание белка в зерне пшеницы влияет и влажность почвы. Приведем уравнение регрессии (Дегтярева, 1981) для юго-востока европейской части России:

$$B = -0,058x - 0,039x^2 + 1,62y^2. \quad (5.4)$$

Здесь B — содержание белка в зерне, %; x — запасы продуктивной влаги метрового слоя почвы в фазу молочной спелости, мм; y — средняя температура воздуха в период колошения — молочной спелости, °С.

**ПРОДОВОЛЬСТВЕННАЯ
БЕЗОПАСНОСТЬ И ПРОБЛЕМА
УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ
СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
В УСЛОВИЯХ
ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА**

Согласно рекомендациям ФАО (FAO — Food and Agriculture Organization), продовольственная безопасность страны считается обеспеченной, если объем переходящих от года к году запасов зерна соответствует 60 дням его потребления (при среднем уровне потребления в стране) или превосходит эту потребность.

Продовольственная безопасность страны определяется стабильностью производства зерна, которая существенно зависит от климата. Она может быть оценена с помощью вероятности низких урожаев одновременно в важнейших районах возделывания ключевых сельскохозяйственных культур. Урожайность сельскохозяйственной культуры, осредненную по некоторой территории (области, экономического района, страны), можно рассматривать как случайную величину x с плотностью распределения $p(x)$.

Для n территориальных единиц можно рассмотреть многомерную случайную величину (случайный вектор)

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$$

с плотностью распределения $P(X)$. Она характеризуется, в частности, вектором математических ожиданий $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n$ и ковариационной матрицей (m_{ij}) , $i, j = 1, 2, \dots, n$ (Варчева, Сиротенко, 1998; Гордеев и др., 2006).

Пусть Q — произвольная область (связная или даже несвязная) n -мерного пространства R^n . Задача состоит в нахождении приближенной оценки S интеграла

$$S \approx \int_Q P(X) dx, \quad (5.5)$$

где $P(X)$ — заданная плотность распределения вероятностей, такая что $S = 1$ при $Q = R^n$.

Для нахождения S используется метод Монте-Карло. При этом предполагается, что

случайные величины x_1, x_2, \dots, x_n статистически независимы, и распределение каждой из них нормальное. “Розыгрыш” случайного вектора X есть совокупность результатов независимых “розыгрышей” случайных величин x_1, x_2, \dots, x_n . После проведения N “розыгрышей” случайного вектора X в качестве оценки S принимается отношение числа его реализаций, попавших в заданную область Q , к N .

Описанная выше процедура позволяет оценивать вероятность, вообще говоря, любых событий, связанных с распределением урожайности для регионов с заданным территориальным делением, при наличии статистических данных об урожаях или моделей, позволяющих восстанавливать ряды урожайности по метеорологическим данным.

В табл. 5.10 приведены результаты расчетов повторяемости S_n^* аномалий урожайности всех зерновых культур, разных по масштабам, т. е. охватывающих одновременно сразу n регионов России, $n = 2, 3, \dots, 10$. Приведенные в таблице данные ранжированы по величине валовых сборов зерна. Аномалией в данном случае называется событие, состоящее в том, что урожайность оказывается меньше (или больше) нормы одновременно в $n = 1, 2, \dots$ экономических районах. В случае независимости законов распределения урожайности вероятность аномалии, охватывающей одновременно n регионов, определяется по формуле

$$S_n^* = \left(\frac{1}{2}\right)^n.$$

Поскольку обусловленные погодой межгодовые колебания урожайности при осреднении по большой территории определяются практически полностью условиями атмосферной циркуляции, т. е. барическими образованиями с пространственными масштабами до нескольких тысяч километров, эти колебания нельзя считать независимыми в разных регионах. Действительно, согласно табл. 5.10, фактическая повторяемость аномалий урожайности одного знака, охватывающих одновременно все десять регионов, равна 3%. Если бы коле-

Глава 5. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства

Таблица 5.10. Фактическое S_n и расчетное S_n^* значения повторяемости (в %) отрицательных аномалий урожаев зерновых культур, охватывающих одновременно регионы 1, 2, ..., n

n	Регион	Посевная площадь, тыс. га	Урожайность, ц/га	Валовой сбор, млн. т	Доля в зерновом балансе России, %	Суммарный вклад регионов 1, 2, ..., n в зерновой баланс России, %	Повторяемость отрицательных аномалий урожаев, %, охватывающих одновременно регионы 1, 2, ..., n	
							S_n	S_n^*
1	Северо-Кавказский	6895	26,5	18,3	19,3	19,3	50,0	50,00
2	Поволжский	12495	13,4	16,7	17,6	36,9	34,2	25,00
3	Уральский	11765	12,7	14,9	15,7	52,6	24,0	12,50
4	Западно-Сибирский	9962	13,1	13,0	13,7	66,3	13,2	6,20
5	Черноземный центр	5217	19,3	10,1	10,6	76,9	11,0	3,10
6	Центральный	6313	15,3	9,6	10,1	87,0	8,8	1,56
7	Волго-Вятский	3626	14,8	5,4	5,7	92,7	8,0	0,78
8	Восточно-Сибирский	3525	14,5	5,1	5,3	98,1	5,8	0,39
9	Дальневосточный	928	11,5	1,1	1,2	99,4	3,8	0,20
10	Северо-Западный	469	12,4	0,6	0,6	100,0	3,0	0,10

Примечание. Регионы представлены в порядке убывания валового сбора.

бания урожаев были независимы, вероятность такого события составила бы примерно 0,1%, что соответствует разу за 1000 лет для всей территории России. В действительности такое событие случается не менее чем в трех годах за 100-летний период.

Повторяемость аномалий урожайности одного знака одновременно в Северо-Кавказском, Поволжском и Уральском регионах, производящих совместно 53% зерна в стране, составляет 24%. Повторяемость еще более крупных аномалий одного знака, охватывающих одновременно пять регионов, которые производят более 75% зерна, составляет 11%. И, наконец, повторяемость аномалий, охватывающих одновременно все зернопроизводящие регионы России, превышает 3%. Эти оценки в значительной степени определяют степень продовольственной безопасности страны. Их следует учитывать при разработке мер по ее обеспечению (страховые запасы

зерна, емкость зернохранилищ, импортно-экспортную политику и т. д.). Значительный интерес представляет исследование изменений этих оценок за последние десятилетия в связи с глобальными изменениями климата.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО МЕТОДОМ АГРОКЛИМАТИЧЕСКИХ АНАЛОГОВ

Исследования влияния изменений климата на сельское хозяйство приобрели широкий размах из-за всеобщего внимания к проблемам обеспечения продовольственной безопасности увеличивающегося населения Земли. Несмотря на интенсивные исследования, разброс оценок, проекций и прогнозов отклика сельского хозяйства на произошедшие и ожидаемые

Глава 5. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства

изменения глобального климата продолжает оставаться недопустимо широким для использования в прикладных целях в процессе принятия решений. Одна из основных причин такого положения — недостаточное развитие методологии и отсутствие моделей, позволяющих оценить многие важные обратные связи в системе климат — сельское хозяйство (рис. 5.1).

При невозможности разработки достаточно надежных имитационных моделей эффективным средством прогнозирования откликов сельского хозяйства на изменения климата может служить метод пространственно-временных аналогов. Этот метод достаточно успешно использовался в XX в. для определения мировых климатических аналогов для вновь осваиваемых земель с целью акклиматизации новых сельскохозяйственных культур и адаптации систем земледелия. Практика применения метода аналогов связана с именами Н. И. Вавилова, Г. Т. Селянинова, Ф. Ф. Давитая и др. Практическим результатом применения этого метода явилась карта мировых агроклиматических аналогов для субтропической зоны территории СССР, а также карты мировых аналогов для отдельных сельскохозяйственных культур: пшеницы, кукурузы, картофеля, винограда и др.

Классическая агроклиматология (Шашко, 1985; Сапожникова, 1979) в качестве минимального набора показателей для поиска аналогов предлагает три параметра, характеризующих теплообеспеченность, влагообеспеченность и условия перезимовки сельскохозяйственных культур. В качестве меры близости агроклиматических условий удобно использовать сумму модулей относительных отклонений этих трех показателей.

В работе (Сиротенко, Павлова, 2003) в качестве показателя теплообеспеченности предложено использовать сумму за вегетационный период среднесуточных значений температуры воздуха за те сутки, когда она превышала 10°C ($\sum T_{>10^{\circ}\text{C}}$), а в качестве показателя влагообеспеченности — дефицит испарения ΔE , равный

разности между испаряемостью и испарением. Для характеристики условий перезимовки использована средняя температура самого холодного месяца года T_{\min} , $^{\circ}\text{C}$.

В табл. 5.11 представлены результаты идентификации современных аналогов для ряда регионов Нечерноземной зоны России в рамках сценария А2 изменения климата, рассчитанных с помощью климатической модели HadCM3 (Великобритания) для 2020—2030 и 2050—2060 гг. Коэффициент K характеризует меру близости климатов оригинала и аналога.

Изменения агроклиматических условий при потеплении климата по сценарию HadCM3 в целом можно интерпретировать как “перенос” климата, направленный с юго-запада на северо-восток. Так, к 2020—2030 гг. агроклиматические условия Новгородской области по этому сценарию должны оказаться следующими: $\sum T_{>10^{\circ}\text{C}} = 2247^{\circ}\text{C}$, $\Delta E = 94$ мм, $T_{\min} = -7^{\circ}\text{C}$. Наиболее близким современным аналогом для них являются агроклиматические условия Могилевской области Республики Беларусь:

$$\sum T_{>10^{\circ}\text{C}} = 2214^{\circ}\text{C}, \Delta E = 97 \text{ мм}, T_{\min} = -7,5^{\circ}\text{C}.$$

При дальнейшем потеплении к 2050—2060 гг. движение в юго-западном направлении продолжится, и агроклиматическим аналогом Новгородской области станет Ровенская область (Украина).

Метод аналогов представляется достаточно эффективным средством исследования влияния изменений климата на сельское хозяйство. Этот метод позволяет найти и использовать для планирования мер по адаптации сельского хозяйства к ожидаемым изменениям климата такую информацию, которую пока невозможно получить путем прямого моделирования. Так, например, основываясь на методе аналогов, можно предположить, что биоклиматический потенциал Новгородской области к 2020—2030 гг. должен увеличиться на 19% (Сиротенко, Павлова, 2003), а биоклиматический потенциал Ивановской области — на 39%, поскольку ее аналогом станет Черновицкая об-

Глава 5. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства

Таблица 5.11. Аналоги агроклиматических условий субъектов Российской Федерации в 2020—2030 и 2050—2060 гг. при изменении климата, рассчитанном с помощью модели HadCM3 с использованием сценария A2

Область, республика	Прогнозируемые агроклиматические условия		Современные агроклиматические аналоги		Современные агроклиматические условия аналогов			Степень близости оригинала и аналога, К
	$\sum T_{>10^{\circ}\text{C}}, ^{\circ}\text{C}$	$\Delta E, \text{мм}$	$T_{\text{min}}, ^{\circ}\text{C}$	Современные агроклиматические аналоги	$\sum T_{>10^{\circ}\text{C}}, ^{\circ}\text{C}$	$\Delta E, \text{мм}$	$T_{\text{min}}, ^{\circ}\text{C}$	
2020—2030 гг.								
Ленинградская	2054	61	-5,8	Ивано-Франковская	2134	66	-5,3	6,9
Новгородская	2247	94	-7,0	Могилевская	2214	97	-7,5	3,7
Ярославская	2228	131	-9,0	Брянская	2287	102	-8,1	14,3
Ивановская	2276	168	-9,9	Орловская	2241	252	-9,4	13,4
Московская	2411	189	-8,7	Курская ¹	2380	293	-8,8	12,6
Калужская	2518	142	-6,9	Черниговская	2480	142	-7,8	1,0
Рязанская	2711	340	-9,3	Липецкая	2427	325	-10,1	8,7
Марий Эл	2373	284	-11,6	Мордовия	2246	302	-12,0	5,0
Тамбовская	3010	417	-9,5	Волгоградская ² , запад	2966	586	-9,5	10,1
Пензенская	2733	399	-10,4	Тамбовская	2429	388	-11,1	7,2
Татарстан	2547	397	-11,6	Тамбовская	2429	388	-11,1	3,9
Башкортостан, север	2523	441	-13,6	Самарская	2474	482	-13,6	3,3
2050—2060 гг.								
Ленинградская	2304	105	-3,4	Закарпатская	2546	116	-4,6	15,0
Новгородская	2518	145	-4,2	Ровенская	2484	134	-5,0	8,5
Ярославская	2445	185	-5,7	Житомирская	2445	194	-5,8	2,3
Ивановская	2506	212	-6,4	Житомирская	2445	194	-5,8	7,4
Московская	2683	233	-6,4	Тернопольская	2490	239	-5,2	11,1
Калужская	2806	184	-5,3	Житомирская	2445	194	-5,8	9,5
Рязанская	2989	367	-6,6	Полтавская ³	2771	480	-6,5	11,0
Марий Эл	2689	306	-7,1	Сумская	2504	276	-7,6	8,3
Тамбовская	3317	438	7,3	Луганская ⁴	2907	557	-7,5	12,7
Пензенская	3147	424	-8,0	Белгородская	2589	430	-8,2	8,5
Татарстан	2995	415	-8,4	Белгородская	2589	430	-8,2	7,4
Башкортостан, север	2980	455	-11,4	Волгоградская ⁵ , восток	3097	667	-11,4	11,9

Примечание. Вторые аналоги: ¹ — Орловская область, $\Delta E = 252 \text{ мм}$; ² — Белгородская область, $\Delta E = 430 \text{ мм}$; ³ — Киевская область, $\Delta E = 328 \text{ мм}$; ⁴ — Полтавская область, $\Delta E = 480 \text{ мм}$; ⁵ — Саратовская область, $\Delta E = 578 \text{ мм}$.

Глава 5. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства

ласть (Украина), обладающая весьма продуктивным сельским хозяйством.

Вместе с тем метод агроклиматических аналогов имеет существенные ограничения, которые затрудняют интерпретацию полученных результатов. Найденные регионы-аналоги могут значительно отличаться от оригинала по почвенным условиям, которые в значительной мере определяют продуктивность и рентабельность сельскохозяйственного производства.

МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА ДЛЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Климат есть многомерный случайный процесс (случайное поле), компоненты которого — температура и влажность воздуха, сумма осадков, поток солнечной радиации, температура и влажность почвы, ряд других параметров — совместно определяют состояние и продуктивность агроэкосистем и через них или непосредственно влияют на сельскохозяйственные технологические процессы и эффективность сельскохозяйственной деятельности в целом. Связи между климатом, агроэкосистемами и результатами хозяйственной деятельности, как правило, многозначны, нелинейны и неаддитивны, им свойственны инерционность и адаптивность. Все это делает проблему экономической и агроэкологической интерпретации наблюдаемых изменений климата достаточно сложной и в определенной мере неоднозначной.

В табл. 5.12 представлен перечень биоклиматических и агроклиматических показателей, используемых для комплексной оценки влияния изменений климата на сельское хозяйство и землепользование. Эти показатели представлены четырьмя группами — характеристиками теплообеспеченности, увлажненности, биоклиматического потенциала и климатообусловленной урожайности.

Для расчета показателей увлажненности ИС, ГТК и КУ (определяются по формулам

(5.1)) необходим минимальный объем гидрометеорологической информации — среднесуточные значения температуры воздуха и суточные суммы осадков. Достаточная точность достигается и при использовании данных месячного разрешения. Напомним, что эти показатели — безразмерные.

Согласно А. И. Будаговскому, наилучшим критерием для оценки и, следовательно, для мониторинга засух является дефицит испарения $\Delta E = E_0 - E$, где E_0 и E — испаряемость и испарение.

В настоящее время система мониторинга климата Росгидромета в достаточной мере не располагает репрезентативными и достаточно однородными длиннорядными наблюдениями за влажностью почвы. Поэтому в системе мониторинга изменений климата для сельского хозяйства предлагается использовать ряды влагозапасов почвы, рассчитанные по результатам стандартных гидрометеорологических наблюдений с помощью системы климат — почва — урожай (Сиротенко, 1991).

Для оценки изменений климата по агробиологическим критериям можно использовать первичную биологическую продуктивность агроэкосистем — биоклиматический потенциал (БКП, т сухой биомассы/(га · год)), который рассматривается для четырех уровней интенсивности земледелия $БКП_0$, $БКП_{1/2}$, $БКП_N$ и $БКП_{10N}$.

Урожайность сельскохозяйственных культур можно рассчитывать по формуле Сапожниковой, $БКП_C$ — в форме бонитировочного балла климата B_k . Он по определению равен урожаю яровых зерновых культур при данном сочетании тепла и влаги. Для его расчета используется следующая формула:

$$B_k = 0,01 \varepsilon \sum T_{>10^\circ C}. \quad (5.6)$$

Здесь ε — балл увлажнения, количественно равный осредненной урожайности этих культур (ц/га), приходящийся на единицу тепла ($\sum T_{>10^\circ C} = 100^\circ C$) при данном увлажнении, а $\sum T_{>10^\circ C}$ — фактическая сумма среднесуточных значений температуры ($^\circ C$) за период кален-

Глава 5. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства

Таблица 5.12. Перечень основных биоклиматических и агроклиматических показателей для мониторинга влияния изменений климата на сельское хозяйство

Показатель, размерность	Обозначение	Комментарии к способу расчета
Характеристики термического режима		
Сумма среднесуточных значений температуры воздуха за период календарного года со среднесуточной температурой воздуха, превышающей 5 или 10°C, °C	$\sum T_{>5^{\circ}\text{C}}$ $\sum T_{>10^{\circ}\text{C}}$	
Продолжительность вегетационного периода (т. е. периода календарного года, когда среднесуточная температура воздуха превышает 5 или 10°C), сут	N_5, N_{10}	
Даты перехода (номер дня от начала календарного года) среднесуточной температуры воздуха через границы 5 или 10°C весной и осенью	d_5, d_{10}	
Средняя температура воздуха в январе и июле, °C	T_1, T_7	
Амплитуда годового хода среднесуточной температуры, °C	A_T	
Продолжительность вегетационной весны и осени (т. е. периодов времени весной и осенью, когда среднесуточная температура воздуха находится в указанных пределах), сут	N_{5-15}, N_{15-5}	
Характеристики увлажнения		
Сумма осадков за период календарного года со среднесуточной температурой, превышающей 5 и 10°C, мм	R_5, R_{10}	
Суммарное испарение за вегетационный период, мм	E	*
Испаряемость за вегетационный период, мм	E_0	
Влагозапасы в слое почвы 0—20 и 0—100 см в среднем за теплый период календарного года (т. е. когда среднесуточная температура воздуха выше 5°C), мм	W_{20}, W_{100}	*
Гидротермический коэффициент Селянинова, безразмерный	ГТК	
Индекс сухости Будыко, безразмерный	ИС	
Коэффициент увлажнения Сапожниковой, безразмерный	КУ	
Дефицит испарения Будаговского, мм	ΔE	*
Биоклиматический потенциал (БКП), т · га⁻¹		
БКП Сапожниковой	БКП _С	
БКП при низкокзатратном земледелии	БКП ₀	*
БКП при оптимальном увлажнении	БКП _W	*
БКП при оптимальном минеральном питании	БКП _N	*
БКП при оптимальном увлажнении и минеральном питании	БКП _{WN}	*
Климатообусловленная урожайность, т · га⁻¹		
При низкокзатратном земледелии	Y_0	*
При оптимальном увлажнении	Y_W	*
При оптимальном минеральном питании	Y_N	*
При оптимальном увлажнении и минеральном питании	Y_{WN}	*

Примечание. * Показатель вычисляется с помощью системы климат — почва — урожай (Сиротенко, 1991).

Глава 5. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства

дарного года со среднесуточной температурой воздуха выше 10°C.

Значение ε определяется на основании коэффициента увлажнения КУ:

$$\varepsilon = -1,7КУ^2 + 3,7КУ - 0,28. \quad (5.7)$$

Зависимость ε от КУ имеет четко выраженный максимум. В пределах значений КУ от 1 до 1,2 он соответствует лесостепной зоне.

Практически мониторинг изменений климата для сельского хозяйства реализуется путем расчета ежегодно обновляемых таблиц следующих характеристик агроклиматических показателей: текущих годовых значений, скользящих средних значений, скользящих среднеквадратических отклонений, скользящих оценок повторяемости, обеспеченности или рисков.

Приведем в качестве примера результаты мониторинга, полученные по данным гидрометстанции Чертково в Ростовской области для теплого периода года (табл. 5.13—5.16).

Эти данные позволяют решать следующие практические задачи гидрометеорологического обеспечения сельского хозяйства:

— оценивать агрометеорологические условия текущего года по сравнению с прошлым годом и предысторией прошедшего 30-летнего периода;

— определять годы, аналогичные текущему году по агрометеорологическим условиям вегетационного периода;

— находить наблюдаемые границы изменчивости оцениваемых агроклиматических показателей по данным за последние 30 лет.

Скользящие средние значения агроклиматических параметров (табл. 5.14) представляются весьма информативными показателями. Так, например, из данных этой таблицы следует однозначный вывод — наблюдаемые за последние 30 лет изменения климата способствовали увеличению продуктивности сельского хозяйства северных районов Ростовской области, которые характеризуются наблюдениями гидрометстанции Чертково.

Данные табл. 5.14 позволяют также заключить, что степень аридности климата с 1970-х годов (с начала “взрывного” глобального потепления) существенно уменьшилась. Так, 30-летние средние значения дефицита испарения уменьшились с 582 мм в 1976 г. до 561 мм в 2004 г. Значения ГТК увеличились с 0,78 до 0,90. Средние значения влагозапасов в пахотном и метровом слоях почвы в июне и июле также увеличились, хотя это увеличение нельзя оценивать как значительное. Отметим согласованный характер изменений важнейших показателей степени засушливости климата — дефицита испарения, ГТК и влагозапасов почвы.

Последствия засух оцениваются величинами урожайности и биоклиматического потенциала для двух уровней интенсивности земледелия (Y_0 , Y_N и $БКП_0$, $БКП_N$). Тренды всех названных показателей свидетельствуют о положительном влиянии наблюдаемых изменений климата на продуктивность сельского хозяйства и биоклиматический потенциал территории. Средние значения биоклиматического потенциала для современного и интенсивного земледелия увеличились на 9,6 и 11,2% соответственно. Аналогично повысились и значения климатообусловленной урожайности зерновых культур.

Тем не менее анализ скользящих средних недостаточен для однозначной интерпретации результатов расчетов. Изменения средних величин свидетельствуют лишь о смещении положения центра распределения, но в связи с потеплением изменяется и форма функции распределения.

Данные табл. 5.15 подтверждают это предположение: с 1976 по 2004 г. увеличилась изменчивость всех представленных в таблице показателей. Особенно значительно (на 36%) увеличение среднеквадратического отклонения дефицита испарения. Повышение межгодовой изменчивости урожаев следует отнести к негативным последствиям наблюдаемых изменений климата.

Глава 5. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства

Таблица 5.13. Текущие значения агроклиматических показателей (гидрометстанция Чертково, Ростовская область)

Год	Биоклиматический потенциал, ц/га		Климатообусловленная урожайность, ц/га		ΔE , мм	ГТК	Влагозапасы почвы W_{100^2} мм	
	БКП ₀	БКП _N	Y_0	Y_N			июнь	июль
1976	73,4	126,1	18,0	35,5	430	1,48	48,0	36,0
1977	76,0	132,4	17,1	36,7	373	1,68	112,0	55,0
1978	55,4	99,2	19,0	38,0	527	0,93	75,0	42,0
1979	38,3	63,1	8,2	10,7	633	0,42	61,0	48,0
1980	61,1	108,3	12,4	20,4	444	1,42	71,0	30,0
1981	46,5	81,2	7,4	10,4	593	0,66	68,0	56,0
1982	59,4	102,9	17,1	33,0	544	0,81	66,0	46,0
1983	38,8	74,6	8,6	13,5	694	0,42	37,0	33,0
1984	40,3	66,6	4,8	6,6	690	0,53	41,0	45,0
1985	52,5	97,1	15,9	29,3	494	1,26	59,0	33,0
1986	35,3	67,6	7,3	12,6	698	0,37	47,0	38,0
1987	50,0	86,7	11,5	17,2	539	0,92	68,0	33,0
1988	40,7	73,8	7,4	9,7	594	0,75	46,0	35,0
1989	49,9	92,6	12,8	24,2	561	0,91	51,0	32,0
1990	54,1	112,7	16,5	36,9	571	0,94	50,0	28,0
1991	47,3	82,3	7,5	10,0	596	0,80	50,0	41,0
1992	50,4	90,2	12,9	22,6	533	0,96	46,0	32,0
1993	66,7	122,0	17,7	33,1	486	1,29	68,0	40,0
1994	49,4	88,2	12,6	22,0	592	0,66	57,0	34,0
1995	45,1	87,4	8,7	16,2	585	0,87	35,0	27,0
1996	34,9	60,1	7,7	10,4	552	0,74	54,0	37,0
1997	58,5	104,1	13,1	22,6	515	1,23	52,0	40,0
1998	41,7	71,3	8,7	14,2	625	0,54	52,0	35,0
1999	39,0	68,0	5,9	9,6	632	0,66	35,0	38,0
2000	55,9	108,1	12,4	26,7	591	1,01	45,0	39,0
2001	50,1	99,1	15,8	34,5	426	1,41	63,0	30,0
2002	41,9	74,8	8,3	14,0	604	0,69	60,0	43,0
2003	58,5	107,9	16,5	33,0	529	1,17	73,0	55,0
2004	61,1	114,9	16,4	34,5	511	1,14	62,0	48,0

Глава 5. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства

Таблица 5.14. Скользящие 30-летние средние значения агроклиматических показателей (гидрометстанция Чертково, Ростовская область)

Год	Биоклиматический потенциал, ц/га		Климатообусловленная урожайность, ц/га		ΔE , мм	ГТК	Влагозапасы почвы W_{100} , мм	
	БКП ₀	БКП _N	Y_0	Y_N			июнь	июль
1976	46,1	81,9	10,5	18,1	582	0,78	52,6	36,1
1977	47,3	84,0	10,9	19,1	575	0,81	55,0	36,9
1978	47,8	85,2	11,3	20,1	572	0,82	55,8	36,8
1979	47,7	84,9	11,2	19,7	572	0,82	55,8	37,2
1980	48,2	85,7	11,2	19,6	566	0,84	56,9	37,4
1981	48,3	85,4	11,2	19,6	567	0,83	58,1	38,0
1982	48,5	85,3	11,3	19,8	567	0,82	58,3	38,3
1983	48,2	85,3	11,2	19,7	572	0,81	57,4	37,9
1984	48,5	85,9	11,2	19,7	575	0,81	57,3	38,4
1985	48,8	86,8	11,3	20,1	572	0,83	57,7	38,8
1986	48,2	85,6	11,2	19,8	577	0,81	57,1	38,6
1987	48,6	86,3	11,3	20,1	574	0,82	57,9	38,4
1988	47,7	84,9	11,0	19,3	580	0,79	57,0	38,1
1989	47,8	84,9	11,1	19,6	580	0,79	56,7	37,5
1990	48,0	85,9	11,5	20,6	580	0,80	56,6	36,9
1991	47,9	85,8	11,2	20,1	583	0,79	55,7	37,1
1992	48,0	85,8	11,2	20,0	579	0,80	56,0	37,2
1993	49,0	87,8	11,6	20,8	575	0,83	56,4	37,4
1994	48,9	87,5	11,6	20,8	577	0,81	56,3	37,2
1995	49,1	88,2	11,5	20,8	576	0,83	55,4	37,3
1996	48,7	87,2	11,3	20,0	575	0,83	55,5	37,6
1997	49,4	88,5	11,4	20,2	569	0,86	55,4	37,8
1998	49,5	88,8	11,5	20,4	568	0,86	55,6	37,6
1999	49,0	87,8	11,2	19,9	570	0,85	54,7	37,7
2000	49,4	88,9	11,2	20,2	570	0,86	54,8	38,0
2001	49,7	89,9	11,5	20,8	564	0,89	55,1	38,1
2002	50,1	90,7	11,6	21,0	562	0,89	55,8	38,4
2003	50,0	90,5	11,7	21,1	561	0,89	57,0	39,2
2004	50,3	90,8	11,7	21,4	561	0,90	56,4	39,3

Глава 5. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства

Таблица 5.15. Скользящие 30-летние среднеквадратические отклонения значений агроклиматических показателей (гидрометстанция Чертково, Ростовская область)

Год	Биоклиматический потенциал, ц/га		Климатообусловленная урожайность, ц/га		ΔE , мм	ГТК	Влагозапасы почвы W_{100} , мм	
	БКП ₀	БКП _N	Y_0	Y_N			июнь	июль
1976	9,7	19,7	3,9	9,0	59	0,30	12,1	7,6
1977	11,0	21,6	4,0	9,3	70	0,34	16,0	8,3
1978	11,0	21,3	4,1	9,7	70	0,34	16,4	8,2
1979	11,1	21,6	4,2	9,8	70	0,34	16,4	8,5
1980	11,3	22,1	4,2	9,8	73	0,36	16,2	8,3
1981	11,3	22,1	4,1	9,8	73	0,36	15,7	8,9
1982	11,4	22,0	4,2	10,0	73	0,36	15,7	9,0
1983	11,5	21,9	4,3	10,1	77	0,36	16,1	9,1
1984	11,2	21,2	4,3	10,1	80	0,36	16,2	9,0
1985	11,2	21,0	4,4	10,2	81	0,37	16,1	8,6
1986	11,4	21,2	4,4	10,3	84	0,38	16,1	8,5
1987	11,3	20,8	4,4	10,2	84	0,38	16,0	8,6
1988	10,9	20,1	4,3	10,0	79	0,35	15,8	8,5
1989	10,9	20,2	4,2	10,0	79	0,35	15,9	8,3
1990	10,9	20,8	4,2	10,1	79	0,35	15,9	8,4
1991	10,9	20,8	4,2	10,2	78	0,35	15,6	8,4
1992	10,9	20,8	4,2	10,2	78	0,35	15,3	8,3
1993	11,2	21,3	4,3	10,3	80	0,35	15,5	8,3
1994	11,1	21,2	4,3	10,3	79	0,35	15,5	8,3
1995	11,0	20,8	4,3	10,3	79	0,34	15,9	8,2
1996	11,2	21,4	4,3	10,2	79	0,34	15,9	7,9
1997	11,2	21,2	4,3	10,2	78	0,34	15,9	7,9
1998	11,1	21,0	4,3	10,0	76	0,34	15,8	7,9
1999	11,3	21,3	4,4	10,1	77	0,34	16,2	7,9
2000	11,3	21,4	4,4	10,2	77	0,34	16,2	7,7
2001	11,2	21,2	4,4	10,5	81	0,35	16,3	7,6
2002	10,7	20,2	4,3	10,3	80	0,35	15,9	7,6
2003	10,7	19,9	4,4	10,4	80	0,35	15,9	8,0
2004	10,8	20,3	4,4	10,6	80	0,35	15,4	8,1

Глава 5. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства

Таблица 5.16. Скользящие 30-летние оценки обеспеченности $F = \int_{-\infty}^{y_k} p(x) dx$ заданных значений (y_k) агроклиматических показателей

Год	Биоклиматический потенциал, ц/га		Климатообусловленная урожайность, ц/га		ΔE , мм	ГТК	Влагозапасы почвы W_{100} , мм	
	БКП ₀	БКП _N	Y_0	Y_N			июнь	июль
1976	0,667	0,674	0,618	0,644	0,358	0,661	0,623	0,661
1977	0,605	0,623	0,579	0,599	0,418	0,608	0,536	0,613
1978	0,587	0,603	0,536	0,555	0,437	0,594	0,516	0,617
1979	0,591	0,608	0,548	0,570	0,437	0,597	0,515	0,594
1980	0,572	0,592	0,550	0,574	0,470	0,563	0,488	0,589
1981	0,568	0,597	0,548	0,574	0,466	0,576	0,457	0,555
1982	0,562	0,599	0,541	0,565	0,463	0,584	0,453	0,544
1983	0,569	0,599	0,545	0,568	0,442	0,594	0,477	0,558
1984	0,561	0,592	0,548	0,568	0,427	0,596	0,479	0,538
1985	0,551	0,576	0,531	0,553	0,443	0,573	0,468	0,523
1986	0,572	0,596	0,547	0,562	0,423	0,592	0,484	0,529
1987	0,560	0,585	0,535	0,553	0,435	0,584	0,464	0,538
1988	0,592	0,615	0,568	0,586	0,404	0,622	0,486	0,556
1989	0,589	0,614	0,556	0,571	0,401	0,624	0,494	0,586
1990	0,580	0,592	0,522	0,531	0,403	0,617	0,497	0,609
1991	0,585	0,594	0,543	0,553	0,388	0,625	0,518	0,601
1992	0,582	0,595	0,542	0,555	0,405	0,615	0,512	0,597
1993	0,543	0,556	0,509	0,525	0,426	0,584	0,502	0,587
1994	0,550	0,562	0,511	0,526	0,418	0,598	0,504	0,597
1995	0,543	0,549	0,514	0,525	0,421	0,584	0,527	0,595
1996	0,553	0,566	0,537	0,554	0,430	0,584	0,523	0,581
1997	0,531	0,543	0,528	0,547	0,455	0,551	0,527	0,573
1998	0,528	0,539	0,521	0,540	0,462	0,550	0,522	0,583
1999	0,544	0,557	0,543	0,559	0,454	0,559	0,542	0,580
2000	0,529	0,535	0,541	0,550	0,452	0,544	0,541	0,563
2001	0,518	0,517	0,521	0,523	0,483	0,514	0,533	0,559
2002	0,506	0,503	0,512	0,515	0,491	0,508	0,515	0,543
2003	0,509	0,507	0,503	0,511	0,498	0,508	0,487	0,502
2004	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500
y_k	50,3	90,8	11,7	21,4	561	0,90	56,4	39,3

Глава 5. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства

В табл. 5.16 приведены 30-летние скользящие оценки повторяемости современного (на 2004 г.) состояния системы агроклиматических показателей. Значения y_k — верхнего предела интегрирования — заданы равными средним за 1976—2004 гг., и, таким образом, по определению оценка повторяемости значений, представленных в последней строке табл. 5.16, равна 0,5. Результаты расчетов в табл. 5.16 интерпретируются следующим образом: повторяемость урожаев зерновых меньше 21,4 ц/га (высокий уровень агротехники Y_N), которая составляла 64% в 1976 г., к 2004 г. уменьшилась до 50%. Аналогично повторяемость урожаев зерновых (при современной агротехнике) меньше 11,7 ц/га, равная 62% в 1976 г., уменьшилась на 12% к 2004 г. Повторяемость влагозапасов метрового слоя почвы в июле меньше 39 мм, составляющая в 1976 г. 66%, к 2004 г. уменьшилась на 16%.

Уменьшение аридности климата ведет к заметному увеличению урожайности зерновых культур и биоклиматического потенциала сельскохозяйственных угодий. Вместе с тем наблюдаемое увеличение климатической изменчивости урожайности в определенной мере дестабилизирует сельскохозяйственное производство, уменьшает его устойчивость и экономическую эффективность.

ЛИТЕРАТУРА

- Болин Б., Деес Б. Р., Ягер Д., Уоррик Р., 1989. Парниковый эффект. Изменение климата и экосистемы, Л., Гидрометеиздат, 357 с.
- Варчева С. Е., Сиротенко О. Д., 1998. Оценка стабильности производства зерна в России методом стохастического моделирования, Труды ВНИИСХМ, СПб, Гидрометеиздат, с. 32—41.
- Глобальные изменения климата и прогноз рисков в сельском хозяйстве, 2009. Под ред. А. Л. Иванова, В. И. Кирюшина, М., Российская академия сельскохозяйственных наук, 517 с.
- Глобальные проявления изменений климата в агропромышленной сфере, 2004. М., Российская академия сельскохозяйственных наук, 331 с.
- Гордеев А. В., Клещенко А. Д., Черняков Б. А., Сиротенко О. Д., 2006. Биоклиматический потенциал России: теория и практика, М., Товарищество научных изданий КМК, 508 с.
- Дегтярева Г. В., 1981. Погода, урожай и качество зерна яровой пшеницы, Л., Гидрометеиздат, 216 с.
- Мищенко З. А., 1962. Суточный ход температуры воздуха и его агроклиматическое значение, Л., Гидрометеиздат, 200 с.
- Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, 2008. Том 2. Последствия изменений климата, М., Росгидромет, 287 с.
- Павлова В. Н., 2009. Проблема оценки влияния изменений климата на продуктивность агроферы России: методология, модели, результаты расчетов, Труды Самарского университета, т. 11, № 1(7), с. 1595—1600.
- Павлова В. Н., 2010. Анализ и оценки влияния климатических условий последних десятилетий на урожайность зерновых культур в земледельческой зоне России, в сб.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, М., т. XXIII, с. 215—230.
- Предстоящие изменения климата. Совместный советско-американский отчет о климате и его изменениях, 1991. Под ред. М. И. Будыко, Ю. А. Израэля, М. С. Маккракена, А. Д. Хекта, Л., Гидрометеиздат, 272 с.
- Сапожникова С. А., 1979. Агроклиматическое районирование пяти основных сельскохозяйственных культур на территории социалистических стран. Опыт интегральной сельскохозяйственной оценки климата территории социалистических стран Европы, София, Изд-во Болгарской академии наук, 123 с.
- Сиротенко О. Д., 1991. Имитационная система климат — урожай СССР, Метеорология и гидрология, № 4, с. 67—73.
- Сиротенко О. Д., 2007. Методы оценки изменений климата для сельского хозяйства и землепользования, Методическое пособие, М., Росгидромет, 77 с.
- Сиротенко О. Д., Груза Г. В., Ранькова Э. Я., Абашина Е. В., Павлова В. Н., 2007. Современные климатические изменения теплообеспеченности, увлажненности и продуктивности агроферы России, Метеорология и гидрология, № 8, с. 90—103.
- Сиротенко О. Д., Абашина Е. В., Павлова В. Н., 2009. Проблема оценки влияния изменений климата на продуктивность агроферы: модели, сценарии и результаты для сельского

Глава 5. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства

хозяйства России, в сб.: Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции, СПб, т. 166, с. 567—573.

Сиротенко О. Д., Павлова В. Н., 2003. Оценка влияния изменений климата на сельское хозяйство методом пространственно-временных аналогов, Метеорология и гидрология, № 8, с. 89—99.

Сиротенко О. Д., Павлова В. Н., 2010а. Новый подход к идентификации функционалов погоды — урожай для оценки последствий изменения климата, Метеорология и гидрология, № 2, с. 92—100.

Сиротенко О. Д., Павлова В. Н., 2010б. Аналоговый прогноз урожайности зерновых культур и основные направления оптимизации размещения сельскохозяйственного производства с учетом изменений климата, Труды ВНИИС-ХМ, вып. 37, с. 22—41.

Шашко Д. И., 1985. Агроклиматические ресурсы СССР, М., Гидрометеиздат, 243 с.

Lobell D. B. and Field C. B., 2007. Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming, Environ. Res. Lett., vol. 2, pp. 1–7.

Parry M., 1990. Climate Change and World Agriculture, London, Earthscan Publications Ltd, 157 p.