

## ПРОДУКТИВНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ И ЛАНДШАФТНО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ

На основании данных по урожайности зерновых культур (озимой пшеницы) и пойменных сенокосов Рязанской области выявлены ключевые факторы современного климата, определяющие величину биопродуктивности агроценозов различного типа. Дана оценка ландшафтных различий выявленных факторов. Проведенный анализ реконструированных рядов урожайности озимых и сенокосов за XX век позволяет в целом охарактеризовать изменения климата в эпоху глобального потепления как неблагоприятные для сельского хозяйства.

*агроценоз, климат, ландшафт, урожайность.*

Первичная биопродуктивность, являющаяся ведущим звеном малого биологического круговорота, служит важнейшим показателем устойчивости экосистем. Характеризуя особенности функционирования фитоценозов, она в первую очередь реагирует на возникающие климатические изменения, если таковые превышают критическую величину возможных естественных флуктуаций климатической системы. В этой связи оценка динамики продуктивности растительных сообществ, в том числе урожайности сельскохозяйственных культур, позволяет охарактеризовать значимость изменений гидротермических параметров климата и степень благоприятности данных изменений для функционирования экосистем. Последнее особенно актуально в связи с усилившейся «климатической неуравновешенностью»<sup>1</sup> последних десятилетий, которые принято относить к периоду «глобального потепления»<sup>2</sup>.

Изучение продуктивности агроценозов имеет определенные особенности по сравнению с естественными сообществами. Урожайность сельскохозяйственных культур является функцией взаимодействия природных и антропогенных факторов<sup>3</sup>, и при определенном (фиксированном) уровне культуры земледелия изменения величины урожайности год от года объясняются вариациями погодно-климатических условий и ландшафтными особенностями территории.

К настоящему времени накопилось значительное количество работ, в которых сделана попытка выявить ключевые факторы урожайности для основных сельхозпроизводящих регионов России и бывших союзных республик. При этом авторы оперируют либо обобщенными показателями продуктивности агроцено-

---

<sup>1</sup> Коломыц Э.Г. Региональная модель глобальных изменений природной среды : моногр. М. : Наука, 2003.

<sup>2</sup> Будыко М.И. Климат в прошлом и будущем : моногр. Л. : Гидрометеоздат, 1980.

<sup>3</sup> Мазиков В.М., Ермошкина М.А. Влияние совокупности природных факторов на функционирование сельскохозяйственных геосистем // Известия РАН. Сер. География. 1994. № 3. С. 49–60.

зов, наподобие биоклиматического потенциала <sup>4</sup>, либо урожайностью какой-либо конкретной культуры <sup>5</sup>. Несмотря на определенную практическую значимость подобных разработок, необходимо все же отметить, что нередко они носят слишком общий характер и не позволяют оценить вклад ландшафтных особенностей территории в формирование урожая. Вместе с тем очевидно, что глобальные процессы зарождаются в конкретных регионах и местностях, а главной особенностью общей картины климатических изменений является высокая степень их пространственно-временной неоднородности <sup>6</sup>, в том числе и на уровне отдельных ландшафтов.

В настоящей работе представлены основные результаты оценки закономерностей биологической продуктивности агроценозов различного типа в условиях меняющегося климата. Основной целью проведенной оценки было выявление ключевых факторов современного климата, определяющих величину биопродуктивности, а также анализ ландшафтных различий данных факторов, установление масштабов различий в пределах Рязанского региона.

Оценка проводилась на основании данных по урожайности зерновых культур (озимой пшеницы) и пойменных сенокосов в Рязанской области. Для выявления факторов продуктивности агроценозов был обработан ряд данных с 1991 по 2009 год. Исследуемый период характеризуется относительной однородностью уровня культуры земледелия, а именно резким снижением применения средств химизации. Следовательно, уровень и колебания продуктивности агроценозов в данные годы определяются в основном ландшафтно-климатическими факторами.

Выбранная для изучения закономерностей продуктивности озимая пшеница наиболее часто выступает в качестве эталонной культуры в исследованиях климатообусловленной урожайности. Это связано в первую очередь с особенностями биологии озимых, испытывающих комплексное влияние погодных условий всех сезонов года, а также с их важнейшим продовольственным значением, обуславливающим большие площади их посевов. Урожайность озимой пшеницы изучалась нами на примере трех сельскохозяйственных предприятий области, условия каждого из которых репрезентативны для той или иной почвенно-климатической зоны.

Данные по температуре и количеству осадков для каждого сельхозпредприятия были получены с ключевых метеостанций области, по возможности максимально приближенных к районам исследования. На основе этих данных были рассчитаны такие потенциальные факторы урожайности, как сумма активных температур, осадки за период с активными температурами, дата накопления

---

<sup>4</sup> Сиротенко О.Д., Величко А.А., Долгий-Трач В.А., Климанов В.А. К оценке агроклиматических ресурсов Русской равнины в связи с глобальным потеплением климата // Известия АН СССР. Сер. География. 1990. № 6. С. 29–38.

<sup>5</sup> Павлова М.Д. Практикум по сельскохозяйственной метеорологии. М. : Колос, 1968 ; Уланова Е.С. Методы агрометеорологических прогнозов : моногр. Л. : Гидрометеоздат, 1959.

<sup>6</sup> Коломыц Э.Г. Региональная модель глобальных изменений природной среды.

суммы температур в 1000 °С и осадки за этот период, количество оттепелей за зиму, средние и максимальные температуры за период оттепелей. Кроме того, не исключая возможного влияния на урожайность ряда производных гидротермических характеристик, таких, как влагозапасы почвы, радиационный баланс, радиационный индекс сухости Будыко, коэффициент увлажнения Высоцкого – Иванова и другие, мы установили их количественные значения с помощью приведенных в монографии Э.Г. Коломыц <sup>7</sup> статистических связей между исходными и производными параметрами.

Масштабы различий фактической урожайности озимой пшеницы в пределах Рязанского региона можно оценить с помощью рисунка 1. Характерно, что величина урожая в целом возрастает при движении с севера на юг области параллельно повышению естественного плодородия почв. Так, минимальные показатели продуктивности (в среднем 11,1 *ц/га*) характерны для Мещеры с ее малопродуктивными дерново-подзолистыми почвами, на которых в естественных ландшафтах произрастают смешанные леса (урожайность озимых в данных ландшафтно-климатических условиях характеризует ряд данных АО «Макеевское»). Значительно более высокие урожаи (в среднем 21,8 *ц/га*) получают на серых лесных почвах в зоне широколиственных лесов, в качестве эталона продуктивности которой использован ряд данных СПК «Есенинский» (северо-запад Рязанской области, окрестности села Константинова). Максимальные показатели продуктивности агроценозов (в среднем 25,4 *ц/га*) типичны для расположенного в зоне лесостепи черноземного юга области (ряд данных АО «Салтыки» Ряжского района).

Оценка климатически обусловленной амплитуды урожайности озимой пшеницы показала, что наибольшей стабильностью отличаются урожаи центральной части области (коэффициент вариации  $V = 21,8 \%$ ). Более значительные флуктуации характерны для лесостепного юга региона ( $V = 29,8 \%$ ), что обусловлено, по-видимому, повышенной экстремальностью погодных условий, способных в ряде лет существенно снизить урожайность. Максимальная же естественная изменчивость урожайности с коэффициентом вариации 58,2 процента приходится на Мещеру. Следовательно, на севере региона величина урожайности определяется совместным влиянием наибольшего количества внешних факторов.

---

<sup>7</sup> Коломыц Э.Г. Региональная модель глобальных изменений природной среды.

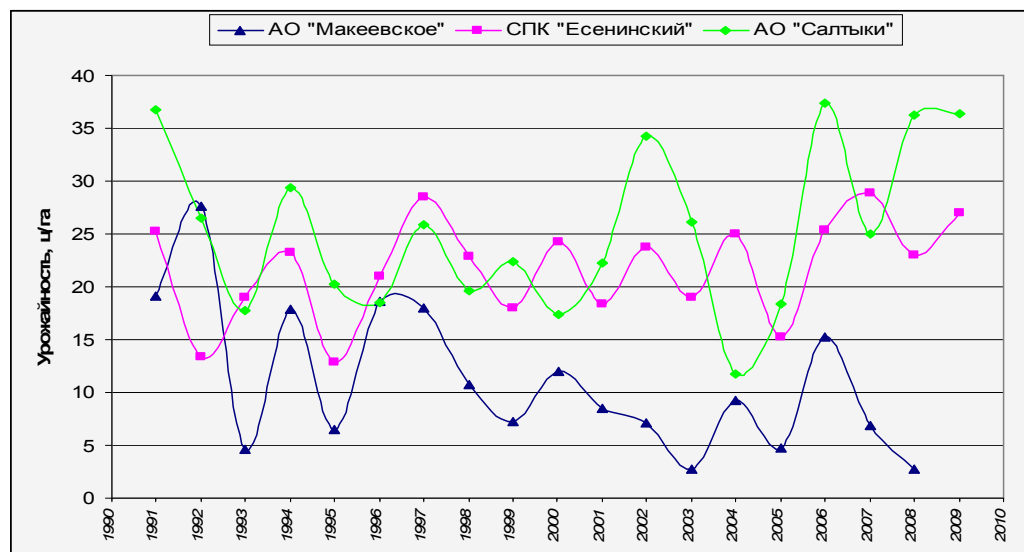


Рис. 1. Фактическая урожайность озимой пшеницы на примере трех сельхозпредприятий Рязанской области

Исследование зависимости урожайности от климатических факторов осуществлялось с использованием метода регрессионного анализа, выполненного в программном пакете «STATISTICA». С помощью пошаговой линейной регрессии производился отбор параметров с постепенной выбраковкой факторов, влияние которых на результат незначимо. О характере и значимости влияния того или иного фактора на зависимую переменную (в данном случае на величину урожайности) можно судить по знаку и величине регрессионного коэффициента. Положительные коэффициенты говорят об увеличении урожайности под влиянием данного фактора, отрицательные – о ее уменьшении.

В ходе анализа рассчитывался также коэффициент детерминации ( $R^2$ ), характеризующий степень адекватности уравнения реальным данным (в долях единицы), и уровень значимости ( $\alpha$ ), определяющий вероятность ошибки, приемлемая вероятность которой составляет 0,05, или 5 %.

Результаты исследования представлены в таблице 1. При этом факторы в полученных зависимостях перечислены в порядке убывания их значимости независимо от знака коэффициента.

Таблица 1

Зависимость урожайности озимой пшеницы от климатических факторов по результатам регрессионного анализа

| Объект исследования  | Уравнение зависимости   | $R^2$ | $\alpha$ |
|--|---|-------|----------|
| АО «Макеевское»<br>(смешанные леса,<br>дерново-подзолистые почвы)  | $Y_3 = 30,677 - 2,713t_{\text{сент.-окт.}} - 1,164t_{\text{январ.}} + 1,159t_{\text{от}} + 0,443t_{\text{дек.}} + 0,14t_{\text{март}} - 0,042r_{\text{март}} - 0,041r_{\text{сент.-окт.}} + 0,018r_{\text{дек.}}$   | 1     | 0,0004   |
|  | $Y_4 = 21,734 + 31,312I_R + 7,631ГТК - 2,925t_{\text{июль}} + 1,179S_{\text{июнь}} + 0,084r_{\text{май}}$   | 0,99  | 0,0005   |
| СПК «Есенинский»<br>(широколиственные леса,<br>серые лесные почвы) | $Y_3 = 57,367 - 3,843t_{\text{сент.-окт.}} + 0,633t_{\text{нояб.}} + 0,509t_{\text{дек.}} - 0,462T_{\text{П2 узл. куц.}} + 0,093r_{\text{нояб.}} - 0,049r_{\text{сент.-окт.}}$  | 0,797 | 0,005    |
|  | $Y_4 = 28,603 + 1,515S_{\text{июнь}} - 1,107t_{\text{апр.}} - 0,53W_{20} + 0,455W_{20 \text{ пред.}} - 0,093r_{\text{апр.}} + 0,041r_{1000}$  | 0,768 | 0,009    |
| АО «Салтыки»<br>(лесостепь, черноземы<br>выщелоченные)             | $Y = 16,209 + 8,036I_R + 7,752S_{\text{июнь}} + 5,614 ГТК + 4,824t_{\text{май}} + 4,658t_{\text{январ.}} - 2,06n_{\text{от}} + 1,068t_{\text{март}} - 0,597r_{\text{апр.}} + 0,591r_{\text{дек.}} + 0,411t_{\text{нояб.}} + 0,407r_{\text{январ.}} - 0,392n_{1000} + 0,025r_{1000}$ | 0,994 | 0,007    |

*Примечание.*  $Y_3, Y_4$  – урожайность по «зимней» и «летней» моделям, ц/га;  
 $t_{\text{сент.-окт.}}, t_{\text{нояб.}}, t_{\text{дек.}}, t_{\text{январ.}}, t_{\text{март}}, t_{\text{апр.}}, t_{\text{май}}, t_{\text{июль}}$  – средняя температура сентября – октября, ноября, декабря, января, марта, апреля, мая и июля, °С;  
 $t_{\text{от}}$  – средняя температура за период оттепелей, °С;  
 $r_{\text{сент.-окт.}}, r_{\text{нояб.}}, r_{\text{дек.}}, r_{\text{январ.}}, r_{\text{март}}, r_{\text{апр.}}, r_{\text{май}}$  – сумма осадков сентября – октября, ноября, декабря, января, марта, апреля и мая, мм;  
 $T_{\text{П2 узл. куц.}}$  – расчетная минимальная температура почвы на глубине узла кущения, определенная по разработанной нами модели на основе данных метеостанции Павелец (вариант № 2 – с учетом осадков января), °С;  
 $n_{\text{от}}$  – количество зимних оттепелей;  
 $n_{1000}$  и  $r_{1000}$  – соответственно продолжительность периода достижения суммой биологически активных температур величины 1000 °С (дней после 1 июня) и сумма осадков за этот период, мм;  
 $S_{\text{май}}, S_{\text{июнь}}$  – индекс засухливости Д.И. Педь для мая и июня;  
 $W_{20}$  и  $W_{20 \text{ пред.}}$  – соответственно расчетные запасы влаги в пахотном (0–20 см) слое почвы в данный и предшествующий годы, мм;  
 $ГТК$  и  $I_R$  – соответственно гидротермический коэффициент Селянинова (коэффициент увлажнения вегетационного периода) и радиационный индекс сухости Будыко;  
 $\alpha$  – уровень значимости.

Единую зависимость, учитывающую одновременно условия как зимнего, так и летнего периодов, удалось получить только для черноземного юга области. Данная модель обладает наибольшей репрезентативностью для объяснения колебаний фактической урожайности озимой пшеницы, о чем свидетельствует величина  $R^2 = 0,999$ . Уравнения зависимости, разработанные для АО «Макеевский» и СПК «Есенинский», характеризуют отдельно вклад зимних и летних условий в формирование урожая. Это, однако, не снижает ценности полученных моделей, обладающих достаточно высокими коэффициентами детерминации.

Принимая во внимание близкие величины урожайности озимых, а также ее сходную амплитуду в зоне широколиственных лесов и лесостепной зоне, для

оценки роли ландшафтно-климатических различий представляется целесообразным провести сравнение факторов, влияющих на продуктивность агроценозов данных зон. При этом, как уже отмечалось выше, регрессионные коэффициенты позволяют оценить характер и масштаб влияния различных параметров климата на урожайность.

В числе факторов, оказывающих влияние на величину урожая в обеих почвенно-климатических зонах, важное место принадлежит характеристикам переходных сезонов, а именно средней температуре и количеству осадков сентября – октября и апреля. Для зоны широколиственных лесов корреляция данных показателей с урожайностью отрицательна, для лесостепного юга области аналогичная зависимость наблюдается лишь в отношении осадков апреля. Необходимо отметить, что установленный нами характер связи между продуктивностью озимых и гидротермическими параметрами переходных сезонов подтверждается результатами исследований других ученых. Так, В.М. Обухов<sup>8</sup> еще на дореволюционном материале установил существование положительной корреляции между сглаженным ходом температуры и осадков осенью и весной и величиной предстоящего урожая. Напротив, для лет с резкой динамикой данных параметров характерны пониженные урожаи. Таким образом, в данном случае мы имеем дело с устойчивой закономерностью, наблюдающейся на протяжении целого ряда десятилетий.

На выявленную общую закономерность, тем не менее, накладывают отпечаток ландшафтные особенности почвенно-климатических зон. Так, проблема весеннего переувлажнения на юге области стоит более остро: негативное влияние на урожайность осадков апреля здесь практически в семь раз выше, чем на северо-западе, в зоне широколиственных лесов. Это обусловлено застоем влаги от апрельских дождей в тектоническом прогибе, к которому приурочены земли АО «Салтыки». Раннее начало вегетации озимых на черноземах делают отрицательную корреляцию между температурой сентября – октября и апреля и величиной урожайности для юга области статистически незначимой. Этим же, по-видимому, объясняется статистически достоверная положительная корреляция между урожайностью и температурой мая.

Урожайность озимых в значительной степени определяется также условиями перезимовки. При определенном сходстве характера влияния климатических факторов на продуктивность агроценозов масштабы данного влияния заметно различаются для конкретных ландшафтных регионов. Так, воздействие температуры ноября на урожайность зерновых в Салтыках оказывается в 1,5 раза менее значимым, чем в Константинове. Следовательно, опасность вымерзания озимых в ноябре на юге области сравнительно неве-

---

<sup>8</sup> Обухов В.М. Урожайность и метеорологические факторы : моногр. М. : Госпланиздат, 1949.

лика, что объясняется влиянием псевдоадиабатических процессов в тылу Среднерусской возвышенности (следует заметить, что именно в Рязске зарегистрированы максимальные летние температуры для всего Рязанского региона <sup>9</sup>).

Положительная корреляция урожайности в зоне широколиственных лесов с температурой и осадками первой половины зимы (ноябрь и декабрь) указывает на возможное вымерзание озимых в период с низкими температурами и незначительной мощностью снежного покрова. Аналогичная зависимость для Салтыков сдвинута к середине зимы (на январь), что связано с меньшим общим количеством осадков на юге области, которые даже в январе не полностью теплоизолируют почву.

Особо следует остановиться на такой характеристике зимнего сезона, как минимальная температура почвы на глубине узла кущения озимых. Это комплексный параметр, значение которого определяется интенсивностью и продолжительностью действия морозов, высотой снежного покрова, продолжительностью его существования и характером распределения на полях, глубиной промерзания почвы <sup>10</sup>. Данный показатель, нередко присутствующий в качестве предиктора в прогностических уравнениях, оценивающих влияние зимних условий на состояние озимых, может являться лимитирующим фактором урожайности.

Воспользовавшись приведенными в работе <sup>11</sup> минимальными температурами почвы на глубине узла кущения озимых для Рязанской области за 1976–1989 годы, а также данными метеостанции Елатьма, нами на основе регрессионного анализа сделан следующий вывод: минимальная температура почвы на глубине узла кущения в наибольшей степени зависит от температуры и осадков января и от количества оттепелей за зиму (табл. 2). Положительная корреляция минимальной температуры почвы с температурой января и количеством оттепелей совершенно очевидна и не требует пояснений. Отрицательную корреляцию данной температуры с осадками января, а по сути с мощностью снежного покрова, можно объяснить теплоизолирующими свойствами последнего. Снег экранирует почву от волн тепла и, следовательно, препятствует возможному влиянию оттепелей на минимальную температуру почвы.

*Таблица 2*

Зависимость минимальной температуры почвы  
на глубине узла кущения озимых от климатических факторов  
по результатам регрессионного анализа

---

<sup>9</sup> Природа Рязанской области : моногр. / В.А. Кривцов [и др.] ; Ряз. гос. ун-т им. С.А. Есенина. Рязань, 2008.

<sup>10</sup> Уланова Е.С. Методы агрометеорологических прогнозов : моногр. Л. : Гидрометеоздат, 1959.

<sup>11</sup> Особенности агроклиматических условий Рязанской области и их влияние на урожайность сельскохозяйственных культур. Рязань, 1988.

| Уравнение регрессии  | $R^2$ | $\alpha$ |
|--|-------|----------|
| $T_{E \text{ узл. куц.}} = -0,473 + 0,644t_{\text{январь}} + 0,289n_{\text{от}} - 0,069r_{\text{январь}}$      | 0,845 | 0,0005   |
| $T_{П1 \text{ узл. куц.}} = 3,55 + 0,707t_{\text{январь}} + 0,496t_{\text{февраль}}$                           | 0,808 | 0,0003   |
| $T_{П2 \text{ узл. куц.}} = 3,784 + 0,692t_{\text{январь}} + 0,416t_{\text{февраль}} - 0,034r_{\text{январь}}$ | 0,836 | 0,0007   |

*Примечание.*  $T_{E \text{ узл. куц.}}$  – расчетная минимальная температура почвы на глубине узла кущения, определенная по разработанной нами модели на основе данных метеостанции Елатьма;  
 $T_{П1 \text{ узл. куц.}}$  – то же на основе данных метеостанции Павелец (вариант № 1);  
 $T_{П2 \text{ узл. куц.}}$  – то же на основе данных метеостанции Павелец (вариант № 2);  
 $t_{\text{январь}}, t_{\text{февраль}}$  – средняя температура января, февраля, °С;  
 $r_{\text{январь}}$  – сумма осадков января, мм;  
 $n_{\text{от}}$  – количество зимних оттепелей;  
 $\alpha$  – уровень значимости.

По данным метеостанции Павелец, получена несколько иная совокупность факторов, определяющих минимальную температуру почвы на глубине узла кущения озимых (табл. 2), однако логика рассуждений, приведенная выше, сохраняется и здесь. Таким образом, указанный температурный параметр непосредственно отражает режим зимних оттепелей, что учитывалось нами при интерпретации результатов регрессионного анализа.

Как свидетельствуют данные таблицы 1, в регрессионных уравнениях для почвенно-климатических зон широколиственных лесов и лесостепи присутствуют показатели, характеризующие воздействие оттепелей на состояние озимых: либо минимальная температура почвы на глубине узла кущения (СПК «Есенинский»), либо количество оттепелей за зиму (АО «Салтыки»). Следствием оттепелей может быть образование притертой к почве ледяной корки, вызывающей гибель озимых. Этим объясняется не очевидное на первый взгляд отрицательное влияние оттепелей на урожай. При этом интенсивность данного влияния на юге области в четыре раза выше, поскольку снежный покров здесь менее мощный и вероятность оттепелей выше. По этой же причине возможно подмерзание озимых в слишком холодном марте. В зоне широколиственных лесов погодные условия марта на урожайность пшеницы не влияют.

В связи с рассмотренным выше механизмом воздействия оттепелей на урожайность озимых представляется целесообразным вспомнить одну из прогнозных оценок, согласно которой в результате глобального потепления «на большей части территории Европейской России установятся умеренно мягкие зимы, обеспечивающие нормальные условия перезимовки озимых зерновых культур»<sup>12</sup>. Данные, полученные нами, опровергают такой общий вывод. Умеренно мягкие зимы, ставшие для нашего региона нормой начиная с 1980-х годов, для которых типична повышенная частота оттепелей и уменьшение мощности

<sup>12</sup> Израэль Ю.А. Моделирование влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства России / Ю.А. Израэль, О.Д. Сиротенко // Метеорология и гидрология. 2003. № 6.



снежного покрова, негативно сказываются на состоянии озимых, вызывая значительные их повреждения за счет образования притертой к почве ледяной корки.

Дальнейший анализ факторов урожайности позволяет заключить, что для весенне-летнего периода вегетации чрезвычайно важно распределение тепла и влаги по фазам жизненного цикла. По-видимому, если в начальные периоды весеннего возобновления вегетации для озимой пшеницы особенно важен фактор влаги, то в июне повышаются требования к поглощению тепла и наиболее благоприятными становятся условия умеренной засухи.

В уравнении зависимости для зоны широколиственных лесов фигурируют также характеристики почвенного увлажнения: влагозапасы пахотного (0–20 см) слоя почвы в данный и предшествующий годы. При этом почвенная влага предыдущего года активно используется озимыми весной при возобновлении вегетации, и ее содержание в почве в определенной мере влияет на будущий урожай. Влагозапасы почвы данного года отрицательно коррелируют с урожайностью, что указывает на негативное воздействие почвенного переувлажнения в данном году. Влияние фактора почвенного увлажнения на лесостепном юге области незначимо, в связи с чем он исключен из соответствующего регрессионного уравнения (табл. 1).

Определенный интерес представляет в полученных уравнениях место зональных климатических индексов увлажнения.

Вопреки ожиданиям, данные индексы не фигурируют в моделях для северо-запада области. Пробное включение их в модель привело к отрицательным результатам. Это, однако, вполне объяснимо положением территории вблизи Константиново в «ядре типичности» своей зоны. Логично предположить, что при перемещении к пограничным, экотонным регионам информативность данных показателей должна возрасти. Данная идея получила подтверждение в модели продуктивности озимых, разработанной для зоны лесостепи (АО «Салтыки»). Положительная корреляция урожайности лесостепных агроценозов с радиационным индексом сухости Будыко и гидротермическим коэффициентом Селянинова получает дополнительное усиление под влиянием азонального ландшафтного фактора – тектонического. Действительно, для территории, приуроченной к оси Салтыковского прогиба, особое значение приобретают климатические факторы, определяющие интенсивность испарения влаги и способствующие продуктивному ее использованию в период вегетации.

Урожайность озимых в Мещере представляется целесообразным рассмотреть особо. Хотя общие закономерности, выявленные для зон широколиственных лесов и лесостепи, прослеживаются и на севере области (например, положительная корреляция урожайности с температурой и осадками декабря и отрицательная – с аналогичными показателями для сентября – октября), однако лимитирующим фактором урожайности для данной территории, приуроченной к центральной ложбине стока Мещерской низменности, является переувлажнение. Это объясняет положительную реакцию агроценозов на летнее иссушение (положительная корреляция урожайности с индексом засушливости Д.И. Педь для июня, а также с радиационным индексом сухости

Будыко и гидротермическим коэффициентом Селянинова). Кроме того, чрезвычайно важными являются условия снеготаяния: растянутый период схода снега, чему способствует повышенная температура марта и время зимних оттепелей, благоприятствует постепенному просачиванию избыточной влаги в глубь почвы и тем самым уменьшает ее увлажненность к начальному периоду весеннего возобновления вегетации.

Примечательно, что выводы о лимитирующем характере переувлажнения, полученные нами с помощью регрессионного анализа, находят дополнительное подтверждение в региональной прессе 1970-х годов, когда в Мещере проводилась масштабная осушительная мелиорация и именно совхоз «Макеевский» располагал самой большой в Клепиковском районе площадью мелиорированных земель<sup>13</sup>. В публикациях тех лет можно прочитать о том, что «почвы Мещерской низменности... могут давать кубанские урожаи»<sup>14</sup>, а известный русский писатель Б.А. Можаяев, рызанец по происхождению, назвал осушенные земли Макеевского мыса «золотым дном»<sup>15</sup>. Положительная роль мелиоративных работ особенно проявилась в производстве кормов. В 1975 году совхоз «Макеевский» достиг по данному показателю лучшего в районе результата<sup>16</sup>. Стабильной стала и урожайность яровой и озимой пшеницы<sup>17</sup>. С гектара осушенных земель ежегодно получали по 30 центнеров зерновых<sup>18</sup>.

Следует заметить, что уравнения зависимости для АО «Макеевский» получены с использованием ряда данных по фактической урожайности озимых за 1997–2006 годы. Это был период, когда положительное воздействие осушительной мелиорации 1970-х годов уже не проявлялось и урожайность сельскохозяйственных угодий была близка к продуктивности естественных фитоценозов в данных ландшафтно-климатических условиях.

Работа, аналогичная выявлению связи урожайности озимых с ландшафтно-климатическими факторами, была также проделана для сенокосов окской поймы в районе сел Константиново и Терехово. Выбор именно этих участков связан с принципиальными различиями пойменного режима на участках долины Оки, приуроченных к периферии Константиновского тектонического блока и оси Владимиро-Шиловского прогиба. Пойма в районе села Константинова высокая, поскольку приурочена к зоне тектонического поднятия. Это создает определенные особенности пойменного режима, влияющие на продуктивность сенокосов (в частности, на данном участке резко снижены масштабы весенних разливов, и уровень воды в Оке в период половодья обычно колеблется фактически в контурах русла). Пойма Оки в Шиловском районе (в частности, в окрестностях села Терехова), наоборот, соответствует наиболее активному в Рязанском регионе тектоническому прогибу. В этой

---

<sup>13</sup> Бряков В., Артемов И. Эффект осушенного гектара // Приокская правда. 1975. 14 нояб.

<sup>14</sup> Тараскин А. Мещера открывает клады // Приокская правда. 1977. 8 июля.

<sup>15</sup> Можаяев Б.А. Собр. соч. : в 4 т. М. : Художественная литература, 1990. Т. 4.

<sup>16</sup> Комолов А. И стало болото урожайным полем // Приокская правда. 1976. 11 апр.

<sup>17</sup> Бряков В. Эффект осушенного гектара.

<sup>18</sup> Тараскин А. Ключ к высокой эффективности // Приокская правда. 1978. 16 июня.

связи представляется целесообразным сопоставить закономерности продуктивности сенокосов для выбранных территорий.

Результаты моделирования представлены в виде уравнений зависимости урожайности сенокосов от гидроклиматических характеристик (табл. 3).

По-видимому, сенокосы, как и озимые, чувствительны к повышенной резкости термического хода осенью, реагируя на нее некоторым снижением урожайности. При этом данная зависимость отчетливо прослеживается на участке окской поймы вблизи Константинова. Для поймы в районе Терехова аналогичная связь несколько слабее, и в процессе выявления зависимости урожайности сенокосов от ряда других факторов мы вынуждены были удалить фактор температуры сентября – октября из итогового уравнения.

Таблица 3

Зависимость урожайности сенокосов от климатических факторов по результатам регрессионного анализа

| Объект исследования                             | Уравнение зависимости   | $R^2$ | $\alpha$ |
|---|---|-------|----------|
| Константиново (условия тектонического поднятия) | $Y_3 = 22,782 - 2,814t_{OT} - 1,016t_{сент-окт} + 0,598t_{дек.} - 0,529t_{март} - 0,207t_{нояб.}$ | 0,858 | 0,001    |
|   | $Y_4 = 2,632 + 55,819C_u - 1,273S_{май} - 1,025S_{июль} - 0,911S_{июнь}$                          | 0,873 | 0,0002   |
| Терехово (условия тектонического опускания)     | $Y_3 = 24,789 - 1,558t_{OT} - 0,954t_{нояб.} + 0,394t_{январ.} - 0,152r_{дек.} - 0,081r_{нояб.}$  | 0,930 | 0        |
|   | $Y_4 = 1,411 + 17,578C_2 + 10,160I_R - 1,617S_{июль} - 1,353S_{июнь} + 0,793T_{П2\_узл. куц.}$    | 0,745 | 0,015    |

Примечание.  $Y_3, Y_4$  – урожайность по «зимней» и «летней» моделям, ц/га;  
 $t_{сент-окт.}, t_{нояб.}, t_{дек.}, t_{январ.}, t_{март}$  – средняя температура сентября – октября, ноября, декабря, января, марта, °С;

$r_{нояб.}, r_{дек.}$  – сумма осадков ноября и декабря, мм;

$t_{OT}$  – средняя температура в период оттепелей, °С;

$S_{май}, S_{июнь}, S_{июль}$  – индекс засушливости Д.И. Педь для мая, июня и июля;

$C_u, C_2$  – величина годового стока рек Истья и Гусь, км<sup>3</sup>/год;

$T_{П2\_узл. куц.}$  – расчетная минимальная температура почвы на глубине узла кущения, определенная по разработанной нами модели на основе данных метеостанции Павелец (вариант № 2 – с учетом осадков января);

$I_R$  – радиационный индекс сухости Будыко;

$\alpha$  – уровень значимости.

Условия для весеннего половодья, играющего исключительно важную роль для пойменных сенокосов, закладываются в зимний период. Так, необходимым условием хорошего разлива рек весной является промерзание почвы в ноябре, препятствующее преждевременному просачиванию влаги в глубь почвы. Этим объясняется отрицательная корреляция урожайности сенокосов с температурой и осадками данного месяца. При слишком низких

температурах в декабре возможно, однако, вымерзание растений высокой поймы, в связи с чем взаимосвязь продуктивности пойменных лугов с температурой декабря, наоборот, прямая, в отличие от ноябрьской температуры. Характерно, что эффект подобной зависимости для сенокосов в районе Терехова смещается с декабря на январь. Это связано с меньшей общей мощностью снежного покрова и обусловлено типичной особенностью крупных депрессий рельефа – уменьшением количества осадков под влиянием адиабатического опускания воздушных масс.

Сенокосы окской поймы отрицательно реагируют на зимние оттепели, причем негативное влияние последних на северо-западе области в 1,5 раза выше, чем в ее центральной части. Это обусловлено относительно пониженным воздействием на пойму в районе Терехова адвекций тепла, вызывающих значительное зимнее потепление в первую очередь на северо-западе области. Кроме того, здесь же проявляется отрицательное воздействие на урожайность сенокосов повышенной мартовской температуры, также обусловленной адвекциями тепла с запада. Повышение температур зимой и в период снеготаяния приводит к значительному расходу воды в зимнюю межень, что снижает величину предстоящего половодья.

Если озимые предъявляют требования к теплу и влаге в зависимости от фазы жизненного цикла, то пойменные сенокосы одинаково чувствительны к засухе в течение всего весенне-летнего периода вегетации. При этом для поймы, приуроченной к тектоническому прогибу, опасность летнего иссушения выше из-за меньшего количества осадков, что вызвано преобладающими здесь нисходящими движениями воздуха. В то же время для сенокосов «высокой» поймы (район села Константинова) более губительной оказывается майская засуха. Отсутствие данной зависимости в районе села Терехова объясняется значительно более обильным увлажнением поймы в мае в период весеннего половодья.

Радиационный индекс сухости Будыко, тем не менее, положительно коррелирует с урожайностью сенокосов тереховской поймы, поскольку данный показатель характеризует не условия засушливости, а, как указывалось выше для АО «Салтыки», интенсивность испарения влаги, способствующую продуктивному ее использованию. Таким образом, в функционировании агроценозов как пойм, так и водоразделов отмечены сходные черты, обусловленные влиянием тектонических условий на гидродинамику и режим почвенно-грунтовых вод, что наиболее выражено в тектонических прогибах (Владими́ро-Шиловском и Салтыковском).

Особо следует остановиться на таком факторе урожайности, как величина ежегодного стока рек ( $\text{км}^3/\text{год}$ ). Поскольку сенокосы находятся в окской пойме, логично предположить, что их урожайность зависит от годового стока Оки. Однако результаты регрессионного анализа совершенно очевидно иллюстрируют связь урожайности сенокосов в Константинове с величиной ежегодного стока Истья, а в Терехове – с аналогичным показателем для реки Гусь.

Это свидетельствует о том, что разные участки поймы ведут себя по-особому, а сходство проявляется в пределах некоторых крупных тектонических структур, определяющих особенности гидродинамики. Истья протекает по отрогам Среднерусской возвышенности, что аналогично ландшафтным условиям Константиновского тектонического блока, который также является периферийной частью указанной возвышенности. Долина реки Гусь приурочена к субмеридиональному Владимиро-Шиловскому прогибу, в пределах которого находится и Тереховская пойма Оки, а южнее – также долина Пары. Единство водного режима данных рек и рассмотренных участков окской поймы обусловлено, следовательно, тектоническим и геоморфологическим факторами. При этом связь урожайности сенокосов окской поймы с гидродинамикой не должна исчерпываться лишь установлением зависимости от такого очевидного фактора, как уровень воды в Оке в период половодья. Необходим учет общей ландшафтно-гидрологической обстановки, что, в частности, может быть формализовано через сток смежных малых рек.

С использованием полученных выше зависимостей продуктивности озимых и пойменных сенокосов от комплекса факторов была проведена реконструкция урожайности агроценозов за период с 30-х по 80-е годы XX века. При этом в ряде случаев применялись несколько видоизмененные модели, включающие меньшее число факторов, проявляющихся наиболее стабильно и имеющих максимальный масштаб воздействия на урожайность.

На рисунке 2 представлена реконструкция продуктивности озимой пшеницы для основных природных зон Рязанской области. Несмотря на хаотичные год от года колебания урожайности, при аппроксимации кривых урожайности полиномом 6-й степени отчетливо проявляется 35-летний «брикнеровский цикл» увлажнения. Некоторое возрастание продуктивности озимых в настоящее время логично связывать с тенденцией к общему увеличению увлажнения. В то же время на протяжении XX века выделяются периоды (например, 70-е годы), когда климатически обусловленная урожайность была выше, чем на современном этапе.

Таким образом, благоприятные для сельского хозяйства эффекты глобального потепления, о которых так много говорят, на урожайность озимой пшеницы в Рязанской области не влияют. Более того, линия тренда отчетливо показывает тенденцию к снижению продуктивности в среднем на 4 ц/га по сравнению с серединой 30-х годов.

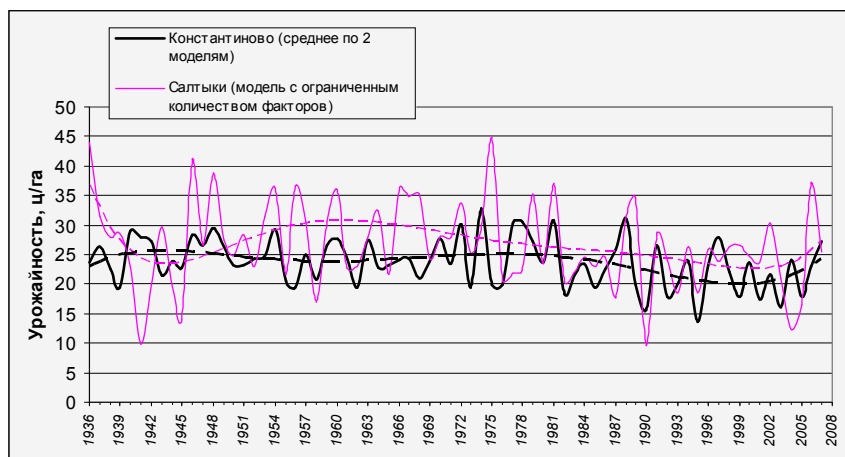


Рис. 2. Расчетная урожайность озимой пшеницы для зон широколиственных лесов (Константиново) и лесостепи (Салтыки)

*Примечание.* Пунктиром показаны полиномиальные тренды соответствующих расчетных кривых урожайности.

На рисунке 3 представлены результаты реконструкции урожайности озимых по «летней» и «зимней» моделям для СПК «Есенинский» (зона широколиственных лесов). Современная взаимосвязь климатических факторов и урожайности сформировалась в самом начале 1980-х годов, и с тех пор остается неизменной. На это указывает минимизация расхождений в расчетах по двум независимым моделям для данного периода (рис. 3).

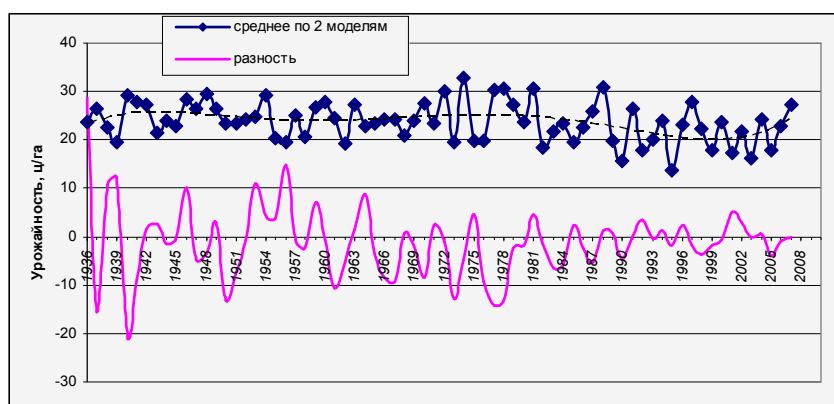


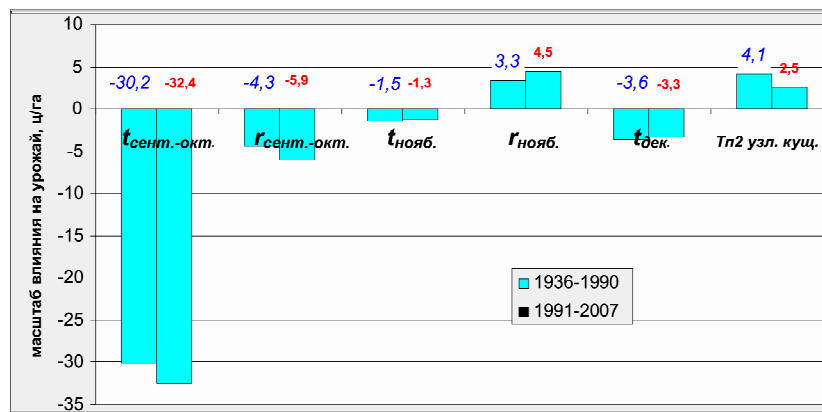
Рис. 3. Результаты моделирования урожайности озимой пшеницы для СПК «Есенинский» и разность в расчетах по двум независимым моделям

Ранее величина разности в расчетах была принципиально выше, что обусловлено снижением адекватности разработанных нами моделей условиям предшест-

вующих климатических эпох. Данный вывод позволяет более определенно говорить о временных рамках начала реакции биологических систем на третий период климатической динамики XX века – фазу потепления – в Рязанском регионе. Согласно полученным результатам, биологический эффект «глобального потепления», объективной границей которого М.И. Будыко в работе «Климат в прошлом и будущем» называет начало 1970-х годов, в Рязанской области, по-видимому, стал проявляться в начале 1980-х.

В числе факторов, вызывающих уменьшение климатически обусловленной урожайности, в первую очередь следует назвать увеличение температуры и количества осадков сентября – октября, а также повышение частоты оттепелей (рис. 4). В некоторой степени снижение урожайности компенсируется ростом температуры ноября, декабря и осадков ноября, однако данная компенсация далеко не полная. В теплый период года снижение урожайности вызвано увеличением средней температуры и количества осадков апреля, возрастанием засушливости в мае, а также ростом увлажнения в июне, когда зерновые, напротив, наиболее требовательны к теплу.

а) зимние факторы



б) летние факторы

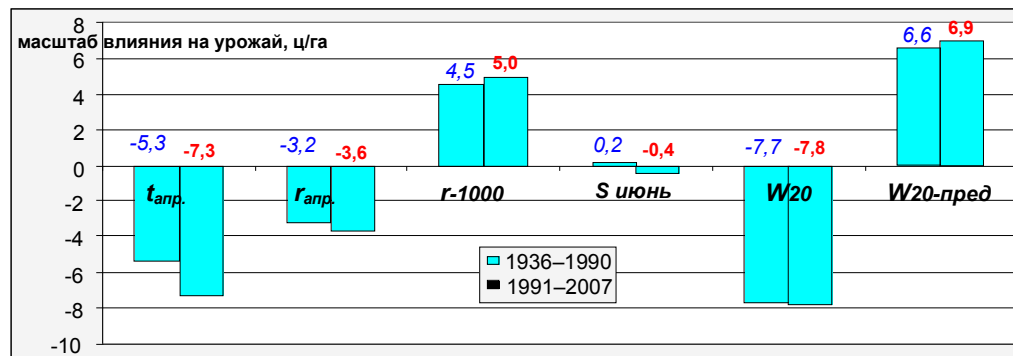


Рис. 4. Вклад отдельных гидроклиматических факторов в динамику урожайности озимой пшеницы (на примере СПК «Есенинский»)

*Примечание.*  $t_{сент.-окт.}$ ,  $t_{нояб.}$ ,  $t_{дек.}$ ,  $t_{апр.}$  – температура сентября – октября, ноября, декабря, апреля, °С;  
 $r_{сент.-окт.}$ ,  $r_{нояб.}$ ,  $r_{апр.}$  – осадки сентября – октября, ноября, апреля, мм;

$T_{П2}$  узл. куц. – расчетная минимальная температура почвы на глубине узла кушения, определенная по разработанной нами модели на основе данных метеостанции Павелец (вариант № 2 – с учетом осадков января);

$r-1000$  – сумма осадков за период достижения суммой биологически активных температур величины 1000 °С, мм;

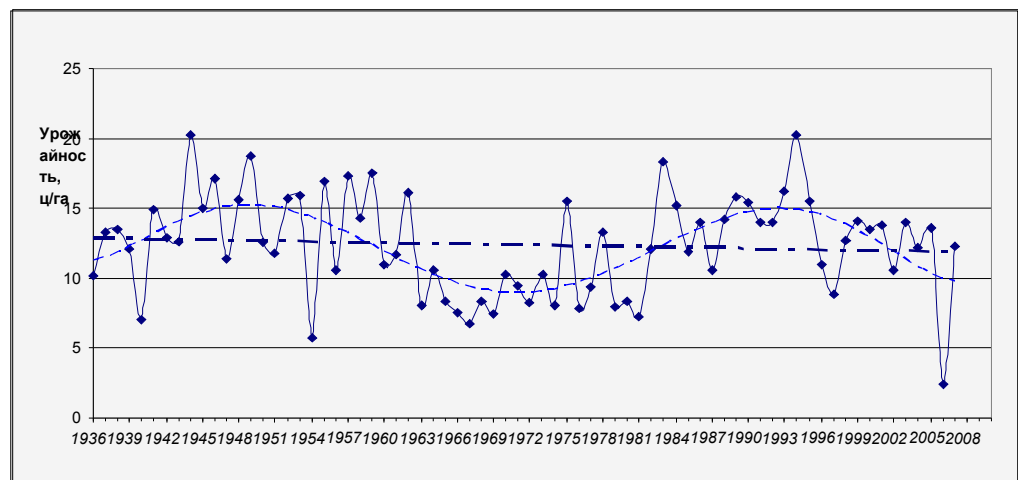
$S_{июнь}$  – индекс засушливости Д.И. Педь для июня;

$W_{20}$  и  $W_{20}$  пред. – соответственно расчетные влагозапасы в пахотном (0–20 см) слое почвы в данный и предшествующий годы, мм.

Таким образом, современный климатический этап неблагоприятен для озимых прежде всего из-за особенностей распределения тепла и влаги в сезон вегетации, повышенной частоты зимних оттепелей, а также обострения погодной динамики переходных сезонов.

Анализ реконструированных рядов урожайности сенокосов за XX век позволяет сделать вывод об относительно низких ее величинах на современном этапе (рис. 5). Более того, такие низкие урожаи сенокосов, которые наблюдались, например, в 2002 и 2006 годах, не фиксировались даже в засушливые 1930–1940-е годы. Особенно заметна тенденция к падению урожаев сена в среднем на 1,5 ц/га по сравнению с серединой 1930-х годов на «пойме высокого уровня» в области тектонического поднятия (район села Константинова). На Тереховской «сниженной» пойме данная величина несколько меньше – 0,6 ц/га. При этом урожайность сенокосов на пойме в районе Терехова в целом отличается большей регулярностью и предсказуемостью вследствие лучшего увлажнения, а на «пойме высокого уровня» характеризуется повышенной хаотичностью. Так, для сенокосов «сниженной» поймы достаточно четко прослеживаются регулярные волны 35-летних колебаний урожайности, соответствующих «брикнеровскому циклу» увлажнения, тогда как для сенокосов «поймы высокого уровня» аналогичные колебания существенно размыты.

а) Терехово





б) Константиново

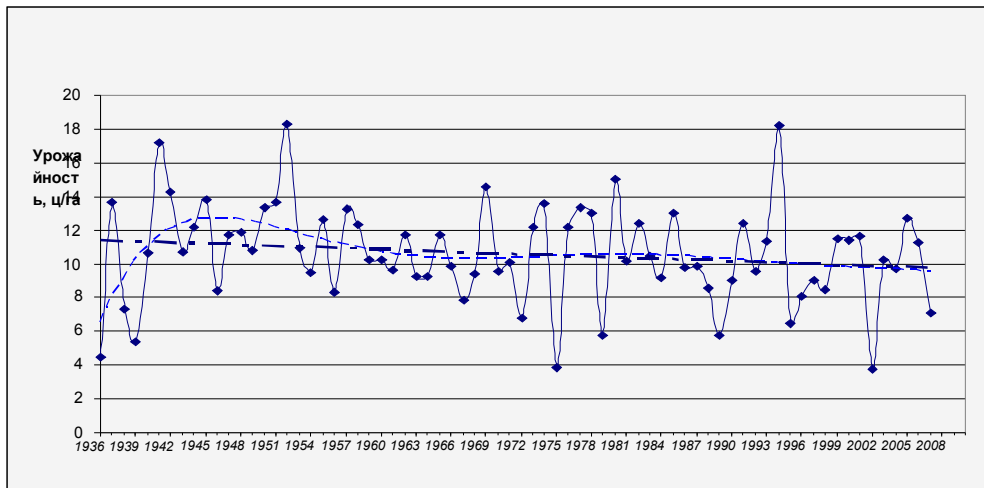
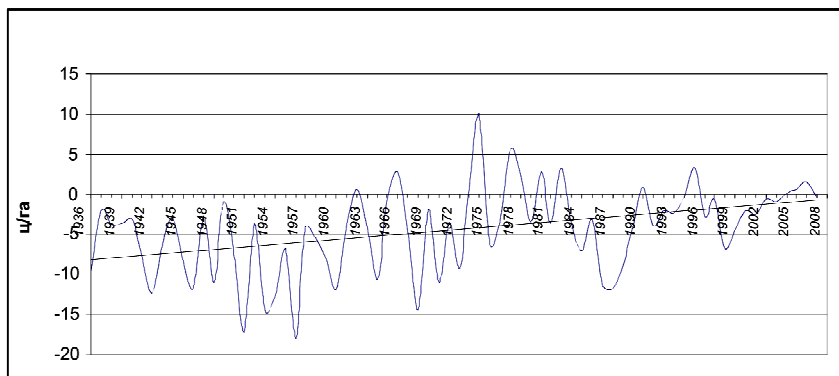


Рис. 5. Расчетная продуктивность сенокосов поймы Оки на участке тектонического прогиба (— — —) и в условиях тектонического поднятия (- · - ·) и ее полиномиальный и линейный тренды

На рисунке б представлена арифметическая разность результатов расчета продуктивности пойменных сенокосов по «зимней» и «летней» моделям, приведенных в таблице 3. При этом данные расчетов по модели, учитывающей влияние зимних факторов, вычитались из аналогичных значений, полученных по «летней» модели. Отрицательная разность в целом характеризует условия зимнего сезона как благоприятные для формирования урожая. При этом фактором, снижающим продуктивность сенокосов, является летняя засуха. На основании рисунка б можно предположить, что негативное воздействие летней засухи является наиболее типичным. Однако в последние годы разность увеличивается, следовательно, условия зимнего сезона также становятся менее благоприятными, что связано прежде всего с меньшей высотой половодья – отличительной чертой меняющегося климата.

а) Терехово



б) Константиново

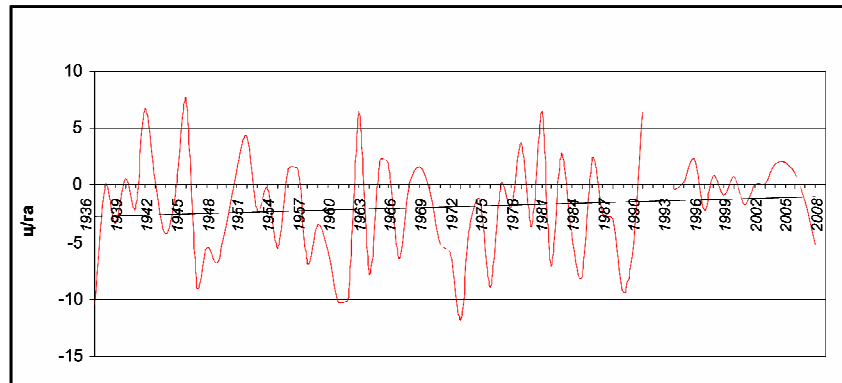


Рис. 6. Арифметическая разность результатов расчета продуктивности сенокосов поймы Оки, проведенного с использованием «летних» и «зимних» моделей для участка тектонического прогиба (а) и в условиях тектонического поднятия (б) и ее линейный тренд

Сравнение динамики урожайности агроценозов с полученными ранее аналогичными данными по продуктивности зональных растительных сообществ Рязанской области<sup>19</sup> свидетельствует о прямо противоположных тенденциях их изменения (рис. 7). В отличие от сельскохозяйственных угодий естественные фитоценозы в течение XX века устойчиво увеличивали свою продуктивность, достигнув к настоящему времени показателей, типичных для западноевропейских широколиственных лесов (12–14 *т/га* против 10 *т/га* в среднем за первую половину XX века).

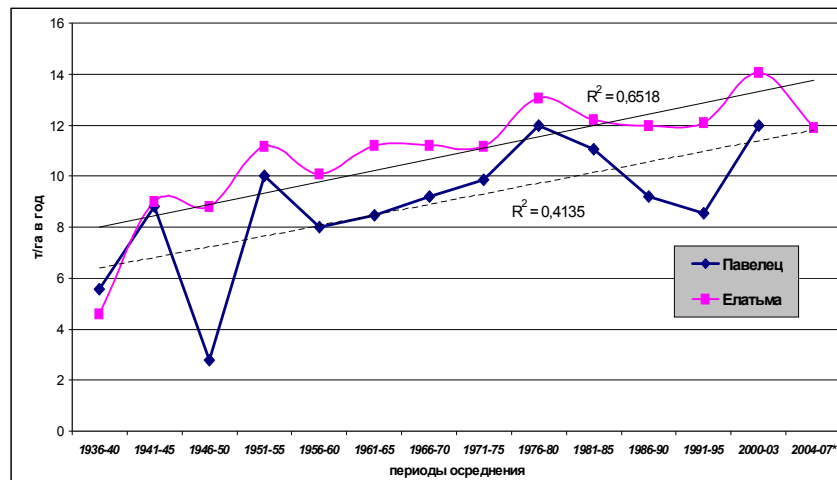


Рис. 7. Колебания и тренды расчетных величин продуктивности зональных фитоценозов Рязанского региона в зависимости от ландшафтных условий и климатической динамики<sup>20</sup>

<sup>19</sup> Природа Рязанской области.

<sup>20</sup> Там же.

*Примечание.* Расчеты выполнены на основе соотношений первичной продуктивности лесных экосистем с радиационным балансом и радиационным индексом сухости<sup>21</sup>; данные метеостанции Павелец характеризуют условия лесостепной зоны Рязанской области, метеостанции Елатьма – зон широколиственных и смешанных лесов; R<sup>2</sup> – коэффициенты детерминации для линейных трендов.

Таким образом, в условиях современной климатической динамики ключевыми факторами, определяющими продуктивность озимых Рязанского региона, являются зимние оттепели, гидротермические характеристики переходных сезонов и первой половины зимы, а также распределение тепла и влаги в период весенне-летней вегетации. Пойменные сенокосы чрезвычайно требовательны, помимо прочего, к условиям летнего увлажнения. Значительный масштаб различий факторов урожайности в пределах области обусловлен зональными и азональными ландшафтными особенностями. В числе последних для пойменных сенокосов, например, можно выделить относительную высоту поймы над межениным уровнем Оки (обусловлена тектонически) и гидродинамические характеристики малых рек, близких по ландшафтным условиям к рассмотренным участкам поймы. Для Мещеры характерно одновременное влияние на продуктивность агроценозов зональных (повышенное увлажнение) и азональных (положение в центральной ложбине стока) факторов.

Анализ реконструированных рядов урожайности озимых и сенокосов за XX век позволяет, вопреки широко распространенному мнению, однозначно охарактеризовать изменения климата в эпоху «глобального потепления» как неблагоприятные для сельского хозяйства. Следовательно, урожайность агроценозов в отличие от увеличивавших свою продуктивность в течение XX века естественных сообществ – значительно более сложный параметр, изменения которого обусловлены совокупным действием широкого комплекса факторов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бряков, В. Эффект осушенного гектара [Текст] / В. Бряков, И. Артёмов // Приокская правда. – 1975. – 14 нояб.
2. Будыко, М.И. Климат в прошлом и будущем [Текст] : моногр. – Л. : Гидрометеоиздат, 1980. – 350 с.
3. Израэль, Ю.А. Моделирование влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства России [Текст] / Ю.А. Израэль, О.Д. Сиротенко // Метеорология и гидрология. – 2003. – № 6. – С. 5–17.
4. Коломыц, Э.Г. Региональная модель глобальных изменений природной среды [Текст] : моногр. – М. : Наука, 2003. – 371 с.
5. Комолов, А. И стало болото урожайным полем [Текст] // Приокская правда. – 1976. – 11 апр.
6. Мазиков, В.М. Влияние совокупности природных факторов на функционирование сельскохозяйственных геосистем [Текст] / В.М. Мазиков, М.А. Ермошкина // Известия РАН. Сер. География. – 1994. – № 3. – С. 49–60.

---

<sup>21</sup> Коломыц Э.Г. Региональная модель глобальных изменений природной среды.

7. Можаяев, Б.А. Собр. соч. [Текст] : в 4 т. – М. : Художественная литература, 1990. – Т. 4. – 252 с.
8. Обухов, В.М. Урожайность и метеорологические факторы [Текст] : моногр. – М. : Госпланиздат, 1949. – 318 с.
9. Особенности агроклиматических условий Рязанской области и их влияние на урожайность сельскохозяйственных культур [Текст]. – Рязань, 1988. – 27 с.
10. Павлова, М.Д. Практикум по сельскохозяйственной метеорологии [Текст]. – М. : Колос, 1968. – 200 с.
11. Природа Рязанской области [Текст] : моногр. / В.А. Кривцов [и др.] ; Ряз. гос. ун-т им. С.А. Есенина. – Рязань, 2008. – 407 с.
12. Сиротенко, О.Д. К оценке агроклиматических ресурсов Русской равнины в связи с глобальным потеплением климата [Текст] / О.Д. Сиротенко, А.А. Величко, В.А. Долгий-Трач, В.А. Климанов // Известия АН СССР. Сер. География. – 1990. – № 6. – С. 29–38.
13. Тараскин, А. Ключ к высокой эффективности [Текст] // Приокская правда. – 1978. – 16 июня.
14. Тараскин, А. Мещера открывает клады [Текст] // Приокская правда. – 1977. – 8 июля.
15. Уланова, Е.С. Методы агрометеорологических прогнозов [Текст] : моногр. – Л. : Гидрометеиздат, 1959. – 280 с.

**S.A. Tobratov, O.S. Zheleznova**

#### **THE PRODUCTIVITY OF AGROCENOSES AND FACTORS OF LANDSCAPE AND CLIMATE**

On the basis of information on the productivity of grain crops (winter wheat) and streamside haymakings of the Ryazan region the key factors of modern climate, determining the size of the bioproductivity of agrocenoses of different type, are exposed. The estimation of landscape distinctions of the exposed factors is given. The conducted analysis of the reconstructed rows of the productivity of winter wheat and haymakings in the twentieth century allows on the whole to describe the changes of climate in the epoch of global warming as unfavorable for agriculture.

*agrocenoz, climate, landscape, productivity.*