

551
P-258



Ю.Л. РАУНЕР

**КЛИМАТ
И УРОЖАЙНОСТЬ
ЗЕРНОВЫХ
КУЛЬТУР**



ИЗДАТЕЛЬСТВО • НАУКА •

ПРОБЛЕМЫ
КОНСТРУКТИВНОЙ
ГЕОГРАФИИ

Редакционная коллегия:

*И. П. Герасимов (председатель),
В. С. Преображенский (заместитель председателя),
Л. С. Абрамов (ответственный секретарь),
С. В. Зонн, И. В. Комар, Г. М. Лапто,
Н. Ф. Леонтьев, Я. Г. Машибиц*

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ ГЕОГРАФИИ

551
D-258

Ю. Л. РАУНЕР

КЛИМАТ
И УРОЖАЙНОСТЬ
ЗЕРНОВЫХ
КУЛЬТУР

550279

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

МОСКВА 1981

551+633.1

УДК 551.581+631.165

Раунер Ю. Л. Климат и урожайность зерновых культур. М.: Наука, 1981.

В книге с позиций современных климатологических методов рассматривается воздействие неблагоприятных погодно-климатических условий на многолетний режим продуктивности растительного покрова и урожайность сельскохозяйственных культур. Приводятся данные за XIX—XX вв. по СССР, США, Канаде, Западной Европе, Японии. Анализируется временная динамика засушливых явлений в указанных странах и за соответствующий период. Сделан ряд выводов общетеоретического характера, а также даны некоторые прикладные рекомендации. Табл. 79. Ил. 78. Библ. 200 назв.

Ответственный редактор
Н. И. БАЗИЛЕВИЧ

Р 20807—311
055(02)—81 360-81. 1903040000



© Издательство «Наука», 1981 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В результате многолетних работ по Международной Биологической программе впервые в мировой науке были количественно оценены суммарные запасы растительных ресурсов биосферы, а также годовые приросты многих видов естественной и культурной растительности на различных континентах, формирующиеся при некоторых средних климатических условиях.

Между тем хорошо известно, что первичный продукционный процесс биосферы и его конечный результат — нетто-продукция органической биомассы растений в сильнейшей степени зависят от сложных комплексов погодно-климатических факторов. Эти комплексы, в свою очередь, очень динамичны и характеризуются весьма резкой изменчивостью в многолетнем режиме. В результате при некотором среднем уровне биологической продуктивности экосистем возникают ее естественные флуктуации, которые в отдельные годы или группы лет могут принимать экстремальный характер. Последнее сильно сказывается на формировании ежегодной урожайности агробиоценозов, особенно однолетних зерновых культур.

В настоящем исследовании предпринимается попытка подойти к анализу проблемы подобного типа изменчивости на основе динамико-стохастической модели. При этом сам климат как таковой или его отдельные элементы с традиционных позиций не рассматриваются. Однако многолетние ряды первичной продуктивности (урожайности зерновых) интерпретированы таким образом, что они заключают в себе информацию об интегральном влиянии совокупности погодно-климатических факторов, особенно экстремальных, на конечную ежегодную величину биопродукции в пределах больших территорий.

В этой совокупности факторов одно из слагаемых — атмосферное увлажнение — имеет первостепенное значение. Для многих зерновых районов этот фактор находится в минимуме и его дефицит становится главной причиной недобора зерновых. Даже в условиях благоприятной в среднем влагообеспеченности он в значительной мере обуславливает дисперсию неурожайных лет. Поэтому мы уделили специальное внимание разработке новой климатологической модели, параметризующей многолетнюю динамику засушливых явлений, в той или иной мере определяющих уровень колебания урожайности зерновых. Она может быть также положена в основу анализа временной последовательности других комплексных экстремальных климатических явлений, оказывающих влияние на биологическую продуктивность.

Предлагаемая вниманию читателя книга состоит из трех разделов. В первом из них дана общая формулировка проблемы и излагаются элементарные основы стохастического моделирования временных рядов применительно к поставленной задаче. Во втором и третьем разделах разработанные модели используются для статистической интерпретации флуктуаций урожайности и обуславливающих ее экстремальных атмосферных явлений по территории СССР и ряду важнейших зарубежных зерновых регионов северного полушария. В помещенном в конце книги «Приложении» приводятся данные по абсолютной урожайности, результаты расчетов десятилетних скользящих и индексы урожайности по годам за XIX и XX вв. по СССР и ряду стран.

Это исследование можно рассматривать как дальнейшее развитие наших [Раунер 1972, 1973, 1974] многолетних разработок по фитоклимату и влиянию метеорологических факторов на первичную продуктивность и урожайность, проводимых в рамках комплексных геоэкологических работ, осуществляемых в Институте географии. Вместе с тем излагаемые подходы и некоторые из полученных выводов в значительной мере сопрягаются с проблемой современных колебаний климата, разработка которой, начатая Б. Л. Дзердзеевским в Отделе климатологии Института географии АН СССР еще в начале 50-х годов, продолжается и в настоящее время.

Пользуюсь случаем выразить искреннюю признательность Г. Н. Витвицкому, Д. И. Шашко, Н. И. Базилевич, которые сделали целый ряд весьма ценных замечаний при рецензировании и научном редактировании рукописи, а также сотрудникам Отдела климатологии Института географии АН СССР, помогавшим мне в процессе подготовки работы, особенно Л. А. Лозовской, организовавшей обработку материалов на ЭВМ.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СТОХАСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ, НЕКОТОРЫЕ ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ПРИМЕРЫ

«Метеоролога интересуют лишь статистические утверждения...»

Норберт Винер

Динамико-стохастическая модель флуктуаций первичной продуктивности и урожайности

Знаменитая «Кибернетика» Н. Винера, цитату из которой мы предпосылаем нашему исследованию, начинается с принципиального сопоставления двух основных методологических подходов к науке — детерминистского и вероятностного, а две столь различные научные дисциплины — ньютонова астрономия и современная метеорология привлекаются как наглядные и контрастные иллюстрации подобных подходов. Яркий и убедительный анализ, в котором использованы также данные других наук, позволил Н. Винеру констатировать, что статистические принципы вторглись даже в классическую механику и сейчас уже невозможно назвать ни одной естественнонаучной дисциплины, которая полностью подчинялась бы концепциям Ньютона. Произведя ранжировку взаимного положения отдельных дисциплин в системе естественных наук, основанную на этом принципе, Н. Винер заключает, что преобладающая часть наук занимает промежуточное положение между астрономией и метеорологией, но ближе к метеорологии, чем к астрономии.

Итак, из этого высказывания основоположника кибернетики следует, что именно метеорология, а следовательно и климатология, изучающая те же физические процессы в их многолетней статистической совокупности, могут служить своего рода эталоном одного из современных концептуальных подходов для широкого класса естественных наук. Конечно, это уже наша трактовка положений Н. Винера, которую, вероятно, далеко не все (даже метеорологи и климатологи) согласятся разделить, хотя бы потому, что практика метеоролога-прогнозиста все еще не достигла совершенства.

Полезно напомнить, однако, что прогноз, обычно представляющий собой конечную и фундаментальную цель науки, для дисциплин гидрометеорологического цикла является их основным содержанием и делом повседневной оперативной работы. Отдельные и неизбежные неудачи на этом пути свидетельствуют прежде всего о необычайной сложности изучаемых этими науками гигантских и уникальных природных объектов — воздушной и водной оболочек Земли, непрерывно взаимодействующих и влияющих на состояние биосферы в целом и особенно на структуру и производительность ее биоты. Уместно в этой связи сослаться на А. И. Воейкова [1952], подчеркивавшего, что в метеорологии из-за специфичности изучаемого ею объекта в принципе невозможно достичь того же уровня достоверности, который характерен, например, для классической астрономии. Это высказывание А. И. Воейкова по существу согласуется с изложенными выше положениями.

Одна из актуальных задач динамической климатологии может быть определена как изучение флуктуаций климата — его высокочастотных (в климатическом смысле) колебаний, имеющих циклическую или чисто стохастическую природу. Колебания в этом диапазоне частот, особенно короткопериодные климатические экстремумы, весьма важны для изучения современного климата и его влияния на биосферу. Именно они вносят решающий вклад в ежегодную изменчивость уровня биологической

продуктивности растительного покрова, которая, в свою очередь, становится своеобразным фитоиндикатором многолетней изменчивости климатических условий. При этом если отдельные растения содержат информацию о колебаниях климата со значительным весом локальных климатических условий (например, годовые кольца деревьев), то динамика индекса урожайности сельскохозяйственных культур, обычно относящегося к значительным территориям, отражает климатические эффекты более или менее крупного масштаба.

Применение для выявления климатообусловленных флуктуаций первичной продуктивности методов стохастического моделирования, лежащих в основе современного климатологического анализа, позволит лучше понять их спонтанную природу и в конечном итоге подойти к объяснению этих физических (климатических) механизмов, которые их порождают. Эти соображения, сформулированные нами ранее в самых общих чертах [Раунер, 1976 а, б], положены в основу и развиваются в рамках настоящего исследования.

Прежде чем перейти к более подробному изложению поставленной задачи, целесообразно привести краткий анализ методов физического и динамического моделирования применительно к решению агрометеорологических задач. Как известно, в этом направлении в СССР и за рубежом были проведены широкие поисковые разработки (М. И. Будыко, А. И. Будаговский, Г. В. Менжулин, Ю. К. Росс, О. Д. Сиротенко, Х. Г. Тооминг, А. Ф. Чудновский, С. В. Нерпин, Р. А. Полуэктов, В. Де-Вит, Э. Иноэ, Э. Леман, Р. Слейтер, Э. Учиджима, Дж. Монте, П. Ваггонер, Р. Карри, Ж. Полтридж и др.). В результате за последние 12–15 лет построен ряд математических моделей радиационного, турбулентного, водно-теплого и газового режимов слоя растительности.

Физическое и динамическое моделирование явилось принципиально новой физической базой для современной агрометеорологии. Его возникновение и развитие обуславливались в немалой степени недостаточной эффективностью традиционной агрометеорологии, основанной главным образом на элементарных статистических методах регрессионного анализа. Важной чертой и бесспорным достоинством является применение в этом системного подхода, т. е. не только моделирования отдельных звеньев производственного процесса и обуславливающих его факторов, но и расчете исходного этапа изучения обычно конструируется некая общая блок-схема динамической модели изучаемой биосистемы, включающая отдельные подсистемы физического и биотического характера. Приведенная ниже схема 1 иллюстрирует принцип функционирования любого биогеоценоза. Она составлена на основе обобщения некоторых имеющихся вариантов, в частности Х. Г. Тооминга [1977], Карри [Carr, 1971] и Де-Вита [De-Wit et al., 1970].

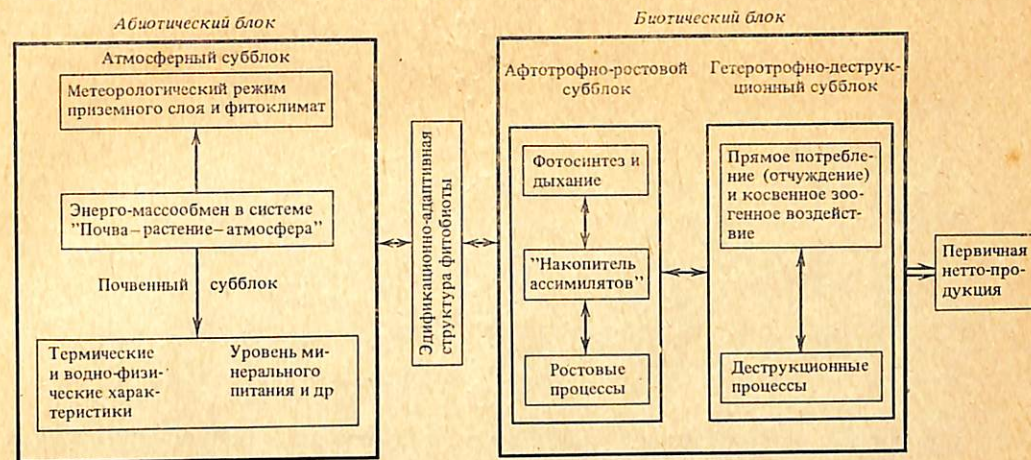
Абиотический блок характеризует физические процессы в атмосфере биогеоценоза и в деятельном слое почвы, которые обуславливают формирование определенного типа фитолимата в слое растительности и водно-теплого режима корнеобитаемой зоны. Биотический блок характеризует механизмы фотосинтеза — дыхания и ростовые процессы, а также потребление фитомассы гетеротрофами и ее разрушение в процессе биохимического круговорота.

Важными элементами функционирования являются регуляторные механизмы между блоками и субблоками модели. В абиотическом блоке — это процессы энерго-массообмена в системе «почва — растение — атмосфера», в автотрофном блоке — «накопитель ассимилятов» (по Де-Виту), весьма важный механизм взаимодействия между фотосинтезом и ростовыми процессами.

Между основными блоками также существует механизм регуляции, который, согласно идее В. Д. Утехина [1977], характеризует так называемую эдификационно-адаптивную структуру фитоценоза (в том числе и агробиогеоценоза). Эдификационные свойства связаны

Схема 1

Блок-схема производственного процесса биогеоценоза



с определенным преобразованием среды самим фитоценозом, точнее его геометрией и архитектурой (площадь листьев, высота, густота, однородность и др.). При заданной эдификационной структуре адаптивная структура растительного сообщества будет определять эффективность усвоения ресурсов среды его отдельными ценобионтами. В целом этот механизм определяет эффективность производственного процесса и уровни его энергетических КПД — фотосинтеза и транспирации.

К настоящему времени разработана целая серия моделей, математически описывающих отдельные блоки (особенно детально — атмосферный), а также предпринимаются попытки построения полных динамических моделей применительно к конкретному агробиоценозу [Сиротенко, Просвиркина, 1977; Тооминг, 1977].

Отмечая прогрессивность подобного подхода, следует, однако, иметь в виду, что его применение, основанное на достаточно жестких детерминированных решениях, может дать достаточно удовлетворительные результаты (и поддается некоторой верификации) лишь в рамках конкретного вегетационного сезона или его отдельных фаз и на уровне отдельного агробиоценоза, т. е. на микрометеорологическом уровне. При переходе на климатологический и географический уровни обобщения, т. е. при обобщении в рамках многолетнего режима и применительно к осредненным по площади условиям, более эффективным может оказаться иной подход.

Обратимся к некоторым характерным примерам для пояснения сущности рассматриваемого подхода. Хорошо известно, что зависимость между ежегодной биопродукцией растительного покрова и погодноклиматическими характеристиками сложна и многофакторна. Фритц [Fritts, 1962], например, выделяет несколько десятков метеорологических факторов, обуславливающих ежегодную продуктивность (годовой прирост) древесной растительности. А. Р. Константинов [1976] в предложенной им модели урожайности озимой пшеницы выделяет четыре факторных блока (метеорологический, биологический, агротехнический и блок почвенного плодородия), включающих свыше 20 учитываемых факторов, из которых чисто метеорологические составляют более половины. В работе О. Д. Сиротенко и А. Г. Просвиркиной [1977] эти факторы и явления в системе «среда — агробиоценоз» систематизированы в основные группы, создающие в совокупности ситуацию, подобную «лабиринту». Это прежде всего многомерность потенциально влияющих физических параметров и нелинейный характер взаимодействия растений со средой обитания, неаддитивность воздействия каждого средообразующего фактора и их взаимная

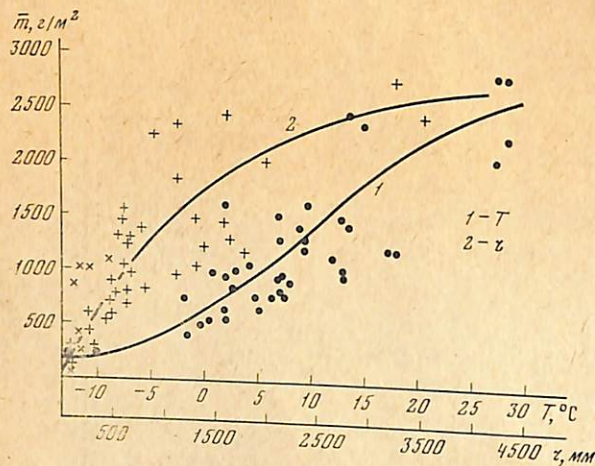


Рис. 1. Годичная продукция растительных биомов суши как функция среднегодовой температуры (T) и осадков (r), по данным Литы [Lieth, 1972]

корреляция, инерционность фитобиоты, создающая немарковские эффекты в случайном процессе.

Для практического решения задачи, особенно для целей агрометеорологического прогноза, из этого большого разнообразия предикторов обычно выделяют несколько ведущих, которые вносят основной вклад в дисперсию продуктивности (урожайности) и по которым производится оценка ее ожидаемого уровня [Уланова, 1975б; Батталов, 1977]. Уместно подчеркнуть, что прогноз продуктивности по существу складывается из двух этапов — прогноза соответствующего комплекса агрометеорологических показателей с определенным уровнем оправдываемости и прогноза уровня продуктивности на основании полученных корреляционных отношений (регрессионных уравнений). Как показал Ф. З. Батталов [там же], средним коэффициентом корреляции между продуктивностью яровой пшеницы в административном районе и определяющим его агрометеорологическим комплексом не превышает 0,80, что, по-видимому, может считаться наилучшим показателем такой связи. При средней оправдываемости прогноза подобного комплекса порядка 0,85 окончательный уровень оправдываемости прогноза продуктивности в лучшем случае составит величину, не превышающую 0,70 ($0,80 \times 0,85$).

Проиллюстрируем изложенное выше некоторыми примерами, относящимися к растительным системам разных таксономических рангов.

Зависимость годичной продуктивности естественной растительности по основным природным зонам от среднегодовой температуры воздуха и соответствующего количества осадков (рис. 1) была получена Литом [Lieth, 1972]. Он параметризует средние линии зависимости уравнениями типа $m = \frac{3000}{1 + \exp(1,315 - 0,119T)}$ и $m = 3000 [1 - \exp(-0,000664r)]$ и использует их в качестве расчетной модели для построения мировой карты первичной продуктивности поверхности суши.

Нетрудно заметить, что дисперсия областей рассеяния весьма велика, и для некоторого среднего диапазона температуры и осадков значения продуктивности для одних и тех же климатических параметров могут отличаться в 2,5 раза, что равносильно сдвигу по горизонтальной оси из умеренных широт в тропики. На это обстоятельство обратил внимание Чарновский [Czarnowski, 1973], который пришел к заключению, что данная модель не отражает с необходимостью полнотой климатические механизмы, обуславливающие продукционный процесс на глобальном уровне.

В ряде других исследований радиационно-климатических факторов региональной и глобальной продуктивности использовались более эффективные показатели водно-теплового режима, однако и при этом полученные зависимости в целом характеризовались недостаточно высоким уровнем корреляции [Дроздов А. В., 1969; Ефимова, 1977; и др.].

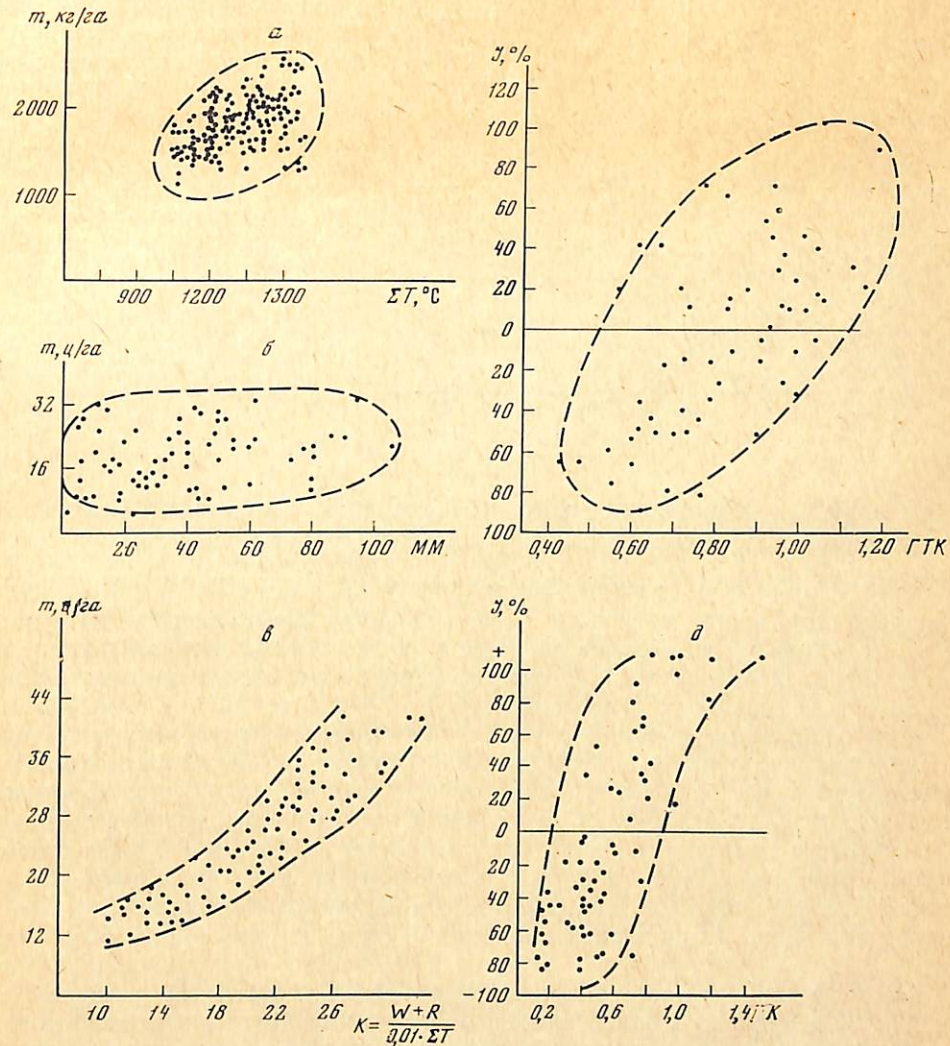


Рис. 2. Примеры связей «урожайность — гидротермические факторы»

а — урожайность яровой пшеницы за 1967—1969 гг., южная Финляндия, по данным Varjo [1978]; б — то же, озимой пшеницы за 1892—1965 гг., южная Украина, по данным Е. С. Улановой [1966]; в — зависимость урожайности озимой пшеницы (Безостая-1 и Мироновская-808) от гидротермического показателя, по данным Е. С. Улановой [1975б]; г — ежегодный индекс урожайности яровой пшеницы и гидротермический коэффициент, по Г. Т. Селянинову за 1899—1971 гг. (ГТК); Кулундинская степь, по данным А. И. Сляднева [1965] и Е. К. Федорова [1973]; д — то же, на отдельных опытных станциях, по данным А. М. Алпатьева и А. И. Трофимовой [1958]

Проиллюстрируем соответствующие связи для зерновых в контрастных и экстремальных гидроклиматических условиях — при недостатке тепла и избытке влаги и обратном их соотношении, т. е. в условиях, когда ведущим фактором являются либо суммы температур, либо количество осадков. На рис. 2, а, б показана зависимость урожайности яровой пшеницы от сумм эффективных температур в условиях Финляндии и озимой пшеницы — от количества осадков в мае на юге Украины. В первом случае корреляция выражена весьма слабо, а во втором она совсем отсутствует, хотя в засушливых условиях степной Украины выпавшие в мае осадки должны оказывать существенное влияние на формирование урожая. Лишь учет предшествующего увлажнения и состояния посевов после переизморозки, а также параметризация эффективных осадков и сумм температур

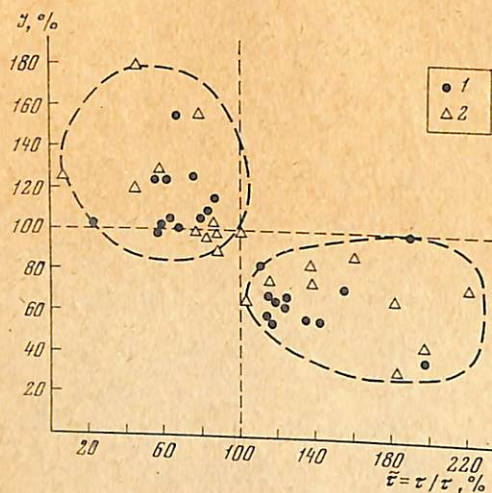


Рис. 3. Индекс урожайности и отклонения от нормы в % продолжительности засушливого периода τ за вегетационный сезон, по данным А. С. Утешева [1972]

- 1 — яровая пшеница за май — июль, центральная часть Северного Казахстана;
2 — естественная пастбищная растительность за апрель — май, Западный Казахстан и Алма-Тинская область

в виде аналога гидротермического коэффициента k позволяют установить корреляционную зависимость, сохраняющую, однако, довольно высокий уровень дисперсии (см. рис. 2, в). Величина $k = \frac{w + R}{0,01 \Sigma T}$, где w — запасы продуктивной влаги метрового слоя в декаду возобновления вегетации (мм), R — количество осадков за период от возобновления вегетации до фазы восковой спелости, ΣT — сумма среднесуточных температур (выше 5°) за тот же период [Уланова, 1975б].

При обобщении данных по ежегодной урожайности яровой пшеницы в Кулундинской степи и в Кокчетавской области за XX в. в качестве опт. е. параметр, учитывающий как абсолютные значения количества осадков и суммы температур, так и их соотношение. Связь $J = f(K)$ хотя и нельзя считать значимой. Так, в области оптимальных величин $K \approx 0,9 \div 1,0$ величина J может принимать значения $-30, -40\%$ и $+40, +50\%$ (см. рис. 2, г.).

Аналогичный уровень связи обнаруживается для тех же районов Кулундинской степи при сопоставлении относительной урожайности яровой пшеницы на отдельных опытных станциях с тем же ведущим климатическим фактором. В области оптимальных значений гидротермического коэффициента (0,6–0,8) разброс отдельных точек колеблется в весьма широком диапазоне от $-80, -100\%$ до $+80, +100\%$ (см. рис. 2, д).

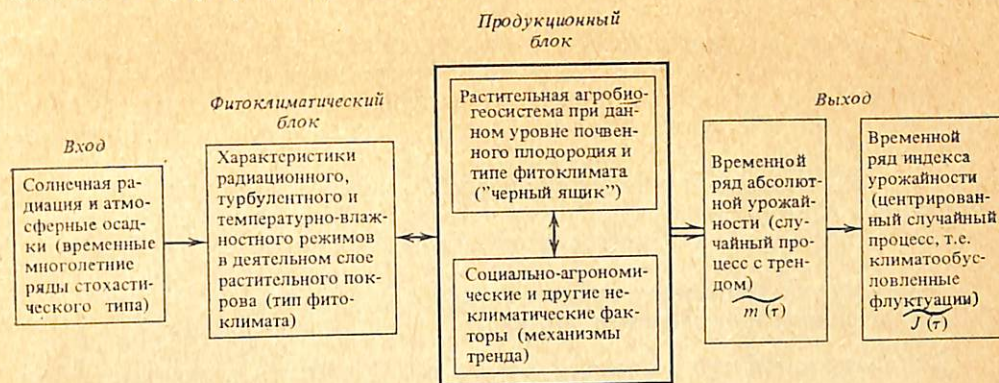
На рисунке 3 показана статистическая связь относительной урожайности пшеницы и естественной пастбищной растительности с относительной длительностью засушливого периода в различных районах Казахстана. Общая зависимость выражена в различных районах Казахстана. Разброс отдельных точек достаточно отчетливо, однако значительно, что при числе дней с засухой ниже некоторой нормы числа засушливых дней ($\tau < 100\%$) индекс продуктивности оказывается выше соответствующего среднего значения ($J > 100\%$) и, наоборот, при $\tau > 100\%$ величина $J < 100\%$.

В условиях достаточного увлажнения в качестве основного фактора формирования продуктивности древесной растительности обычно принимают влияние радиационного фактора. Однако анализ, выполненный В. А. Алексеевым [1975], показал, что статистическая связь годичного прироста стволовой древесины, показал, что статистическая связь годичного прироста активной радиации в июне — августе (за 44-летний интервал) характеризуется максимальным значением коэффициента корреляции, превосходящим $+0,3$.

Таким образом, даже весьма краткий анализ нескольких примеров показывает, что при переходе на многолетний уровень обобщения система

Схема 2

Общая блок-схема динамико-стохастической модели многолетних флуктуаций урожайности



«погодно-климатические факторы — продуктивность растительного покрова» превращается в сложную многофакторную нелинейную систему стохастического типа. Ее общая логическая блок-модель применительно к агробиогенезам ясна из схемы 2.

Вход системы представляет собой некий аналог «генератора случайных сигналов». Он включает в себя два основных климатических элемента — солнечную радиацию и атмосферные осадки, которые являются первичными климатическими факторами продукционного процесса. В данной модели они рассматриваются в виде многолетних рядов стохастического типа. В фитоклиматическом блоке эти важнейшие параметры преобразуются в характеристики среды обитания, т. е. турбулентный и температурно-влажностный режимы приземного слоя атмосферы, в том числе и слоя растительности, а также верхних слоев почвы. Параметры микроклиматического режима в среде обитания растений (т. е. тип фитоклимата), в свою очередь, прямо или косвенно влияют на формирование первичной продуктивности.

Передаточным механизмом системы (или так называемым «формирующим фильтром») является производительный блок, также включающий два субблока — растительную биосистему, т. е. субблок биопродукционных факторов, и субблок механизмов тренда.

На растительную биосистему не накладывается каких-либо ограничений в отношении таксономического ранга, т. е. речь может идти об отдельном биогенезе, совокупности растительных сообществ природного региона, растительном компоненте ландшафтно-географической зоны. Условия естественного почвенного плодородия и тип фитоклимата считаются заданными. Получая импульсы случайного климатического процесса, через фитоклиматический блок биопродукционный субблок формирует выходной сигнал в виде многолетней последовательности абсолютной нетто-продукции (урожайности) растительного комплекса.

Второй субблок при этом выполняет роль некоторого специфического фильтра, выделяя ту часть процесса (тренд), которая складывается за счет совокупности неклиматических факторов (общих социально-экономических условий, уровня агротехники и селекции и др.). В результате на выходе системы временной ряд представляется в виде относительных величин — индекса урожайности, отражающего влияние только погодно-климатических факторов.

В рамках данной модели рассмотренные выше корреляционные соотношения играют роль собственно передаточных функций и отражают с большей или меньшей информативностью реакцию продукционных механизмов на внешние климатические воздействия. Строго говоря, сам про-

дукционный субблок при подобном подходе должен рассматриваться лишь как «черный ящик». Описание и анализ соответствующих биофизических механизмов входят в задачу динамического моделирования, что для климатологического уровня обобщения (т. е. для многолетней совокупности и применительно к крупным регионам) является чрезвычайно сложной проблемой и делом будущего (возможно, ближайшего).

Таким образом, многолетняя климатообусловленная изменчивость биопродуктивности (урожайности), представляющая собой конечную интегральную реакцию всей системы на воздействующие на нее факторы, может рассматриваться как стохастический процесс. Некоторые соображения об его общих свойствах применительно к важнейшим типам природных и агротехнических биогеосистем излагаются ниже.

Многолетняя динамика продуктивности растительных биогеосистем

Для освещения этого вопроса мы также обратимся к некоторым типичным примерам. Начнем с лугово-степной растительности Центральной ассоциации Стрелецкой степи под Курском, на территории Центрально-Черноземного заповедника им. В. В. Алехина, для которой мы составили, используя материалы А. М. Семенович-Тяньшанской [1976], В. Д. Утехина [1977] и данные, приведенные в Летописи природы [1968–1973], временной ряд за период с 1945 по 1973 г. (рис. 4).

Растительность в течение практически всего периода находится в режиме заповедования, причем на одном участке производится ежегодное скашивание, а на другом оно не производится совсем (абсолютно заповедный режим). Из рис. 4,а нетрудно заметить, что какая-либо тенденция в изменении средней продуктивности биомассы за весь период отсутствует. Ежегодные колебания обусловлены главным образом соответствующими флуктуациями погодно-климатических факторов, к числу которых относятся режим увлажнения в период вегетации (особенно в мае), режим осеннего увлажнения, температурный режим периода вегетации, условия перезимовки растений и ряд других. При этом размах колебаний — уровень дисперсии для всей реализации сохраняется приблизительно постоянным. Таким образом, в данном случае можно говорить об отсутствии тренда, а также о стационарности самого процесса в отношении моментов второго порядка. Рассматриваемый случай с точки зрения структуры ряда является простейшим, причем его можно считать в известной мере характерным для естественной многолетней растительности лугово-степного типа, находящейся в заповедном режиме.

Аналогичный статистический тип может, по-видимому, характеризовать также естественную растительность в аридных и полуаридных условиях с той лишь разницей, что в этом случае должна быть более резко выражена амплитуда колебаний от года к году [см., например, «Растительность Центральных Каракумов...», 1970].

Систематические изменения тренда, в частности понижение средней продуктивности, может свидетельствовать о каком-либо направленном отрицательном воздействии на данную растительную биогеосистему, т. е. может играть роль биоэкологического мониторинга [Герасимов, 1976].

Рисунок 4,б характеризует многолетнюю динамику годового линейного прироста (ширину годичных колец) для некоторых типов хвойной растительности за период в 200–250 лет. Кривая 1 отражает многолетнюю динамику прироста ели в условиях Норвегии практически за все стадии жизненного цикла, а кривая 2 — флуктуации прироста сосны в Новгородской области от фазы его кульминации до начала отмирания. В обоих случаях характерно наличие нелинейного тренда, причем для всего онтогенеза соответствующая кривая может быть описана одномерным распределением типа $m(\tau) = \alpha m^{\gamma} \exp(-\gamma\tau)$. Линия тренда динамики прироста сосны, полученная на основе скользящего осреднения

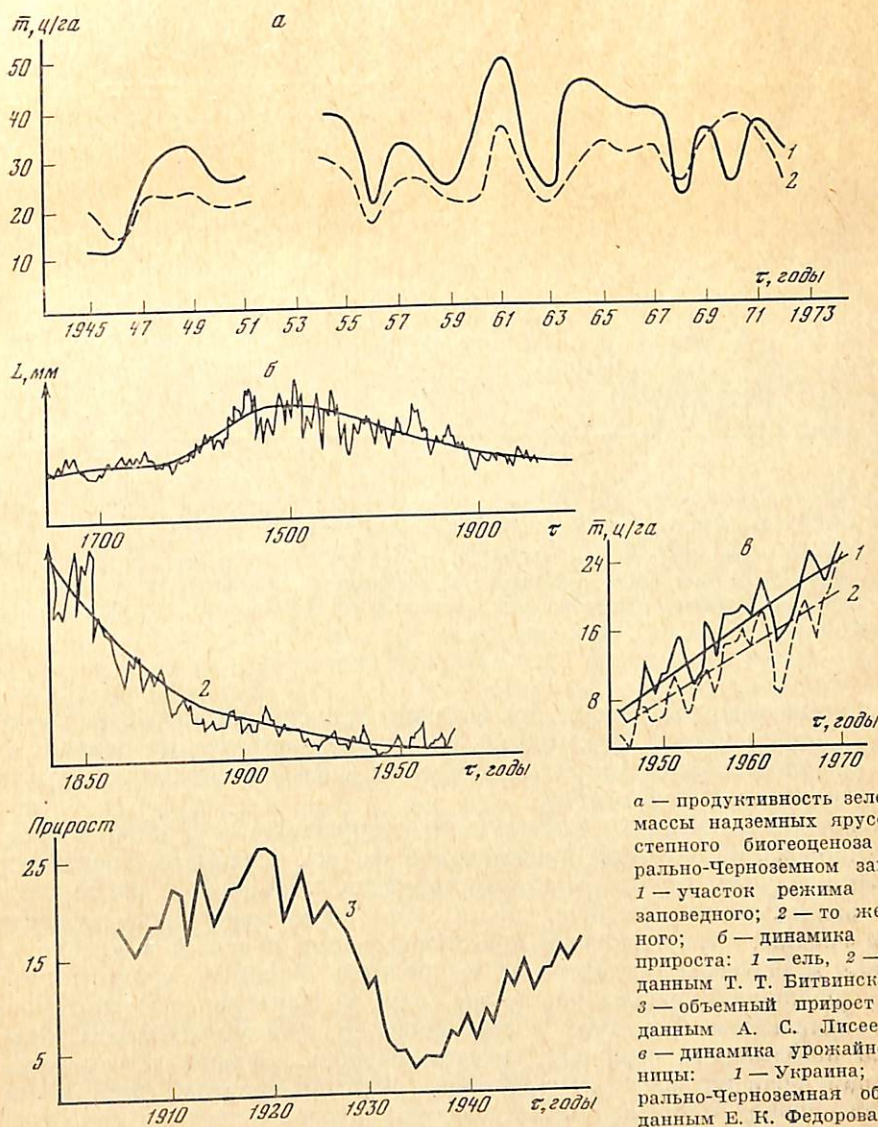


Рис. 4. Многолетняя динамика первичной продуктивности и урожайности растительных биогеосистем

с 20-летним шагом, может быть приближенно параметризована экспоненциальной кривой затухающего типа $m(\tau) = \alpha \exp(-\gamma\tau)$.

На фоне этих сглаженных значений, отражающих закономерности возрастной динамики и влияние бонитета насаждений, происходят ежегодные флуктуации годичной продуктивности, обусловленные главным образом колебаниями погодно-климатических факторов. Отметим также, что на обеих кривых величина дисперсии характеризуется существенно повышенными значениями в фазу максимального прироста, поскольку именно в этот период лесная биогеосистема наиболее лабильна по отношению к внешним воздействиям. Следовательно, случайный процесс межгодовой изменчивости продуктивности должен характеризоваться некоторой нестационарностью в отношении абсолютных значений дисперсии ряда.

Кривая 3 характеризует динамику годового объемного прироста сосны в Бузулукском бору (под Куйбышевом) за первую половину XX в. В этом случае характерно резко выраженное проявление цикличности с фазами повышенного и пониженного прироста, отражающего в основном

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
Теоретические основы стохастического моделирования	7
Постановка задачи, некоторые принципиальные положения и примеры	7
Динамико-стохастическая модель флуктуаций первичной продуктивности и урожайности	7
Многолетняя динамика продуктивности растительных биосистем	14
Статистический анализ временных рядов	17
Некоторые общие положения	17
Тренды и их выявление	19
Обобщенный гармонический анализ	21
Выбросы случайных процессов и функции импульсного типа	23
Модель массового обслуживания и марковская цепь	27
Основы стохастического прогноза	33
Общие соображения о прогнозе климатических колебаний	33
Стохастический прогноз многолетних флуктуаций продуктивности	35
Климатообусловленные колебания урожайности	42
Колебания урожайности зерновых культур на территории СССР	42
Характеристика исходных материалов	42
Динамика трендов урожайности	45
Колебания урожайности на Европейской и Азиатской территориях СССР	48
Многолетняя изменчивость эффективности минеральных удобрений	56
Некоторые оценки на перспективу	61
Многолетняя изменчивость урожайности пшеницы и кукурузы в Североамериканском зерновом поясе	66
Характеристика исходных материалов	66
Климатообусловленная изменчивость урожайности	69
Сравнительные оценки с зерновой зоной СССР	74
Динамика урожайности пшеницы в Западноевропейском зерновом регионе	77
Характеристика исходных материалов и оценка трендов	77
Климатообусловленные колебания урожайности	79
Сравнительные оценки изменчивости урожайности в Западной Европе, Северной Америке и СССР	87
Колебания урожайности риса в некоторых странах Азии	92
Общие сведения	92
Климатообусловленная изменчивость урожая риса в Японии	93
Климатообусловленная изменчивость урожайности риса в ряде стран Юго-Восточной Азии и в Китае	99
Динамика климатических экстремумов и их влияние на урожайность	102
Динамика засух в зерновой зоне СССР	102
Стохастическая природа экстремумов осадков	102
Анализ и обобщение существующих каталогов засух	107
Параметризация временных рядов засушливых лет	112
Анализ временного ряда засушливых лет за исторический период на основе модели Пуассона	117
Динамика засух и экстремумы урожайности	120

Динамика климатических экстремумов в некоторых зарубежных странах	123
Засушливые годы и их связь с урожайностью в США и Канаде	123
Динамика лет с дефицитом весенне-летних осадков и их связь с экстремумами урожайности в Западной Европе	125
Аномальные годы в Японии и Китае и их влияние на урожайность риса	130
Синхронность засух в зерновых регионах северного полушария	132
Некоторые общие замечания	132
Синхронность засушливых лет в основных районах зерновой зоны СССР	135
Синхронность засушливых явлений в СССР, США и Западной Европе	140
Динамика засух и климатический мониторинг	143
Динамика засух и климатический мониторинг	145
Заключение	147
Приложение	156
Список основных обозначений	157
Литература	157