

ISSN 2304-9081

Учредители:  
Уральское отделение РАН  
Оренбургский научный центр УрО РАН

**Бюллетень**  
**Оренбургского научного центра**  
**УрО РАН**  
(электронный журнал)



**2014 \* № 2**

On-line версия журнала на сайте  
<http://www.elmag.uran.ru>

© Коллектив авторов, 2014

УДК 517.2(07):631.4(07)

*А.И. Климентьев<sup>1</sup>, О.И. Головкова<sup>2</sup>, И.В. Ложкин<sup>3</sup>, М.Ю. Нестеренко<sup>4</sup>,  
Ю.М. Нестеренко<sup>4</sup>, Д.Г. Поляков<sup>5</sup>*

## **КРАТКИЙ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ЭКСКУРС В ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА В ПРИЛОЖЕНИИ К ПОЧВОВЕДЕНИЮ И ГЕОЭКОЛОГИИ**

<sup>1</sup> Институт степи УрО РАН, Оренбург, Россия

<sup>2</sup> Оренбургский государственный аграрный университет, Оренбург, Россия

<sup>3</sup> Оренбургский государственный педагогический университет, Оренбург, Россия

<sup>4</sup> Оренбургский научный центр УрО РАН, Отдел геоэкологии, Оренбург, Россия

<sup>5</sup> ООО «НПП Гипрозем», Оренбург, Россия

Основные экологические свойства почв, определяющие плодородие, можно установить в результате математического моделирования системы их взаимосвязей с факторами географической среды. Объяснен алгоритм элементов системной методологии, раскрыты некоторые экологические сущности системных связей в почвоведении и геоэкологии с целью управления процессом. На примере эмпирической модели дефляции описаны элементы методологии, разработана модель на основе применения множественного регрессионного анализа, как инструмента математического моделирования. Теоретической предпосылкой послужило представление о плодородии, как об общесистемном свойстве почвы.

*Ключевые слова:* элементы системологии, этапы эволюции, почва, геоэкосистема, дефляция, эрозия, опустынивание, математическое моделирование, прогноз, управление.

---

---

*A.I. Klimentev<sup>1</sup>, O.I. Golovkova<sup>2</sup>, I.V. Logkin<sup>3</sup>, M.Yu. Nesterenko<sup>4</sup>,  
Yu.M. Nesterenko<sup>4</sup>, D.G. Polyakov<sup>5</sup>*

## **BRIEF METHODOLOGICAL DISCUSSION ON THE ELEMENTS SYSTEM ANALYSIS IN THE ANNEX TO THE SOIL SCIENCE AND GEOECOLOGY**

<sup>1</sup> Institute of Steppe UrB RAS, Orenburg, Russia

<sup>2</sup> Orenburg State Agrarian University, Orenburg, Russia

<sup>3</sup> Orenburg State Pedagogical University, Russia

<sup>4</sup> Orenburg Scientific Centre UrB RAS, Department of Geoecology, Orenburg, Russia

<sup>5</sup> ООО «Giprozem», Orenburg, Russia

The main environmental soil properties that determine fertility, you can install the result of mathematical simulation of the system of their relations with the geographical environment. Explained the algorithm of elements of system methodology, revealed some environmental essence of the system of relations in soil science and Geology to manage the process. For example, an empirical model of deflation describes the elements of the methodology developed model on the basis of application of multiple of the regression analysis as a tool of mathematical modeling. The theoretical-political precondition was the idea of fertility, as a system-wide property of the soil.

*Key words:* elements of systemology, stages of evolution, soil, geocosystem, deflation, erosion, desertification, mathematical modeling, forecasting, management.

«Жить по-настоящему – это жить,  
получая адекватную информацию».  
*Норберт Винер*

## **Введение**

Прошедшие в России реформы продемонстрировали очевидную истину: подход к преобразованиям должен быть только индивидуальным с учетом природного потенциала и социально-экономических особенностей регионов и даже отдельных территорий. Только при этом условии возможна разработка общих моделей, принципов, подходов, трансформирующихся в зависимости от региональной специфики.

Социальная напряженность и неэффективность мероприятий как в аграрной, так и в других областях во многом связана с неумением своевременно спрогнозировать тот или иной эксцесс или стихийное бедствие и оценить последствия тех или иных мероприятий или природных воздействий. Тому пример – г. Крымск, где ранее проводили исследования, но ничего не сделали для предотвращения стихийной беды.

От достоверной и своевременно сформированной фундаментальной базы данных зависит адекватный прогноз, а отсюда и адекватность принимаемых народно-хозяйственных решений. Технология, в конечном итоге, превращается в фактор обеспечения жизнедеятельности человека, благосостояния людей и государства в целом.

«Контроль технологического пространства, включающий планирование технологии, оценку последствий ее применения и прогнозирование развития – ключевая проблема современного общества. Такое планирование возможно только на государственном уровне. Снижение культуры проектирования технологий и отсутствие контроля наносят ущерб обществу, который нередко сопоставим с ущербом, наносимым вооруженными конфликтами, и даже превосходит его» [10]. Поэтому неумение делать простейшие прогнозы опаснее военного конфликта.

Внедрение современных технологий требует обязательного планирования ресурсной базы и, прежде всего, ресурсного потенциала, систем экологического мониторинга и прогноза, особенно природно-антропогенных эксцессов.

Переход к рынку подталкивает к ревизии систем разных производств с целью их оптимизации применительно к социальным, демографическим, экономическим и геоэкологическим особенностям территории. Это особенно

актуально в связи с несостоятельностью унифицированных подходов, практиковавшихся ранее. Активно развивающееся в мире, например, адаптивно-ландшафтное земледелие предусматривает освоение ресурсосберегающих технологий, систем альтернативного земледелия. Здесь необходимо эффективное кооперирование ученых и специалистов социально-экономического и технико-экологического профилей, использование региональных программ и зарубежного опыта.

Для возникновения системных понятий и теорий имеются объективные непреходящие причины, и поэтому такие теории не могли не возникнуть, а возникнув, не могут не развиваться, и существующее состояние является лишь очередным этапом этого развития, которое будет продолжаться и впредь. Осознание системности Мира и модельности мышления всегда отставало от эмпирической системности человеческой практики. В настоящее время в процессе развития системных представлений происходит нечто качественно новое: системное мышление и системная методология становятся массовыми и в этом качестве обращаются в «материальную силу», повышая уровень человеческой практики.

В свете современных представлений системность всегда была методом любой науки; любой ученый прошлого, даже не помышлявший о системах и моделях, именно с ними имел дело.

В почвоведении модели строятся на основе системной оценки различных факторов, порождающих, например, дефляцию\* почв. Просчитать всплеск дефляции трудно, сложно, но общие закономерности развития дефляционных процессов существуют. Выявив их, мы сможем упреждать катастрофы с огромными потерями почвы, а не ликвидировать последствия. Математическое моделирование – универсальный синтетический язык описания и анализа функций. В сети Интернет сформированы открытые базы, содержащие данные, которые нужно использовать. Математические модели – уникальный мощный инструмент анализа природных явлений, процессов и режимов – имеют эвристическую ценность, предсказывая новые явления. Модель включает в себя в формализованном виде новые экспериментальные данные о процессах, например, в геоэкосистемах (почвах). Модели призваны

---

\* Дефляция – [deflatio - выдувание] – разрушительная деятельность ветра, выражающаяся в развевании и выдувании материала, образованного процессами выветривания и неизменных рыхлых горных пород (Геологический словарь. Т. I. М., 1955. С.141. 402 с.).

воспроизводить целый класс явлений и процессов в них, стать теоретическим фундаментом понимания биологических, геоэкологических и биосферных функций систем и, в частности, почвы. Преимущества компьютеров для анализа сложных процессов и явлений здесь неоценимы.

Без практической интеграции науки, образования и производства решить проблему освоения технологий невозможно. Знания очень быстро устаревают в современном мире, а необходимость в знаниях для человека все более увеличивается. Пожизненное образование (специализация), информатизация и компьютеризация - вот пути повышения образованности. «Обучение – это не то, что необходимо для жизни, это и есть жизнь». Необходимо развитие индивидуальных творческих способностей у каждого человека. Нужны совместные усилия представителей науки, образования и производства по поиску, разработке и внедрению нового.

Математическое моделирование, как «третий метод познания», сущность методологии которого состоит в замене исходного объекта его «образом», «паттерном» - математической моделью, дает возможность быстро и без существенных затрат исследовать свойства и поведение объекта в любых ситуациях, реализуя таким образом преимущества теории.

Несомненно, что жизнь почвы – функция не одного какого-то фактора (процесса), а многих факторов, действующих с разной силой и связанных в сложную систему взаимодействий. При этом важно определить ведущий фактор почвообразования на той или иной территории.

На наш взгляд, наиболее существенным в математическом моделировании, например, применительно к Бузулукскому бору [11], является установление связей продуктивности насаждений с комплексом почвенно-геоморфологических и гидрологических факторов и составления моделей продуктивности и экологической устойчивости насаждений. В этом видится переход от визуальных и коррелятивных заключений к получению математических моделей – к экологии количественной. Класс бонитета леса (наряду с типом леса или бора) является интегральным показателем взаимосвязей почв, гидрогеологии и лесной растительности и в тоже время показателем продуктивности почв, а лесорастительные свойства почв интегрально закодированы в названиях почв и типов леса (бора), то есть в их моделях (например, лишайниковый сосняк).

Построение и оценку регрессионных моделей предусматривает регрес-

сионный анализ. Построение регрессионных (порождающих) моделей при эмпирическом исследовании является центральным моментом, обуславливающим его теоретическую и практическую ценность. Статистические процедуры (ковариации и корреляции, зависимые и независимые случайные величины, их нормальное распределение, статистические методы, двухмерный случай, коэффициенты корреляции, линейные связи и т.д.) носят подготовительный характер, определяя условия, в которых может применяться тот или иной вариант построения регрессионных моделей исследуемых явлений. При этом теоретические ограничения на применимость тех или иных регрессионных моделей значительно уже, чем проведение исследований в рамках, например, корреляционной модели. Мы можем здесь применить более тонкие математические методы для более сложных объектов [12, 13], как например – сток поверхностный с элементарных водосборов, «дефляция почв и опустынивание» и т.д. Этапы описаны нами в статьях [11, 12, 13]. Регрессионный анализ служит главным инструментом при анализе почвенных, экологических процессов агро-экосистем. Полезность (но и опасность) любой линейной регрессии обуславливается правильной интерпретацией базы данных.

**База данных.** Еще в 1843 г. поляк Б. Трентовский писал в своих научных основах о практической деятельности управленца (кибернета) так: «Применение искусства управления без сколько-нибудь серьезного изучения соответствующей теории подобно врачеванию без сколько-нибудь глубокого понимания медицинской науки». Он, в частности, подчеркивал, что действительно эффективное управление должно учитывать факторы, существенно влияющие на объект управления. Основоположником теории систем заслуженно считают академика Е.С. Федорова (1891), которому принадлежит наблюдение, что главным средством жизнеспособности и прогресса систем вообще является не их приспособленность, а способность к приспособлению («жизненная подвижность»), не стройность, а способность к повышению стройности. В наше время это воплощено в трудах академика Г.А. Заварзина.

Очередная ступень в раскрытии системности, как самостоятельного предмета, связана с именем А.А. Богданова. Его представления заключаются в том, что все существующие объекты и процессы имеют определенный уровень организованности; все явления рассматриваются им как непрерывные организации и дезорганизации; уровень организации тем выше, чем сильнее свойства целого отличаются от простой суммы свойств его частей. Самой,

пожалуй, важной особенностью тектологии (третий том его книги «Всеобщая организационная наука (тектология)» [5]), является то, что основное внимание уделяется закономерностям развития организации, рассмотрению соотношений устойчивого и изменчивого, значению обратных связей, учету собственных целей организации и роли открытых систем. Рассматривая проблему кризисов, то есть таких моментов в истории любой системы, когда неизбежна коренная «взрывная» перестройка ее структуры, (бифуркация – по В. Пригожину [20]), он подчеркивал роль моделирования и математики как потенциальных методов решения задач тектологии. Основные идеи тектологии А.А. Богданова превзошли многие положения современных кибернетических и системных теорий.

Более совершенное понимание системных понятий человеческой деятельности началось с 1958 г. после выхода книги американского математика Н. Винера [7], где он с позиций кибернетики анализирует процессы, происходящие в обществе. Создание «мыслящих машин» были восприняты некоторыми философами буквально, и кибернетика была объявлена идеалистической лженаукой, служанкой империализма.

Академик А.И. Берг [3] суть кибернетики воспринял как науки об оптимальном управлении сложными динамическими системами, а А.Н. Колмогоров [16] и Н.Н. Моисеев [18, 19] – как науки о системах, воспринимающих, хранящих, перерабатывающих и использующих информацию. И.И. Шмальгаузен [26] использовал кибернетические методы в биологии при исследовании систем различной природы: биологической, экономической и др. (например, модели плодородия почвы при кадастровых работах, где «вмешательство» специалистов позволяет рассмотрение объектов с другой точки зрения). Кибернетический подход к системе определенной природы помогает, с одной стороны, совершенствовать модели, методы, подходы, а с другой – прояснять проблемы, а главное – содействовать повышению системности моделей и выдвигать новые проблемы и т.д.

Осознание информации как всеобщего свойства материи и возможности ее количественного описания, развитие методологии моделирования вообще и в особенности – идеи математического эксперимента с помощью компьютера (имитационные модели, игры), связаны с развитием системных представлений (например, обратные связи в системах), то есть связаны с кибернетикой Винера. Размах компьютеризации, который происходил и проис-

ходит буквально на наших глазах, сыграл свою роль в развитии общественного сознания, человеческой практики и культуры. В развитие кибернетических идей внесли свой вклад Эшби [27], Саймон [21], Хакен [25], Аккофф [1], Н.Н. Моисеев [18, 19], Г.А. Заварзин и многие другие ученые.

Однако, как показало дальнейшее развитие, винеровская кибернетика «грешит» техницизмом, качественная сторона информации принесена в жертву количественной, то есть принцип оптимальности должен быть реализован только в формализованных (количественных, а не только качественных) задачах. Но это был важный и нужный этап, где обнаружились недостатки в самой теории. Идею построения теории, приложимой к системам любой природы, выдвинул австрийский биолог Л. Берталанфи [4]. Он отыскивал структурное сходство законов, установленных в различных общесистемных закономерностях. Именно он ввел понятие открытой системы, подчеркнув особое значение обмена системы энергией и информацией (негэнтропией) с окружающей средой (космическим пространством). Благодаря вводу негэнтропии извне, система приходит в новое подвижное равновесие (или подвижное устойчивое неравновесие – по И. Пригожину), то есть к гомеостазису.

Придание общей теории систем формального характера осуществлено М. Месаровичем [17]. Им же сформулированы идеи иерархичности многоуровневых систем, а также основы общей их теории в системологии. Интерес представляют в этом отношении результаты, полученные Б.С. Флейшманом [24], который разработал математические основы системной экологии. Подходы к исследованию сложных систем, обоснованные Д. Клиром [14], заключаются в приложении эпистемологической технологии описания объекта как системы.

Дело в том, что в XXI веке человечество уже вплотную столкнулось с комплексом экологических проблем, связанных с «техническим, технократическим», антропогенным воздействием на природные системы, приводящим, в частности, к крупномасштабной деградации не только почвенных и земельных ресурсов, но и социальных сфер, науки и т.д.

Среди целого ряда причин, теоретико-методологические ограничения характерны для современного этапа развития «теоретического фундамента» знаний о Земле и Космосе как источнике жизнеобеспечения современных и будущих цивилизаций. Переход к новой гносеологической системе координат (парадигме) – это, на наш взгляд, попытка создания теоретической моде-



ли почвы, представляющей собой основной объект исследований всего комплекса наук о Земле. Исходная модель почвы – своеобразная «карикатура» или интерфейс, содержанием которого является система унифицированных связей и сигналов, посредством которых устройства вычислительной системы соединяются друг с другом и обеспечивается соединение между реальным миром и абстрактным его отображением. Модель называется исходной в том смысле, что является источником эмпирических данных, используемых на более высоких эпистемологических уровнях. Модели отличаются друг от друга уровнем знаний относительно переменных (предиктанта и предикторов) соответствующей исходной модели.

Возьмем экосистему, которая занимает определенное место в иерархии различных систем, на физико-биологической «страте» организации материи и будем размышлять, что экосистема – это онтологически одностратная система. А что такое агро-система? Это не только физико-биологическая, но и социально-антропотехническая – по известным причинам. Она гораздо сложнее, чем экосистема, так как она уже многостратная, в ней присутствует «царь природы», «неразумное дитя планеты» – человек.

Разберем несколько понятий самой системы.

1. Устойчивость системы – способность противостоять внешним воздействиям в целях самосохранения. Агро-система – менее устойчива, так как она плохо адаптирована к природе.

2. Живучесть – активное подавление (устранение) ею вредных факторов (закон Любви В.В. Докучаева).

3. Эмергентность (эмергентность) – степень несводимости свойств системы к свойствам отдельных элементов.

4. Динамичность – зависимость структуры и характера поведения системы от времени.

5. Стохастичность – наличие случайных (вероятностных) механизмов, определяющих ее поведение во внешней среде.

6. Целесообразность – цель, определяющая поведение системы во внешней среде. Агро-экосистема имеет более высокий уровень целесообразности, чем экосистема, так как здесь задействован еще и человек.

7. Уровень организованности системы, который определяется уровнем эмергентности (3), устойчивости (1) и целесообразности (6).

Модели этих (агро- и эко-) систем, как и всех других систем вообще,

составляют системологию – науку о системах (например, «Общая теория агросистем» и т.д.). Так вот, построение системных моделей и их применение при исследованиях должно базироваться на следующих принципах: формирование законов; рекуррентного объяснения в виде теорем (например, вывод свойств биоценоза из постулируемых свойств и связей составляющих его популяций, затем – составляющих популяции – особей, и т.д.). Поэтому вполне естественно определять сложность системы сложностью ее поведения.

Иногда, к сожалению, ученые пишут столбцы уравнений и разных графиков, то есть сводят исследования к формальному увеличению числа и сложности вульгарных «описывающих уравнений». И каких только нагромождений нет! Есть такое понятие в системологии (методологии) «бритва Оккама» – это принцип минимаксного построения моделей. Как говорил Н.Н. Моисеев в своих лекциях: «Теория должна состоять из простейших моделей систем нарастающей сложности» [19]. Вдумайтесь в эти слова! Каждая из них должна хотя бы в минимальной (мин) степени отражать каждый из нарастающих (макс) уровней сложности поведения систем. Другими словами, формальная сложность модели (например, число описывающих ее уравнений) должна соответствовать неформальной сложности системы (сложности ее поведения). Именно в этом смысле следует понимать сущность принципа «бритвы Оккама».

Грубая модель системы (карикатура на ее образ) может оказаться проще более точной модели более простой системы. Это вселяет оптимизм при исследовании сложных систем. Таким образом, для построения теоретических моделей систем, в том числе и сложных, необходимо знание принципов их усложняющего поведения.

Какие же это принципы усложняющего поведения?

- 1) вещественно-энергетического баланса (на основе закона сохранения, и не только; действие космоса);
- 2) гомеостазиса (на основе обратных связей);
- 3) выбора решений (на основе индуктивного поведения) – сложные системы;
- 4) рефлексии (опережающее отражение) и т.д. Например, связи с поведением партнеров – «он думает, что я думаю».

Н.Н. Моисеев говорил примерно так: При построении сложных моделей надо систему сложную расшивать на части, а после анализа – сшивать.

Принцип: математические модели теории должны быть «простыми» (согласно третьему принципу усложняющего поведения). Таким образом, нами сделана попытка как-то объяснить (упрощенно сформулировать) основные принципы построения теоретических моделей, которые должны лежать в основе научно-обоснованного управления плодородием почвы в агросистемах (в данном случае).

Вспомним:

а) А. Тэнсли (1935): подсистемы природы, «которые являются результатом интеграции всех живых и неживых факторов среды». Об этом говорил еще В.В. Докучаев [8].

б) Эванс: «экосистема как основная единица экологии»; его статья (1956) – «от кочки до оболочки».

в) В.Н. Сукачев [22] – биогеоценоз как система на известном протяжении земной поверхности однородных и однородно взаимодействующих природных систем: атмосферы, горной породы, гидрологии, растительности, животного мира, микроорганизмов и почвы. Но он сначала исходил (как и Тэнсли) при разработке теории из геоботанического понятия о фитоценозе и его границах.

г) В.И. Вернадский [6]: «пленки живого вещества на поверхности земли», (фракталы, К.А.). Они образуют мозаику, отражая разнообразие биотических и абиотических условий в биосфере.

д) В.А. Ковда [15] – в пределах суши выделены биомы: тундра, тайга, листопадные леса, степь, пустыня, горы, тропические леса. Они делятся по В.А. Ковде – на крупные участки континентов с определенными тектоническими условиями и геохимическими связями, составом растений, животных (человека), почвенного покрова. Они слагаются из геохимических ландшафтов – комплексов геоморфологических элементов на земной поверхности. Здесь не упущены вопросы местообитания и эволюции в генетически разобщенных биогеографических территориях. Экосистема занимает определенный объем трехмерного пространства со своими характеристиками, миграциями, потоками и т.п. Системы-то открытые!

Здесь надо бы сказать о воде, как переносчике информации. Без воды – нет жизни. Благодаря воде, экосистему рассматривают как «энтропийный насос». В воде, видимо, все закодировано, вся Программа Планеты и Космоса. Экосистема обменивается ей горизонтально и вертикально. Пары идут вверх,

чистая вода получает новую информацию и возвращается на землю «отмыть» нас, наши грехи. Древняя истина гласит: «Каждая капля воды хранит в себе силу космической мудрости»

Биомы разделены на биогеохимические области, в пределах которых биогеохимические процессы, протекающие на фоне климатических условий данного биома, отличаются качественной спецификой. Области – это биогеохимические провинции или почвенно-геохимические формации, имеющие определенные геолого-тектонические условия, определенный характер биогеохимического состава и режима, свое растительное и животное население и свой почвенный покров. Эти крупные территории сами имеют мозаичное строение и слагаются из геохимических ландшафтов – комплексов геоморфологических элементов на земной поверхности, находящихся в геохимической связи [2]. Геохимический ландшафт состоит из геохимически сопряженных экосистем (биогеоценозов – по В.Н. Сукачеву).

После принятия Концепции экосистемы – биогеоценоза на I Международном экологическом Конгрессе (First International Congress of Ecology, 1974) трактовка этих двух терминов («экосистема» и «биогеоценоз») стали синонимами. Лейтмотивом Конгресса были вопросы изучения потоков энергии, круговоротов веществ и популяционно-ценотических процессов в экосистемах. В контексте системного подхода термин «экосистема» более естественен.

Состав экосистемы: а) аэротоп – атмосфера; б) фитоценоз – растения – продуценты, включая живые корни; в) зооценоз – наземные животные – консументы; г) почва (без живых корней!), но включает подстилку растений; д) подстилающая горная порода, грунтовые воды в биогеохимической связи с почвой. Любая из этих систем очень сложна и требует обширных, многосторонних познаний.

Почва, например, состоит из неживой части – эдарофтона и популяций почвенных организмов, разделяемых на биотрофов, экрисотрофов (потребителей прижизненных выделений растений) и сапротрофов. Фитоценоз состоит из популяций растений разных видов; подсистема консументов – из популяций животных, объединяемых в группы наземных биотрофов и наземных сапротрофов. Извне на экосистему действуют внешняя атмосфера и соседние экосистемы, с которыми она обменивается энергией и веществами.

Новизна экологического подхода Вернадского-Сукачева состоит в от-

крытии энергетической и биогеохимической основы экологических отношений в экосистеме (конкуренция, комменсализм, мутуализм и т.д.) в рамках единого биогеохимического и энергетического подходов. Таким образом, специфика раскрытия (познания) экологических отношений состоит, как раз, в раскрытии энергетических и биогеохимических механизмов, через которые идут через подсистемы к самой системе.

**Функции системы.** По В.И. Вернадскому [6], можно говорить о подфункциях: а) функция синтеза и разложения органического вещества; б) газообмена; в) окисления; г) восстановления; д) концентрирования химических элементов.

С позиций биогеохимии система представляет собой определенный объем в пределах экосферы (биогеохимической оболочки) Земли, где постоянно циркулируют потоки веществ и энергии. Причем большинство циклов обмена вещества практически замыкается в пределах экосистемы. А энергия рассеивается в виде тепла (поток энергии, а не ее круговорот). Задача познания функции экосистемы выступает как главная цель ее изучения, поскольку именно в функционировании проявляются особенности типов экосистем и их реакции на разностороннее «творение» человека.

**Система нелинейных моделей.** Модели плодородия, характеризующая комплекс агрономически важных параметров данного таксона применительно к определенным типам агроценозов, опосредованно отражают специфику технологий, культур на фоне климатических условий. Эти модели призваны служить информационной основой целенаправленного регулирования не только лабильных, но и относительно консервативных свойств и режимов. Природа и значимость этих параметров специфичны для отдельных таксонов. При радикальных антропогенных изменениях (антропогенезе) почвы отличаются как от природных аналогов, так и друг от друга не только по отдельным свойствам и режимам, но и по совокупности системных характеристик, как объектов управления. Способность почв сохранить основные структурно-функциональные характеристики при усилении внешних возмущающих факторов в значительной степени будет зависеть от зонально-генетических особенностей. При интенсивном хозяйственном использовании почв упорядоченность связей параметров почвенного плодородия существенно нарушается. Падает компенсаторная способность почв по отношению к отклонениям внешних факторов и, соответственно, возрастает вероятность проявлений не-

гативных последствий. Для оценки и анализа системы взаимосвязей параметров почвенного плодородия основных подтипов и родов черноземов и темно-каштановых почв (в том числе эродированных и дефлированных) нами был использован нормативный подход и создана нормативная база данных «Почва», «Погода», «Гидрогеология», «Ветровая и водная эрозия» по основным свойствам и признакам этих баз объемом за 120-60-45-36 лет по основным параметрам, свойствам и признакам, а по некоторым («Ветровая эрозия») сформированы «Экстремальные периоды развития пыльных бурь» [13]. Теоретическое обоснование построения многомерных моделей, характеризующих почвенное плодородие, предъявляет повышенные требования к информативности ее критериев. Поэтому выбор главных зависимых и независимых переменных величин (предиктантов и предикторов) является одним из важнейших этапов системного анализа. Параметрическое описание этих и других сложных систем (в том числе почвенных) предполагает, что каждый из параметров (или их соотношений) с достаточной долей надежности отражает комплекс взаимосвязанных (ковариантных) свойств и процессов.

Полученные результаты послужили нам основой для выбора главных переменных величин при разработке систем многомерных нелинейных моделей [11, 12, 13). При этом синергетическое влияние определенных параметров, определяющих почвенное плодородие, можно определить системой двумерных (линейных или нелинейных) моделей. Матрица, характеризующая основные закономерности многомерных нелинейных взаимосвязей должна содержать в совокупности, по крайней мере, более 50% взаимосвязей, отвечать адекватному существованию выявляемых в системном процессе параметров, дающих теоретическую возможность для роста адекватности модели.

**Анализ взаимосвязей параметров почвенного плодородия черноземов Оренбургской области.** Повышение плодородия почв выступает в числе главных составных аргументов оптимизации использования земельных ресурсов, нацеленной на повышение продуктивности агросистем во всех почвенно-агрономических зонах. Решение этих глобальных проблем возможно только на основе серьезных теоретических исследований параметров и генетических особенностей почвенных таксонов, а также типов агроэкосистем. Особенности почвенного покрова региона, энергетика почвообразования и гигратуры климата, как функции его природно-экологических условий,

определяют доминирующие зональные подтипы почв. Еще в 1892 г. В.В. Докучаев писал, что «Почвы и грунты есть зеркало, яркое и вполне правдивое отражение весьма тесного векового взаимодействия между водой, воздухом, землей, с одной стороны, растительными и животными организмами, с другой... Неизбежно, что почвы должны располагаться по земной поверхности в строжайшей зависимости от климата, растительности и пр. ...» [8].

Последовательная смена с северо-запада на юго-восток зональных выщелоченных и типичных черноземов юга лесостепи на степные обыкновенные и южные черноземные почвенные таксоны обусловлена, прежде всего, биоклиматическими особенностями региона, корректируясь геоморфологией. Резкая континентальность климата региона подчинена перемещению воздушных масс в долготном направлении, вызванным разницей атмосферного давления согласно «оси Воейкова», которая простирается на запад от Сибирского антициклона и служит своеобразным ветроразделом на Евразийском материке по линии Кишинев-Харьков-Саратов-Уральск-Кызыл.

К северу от зоны высокого давления ветры дуют с запада и юго-запада (теплые, влажные), формируя лесостепь с выщелоченными и типичными черноземами, а к югу – сухие и холодные восточные и северо-восточные ветры, создавая степь и сухую степь с черноземами обыкновенными, южными и темно-каштановыми почвами.

Как уже сказано выше, зональные черты Предуралья и Зауралья тесно связаны и с геоморфолого-геологическими факторами, корректирующими микроклимат, мезоклимат (табл. 1) [13].

Предуралью свойственна высокая расчлененность овражно-балочной сетью (коэфф. расчлененности до  $1,4 \text{ км/км}^2$ ), Зауралью – пенепленизированный рельеф (коэффициент расчлененности до  $0,4 \text{ км/км}^2$ ), Низкогорному Уралу – грядово-низкогорный, обусловленные разной геологической их историей. Генетические профили зональных почв Предуралья имеют более четко выраженные и развитые профили и горизонты накопления органического вещества и биогенных элементов, так как биоклиматические условия здесь более благоприятны. В пределах Зауралья сложность структуры ландшафтов, почвенный покров в большей степени подчиняется геологическому фактору – почвообразующим и подстилающим породам (коры выветривания, комплекс пород палеозоя). Здесь почвенная зональность не только слабее выражена, но отмечается и более четкая инверсия зон, обусловленная литогенным

фактором, сдвигающим на север в лесостепь языки степей и сухих степей (и наоборот), в результате его лесостепь называют «ложной лесостепью» и т.д.

Таблица 1. Ландшафтно-экологическая характеристика ветровых коридоров

Ландшафтная характеристика и ландшафтообразующие факторы	Коридоры	
	И. Предуральский	II. Зауральский
Площадь ветровых коридоров, тыс.га	1160,0	1200,0
Распаханность, %	52	50
Лесистость, %	<1	
<b>Климатические факторы</b>		
среднегодовое количество осадков, мм	350-450	300-380
высота снежного покрова, см	25	23
среднемноголетний запас воды в снеге, мм	80	70
сумма положительных $t^0$ воздуха за период с $t > 10 \text{ C}^0$	2770	2600
максимальная $t^0$ воздуха, $\text{C}^0$	40	42
абсолютный минимум $t^0$ воздуха, $\text{C}^0$ за год	-44	-47
средняя $t^0$ воздуха в 13 часов за июль, $\text{C}^0$	27	26
средняя годовая $t^0$ воздуха, $\text{C}^0$	3,9	2,6
число дней с относительной влажностью воздуха $\leq 30\%$ (апрель-октябрь)	72	73
$\geq 80\%$	14	12
среднее число дней с суховеями различной интенсивности за вегетационный период	35,4	36,8
в т.ч. слабые	27,9	29,3
в т.ч. интенсивные	6,5	6,7
в т.ч. очень интенсивные	1,0	0,8
Число дней с метелью (октябрь-апрель)	26	34
Средняя скорость ветра (год), м/с	4,2	4,6
Число дней с сильным ветром ( $\geq 15$ м/с)	22	19
<b>Геоморфологические факторы</b>		
средняя взвешенная высота	260	250
максимальная абсолютная высота	350	
базис эрозии	110	80
<b>Почвообразующие породы, % площади коридора</b>		
покровные, делювиальные и древнеаллювиальные карбонатные суглинки	45	35
те же легкого гранулометрического состава	18	25
засоленные глины, пестроцветные коры выветривания, в том числе подстилаемые элювием плотных пород	30	33
	15	17
<b>Агроэкологические типы земель, % площади коридора</b>		
черноземы обыкновенные и южные на делювиальных и покровных карбонатных суглинках	28	26
темно-каштановые маломощные на делювиальных и покровных карбонатных суглинках	26	26
солонцово-солончаковые комплексы на третичных засоленных глинах и корах выветривания	23	24
темно-каштановые легкосуглинистые, супесчаные и песчаные развеваемые арены	18	20



Почвенные профили черноземов в Зауралье, сформированные на неразвитой матрице - лессовидных покровных карбонатных суглинках, близко подстилаемых в начале-середине профиля (80-150 см) пестроцветными глинами древней коры выветривания, более подвергаются сезонным криотурбациям: выпиранию тиксотропной массы, образуя гумусовые затеки, карманы, клинья, трещины, фитили, криогенные пятна и др. Образуются варианты «черноземов–щельников» и «карликовых» солонцов.

В Зауралье (северная и центральная части) большая доля пашни занята обыкновенными и южными черноземами, имеющими меньшую пахотоемкость, меньшими коэффициентами устойчивости ( $\eta_{уст} = 0,56$  против  $0,69$  - в обыкновенных черноземах Предуралья).

В пределах низкогорного Урала формируются почвы с сильно укороченным, фрагментарным профилем – неполноразвитые (литоземы, петроземы), прежде всего, за счет пестроты коренных почвообразующих пород, рельефа палеозоя. Они отличаются по возрасту, литологическому и геохимическому составу, их внутрипрофильной инверсии за счет сезонных криотурбаций (по грядам – сильноокислых пород).

Многообразие вариантов почв часто не укладывается в современные классификации.

На юге Предуралья и юго-востоке Зауралья черноземы южные (черноземная степь) сменяются темно-каштановыми почвами с преобладанием почв легкого гранулометрического состава (сухая степь), где особенно хорошо выражены широтная зональность и сложность структуры почвенного покрова – мозаичность (коэффициент сложности  $38,4-39,1$ ), усиленная широким распространением почв галогенного ряда – солонцов, солончаков, а также литогенных солонцов, сформированных на переотложенных корях выветривания.

Черноземам типичным, обыкновенным, южным Предуралья было отпущено больше времени на почвообразование. Они характеризуются ярко выраженными гумусовыми горизонтами накопления органического вещества, обменных оснований и биогенных элементов, так как формирование их протекает в более благоприятных биоклиматических условиях (гигратура климата, естественный состав растительности), имеют большую мощность. Так, профиль черноземов обыкновенных Предуралья имеет следующее строение:

$A(H)_{38}^0 = AB(H)_{52}^{38} = BCk(Phk)_{97}^{52} \sim Ck(PK)_{99}^{99}$ , где:

$A(H)$  – гумусовый горизонт;  $AB(H)$  – гумусовый переходный горизонт;  $BCk(Phk)$  – нижний переходный горизонт;  $Ck(PK)$  – почвообразующая порода.

Профиль обыкновенных черноземов Зауралья имеет следующее строение:

$A(H)_{30}^0 = AB(HPhk)_{48}^{30} = BCk(Phk)_{90}^{48} \sim Ck(Pk)_{90}^{90}$

И. Пригожин [20], изучая термодинамику неравновесных физических систем любой природы, переоткрыл известные положения систем: иерархичность, несводимость, наличие наряду с детерминированными системами случайных процессов на каждом уровне организации и др. Материя не является пассивной субстанцией, ей присуща спонтанная активность, вызванная неустойчивостью неравновесных состояний, в которое приходит любая система при взаимодействии с окружающей средой (переломные моменты – точки бифуркации, куда пойдет, будет ли она более или менее организованной (диссипативной) – принципиально предсказать невозможно).

Таким образом, согласно И. Пригожину, мы можем классифицировать системы как по вертикали, так и по горизонтали. Это предусмотрено системологией, которая классифицирует системы по упорядоченным стратам. По вертикальным стратам: общественные исследования, интерфейс, техника, наука и т.д.; и по горизонтальным стратам: биологические системы, физико-химические, социальные и т.д. Природа – это мир многосложных систем, где существует порядок и гармония, где уровни организации задают определенные типы систем. В пределах страты свойственна иерархическая упорядоченность систем, что надо учитывать.

Когда функциональная модель очень сложна, и когда возможности для получения независимых оценок эффектов ограничены, часто удается построить линейную предсказывающую модель, которая, хотя в некотором смысле и нереалистична, но, по крайней мере, воспроизводит основные черты поведения изучаемого отклика (по схеме стимул-реакция). Такая предсказывающая модель весьма полезна и, при определенных условиях, может вести к реальному проникновению в сущность процесса. При построении предсказывающих моделей такого типа методы множественной регрессии оказываются наиболее ценными, так как здесь могут использоваться «неупорядоченные данные» (в частности коррелированные

между собой). Опираясь на подобную модель, можно выбрать разумную линию поведения для дальнейшего экспериментирования, уточнив важные переменные и отсеять несущественные переменные.

Вместе с тем применение множественной регрессии требует особой осторожности, чтобы избежать непонимания и неверных выводов. Поэтому, организация схемы (методики исследования) для решения задач эмпирического исследования (почвенных процессов) методами множественного регрессионного анализа не только полезна, но и крайне необходима.

Блок-схема процесса построения регрессионной модели приведена на рис. 1. Предлагаемая процедура делится на три стадии - планирование, разработку и использование.

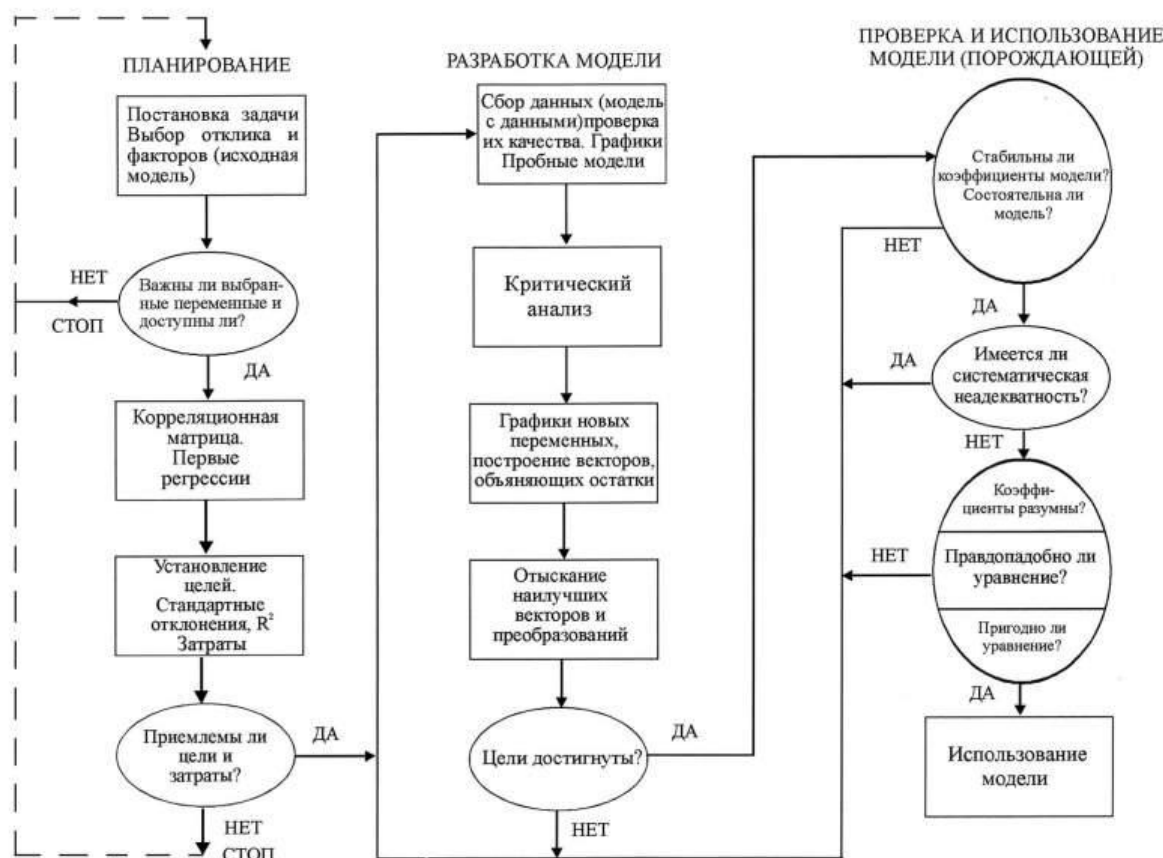


Рис. 1. Блок-схема алгоритма построения регрессионной модели

*Постановка задачи, выбор отклика и предполагаемых факторов (построение исходной представляющей модели).* Постановка задачи и построение исходной представляющей модели – наиболее важная фаза эмпирического исследования. Постановка задачи должна быть весьма четкой, нужно точно установить отклик, предикторы и соответствующие параметры.

Здесь не нужно связывать себя жесткими ограничениями, необходимо включать в исходную представляющую модель любые мыслимые входные и выходные свойства исследуемого объекта. Список атрибутов и соответствующих переменных может быть очень длинным, но в результате обсуждения он должен быть последовательно сведен к разумному числу переменных ( $X$ ). При этом нужно помнить, что в любой статистической процедуре отсев факторов никогда не осуществляется однозначно. В конце концов, необходимо получить конкретную исходную модель, задающую отклик (отклики) и соответствующую множеству факторов.

*Первоначальный анализ исходных переменных и оценка их доступности (построение и оценка каналов наблюдения).* Полученный при формулировке задачи (построение исходной представляющей модели) список факторов следует подвергнуть тщательнейшему исследованию. Многие из этих предикторов ( $X$ ) можно исключить, как неизмеримые (не поддаются формализации), то есть для них нет возможности практически получить приемлемый канал наблюдения. Такой фактор либо заменяют другим, который измерим и может использоваться вместо неизмеримого фактора, либо же находят новый измерительный инструмент (строят новый канал наблюдения). Вторая альтернатива требует умения и затрат, навыков обдумывания, и исследователю предстоит определить, какая из двух альтернатив предпочтительнее. Такая научная и практическая оценка всех переменных должна быть сделана именно на этой стадии планирования, то есть до того как будет собрана основная (фундаментальная, адекватная) база данных и сформирована модель с данными.

Следующий вопрос таков: в состоянии ли мы получить полное множество фактических данных одновременно для всех выбранных предикторов и откликов? Будет ли наше множество данных полным? Есть много случаев, когда этого не удастся достичь, и приходится искать какие-то компромиссы, другие решения и т.д.

Вот одна из типичных ситуаций: все данные можно собрать одновременно, но измерения откликов нуждаются в дополнительной математической обработке или получаются после дополнительных лабораторных анализов, что это требует дополнительных временных и финансовых затрат, а необходимые средства отсутствуют. После полной проверки всех переменных надо провести переоценку возможностей

решения задачи (переопределить исходную модель), сделать ее более экономичной, но более адекватной.

*Оценка принципиальной разрешимости задачи.* Так как изложенная выше процедура отсеивания делает мыслимым исключение многих факторов (предикторов или аргументов), то уменьшаются шансы решить задачу вообще. Однако этого, как правило, не происходит. На данной стадии планирования должно быть принято одно из трех возможных решений:

- а) первоначальный замысел следует отбросить;
- б) замысел следует пересмотреть в свете новых знаний, полученных к этому моменту;
- в) замысел представляется реальным, и планирование следует продолжить.

После принятия решения о продолжении исследования в соответствии с разработанной ранее исходной представляющей моделью необходимо перейти к формированию начальной модели с данными (к начальным процедурам сбора данных) (см.схему 1).

*Корреляционная матрица и первые прогоны регрессии.* Дальнейшее планирование должно проводиться на основе экспериментальных данных, и именно теперь можно проанализировать все трудности, возникающие в связи с поставленной задачей, поскольку надо составить план-график выполнения работы с учетом трудоемкости, бюджета, лаборатории и др.

Если это возможно, то необходимо получить первоначальную выборку данных, вычислить и распечатать для нее описательные статистики, корреляционную матрицу и т. д.

Следующее, что нужно и важно сделать – установить для каждого из рассматриваемых откликов корреляции с ним каждой из  $X$ -переменных. При этом для каждого отклика хорошо было бы обнаружить одну-две большие корреляции. Если же их нет, то придется вновь проанализировать всю ситуацию. Может случиться так, что диапазон изменения  $X$ -переменных окажется слишком мал, а пока пространство  $X$  не будет «достаточно большим», получить хорошее предсказание будет, скорее всего, нелегко. Подобные отсечения и ветвления на столь ранней стадии планирования позволяют экспериментатору получить разумные оценки ожидаемых затрат времени и денег, а также представление о шансах на создание отличной модели для предсказания.

*Установление целей и составление сметы расходов.* На этой стадии необходимо установить цели предпринимаемой работы, составить план-график решения конкретных задач, подготовить задания и сформулировать требования к оборудованию и программному обеспечению. Разработка программ – трудное, но необходимое занятие, поэтому они являются дорогим интеллектуальным продуктом.

**Разработка регрессионных моделей.** *Сбор данных (получение полной модели с данными), проверка их качества, построение графиков, пробная прокатка модели.* Здесь реализуется полная процедура сбора данных с использованием ранее построенных каналов наблюдения. При этом необходимо обеспечивать жесткий контроль качества получаемых данных. Способность тщательного управления процессом сбора данных гарантирует удовлетворение всем ограничениям, введенным на разных этапах планирования. Нельзя приступать к построению модели, не обеспечив должного качества базы фундаментальных данных.

После сбора и оценки качества данных можно приступать к самому процессу моделирования, где реализуются такие процедуры, как нанесение данных на графики, проверки, подбор модели, исследование остатков использованием аналитических подходов, некоторые из которых будут рассмотрены ниже.

*Критический анализ.* По мере продвижения работы потенциальные модели следует подвергать качественному критическому анализу для оценки их соответствия тем результатам, которые получены в данной области при использовании других подходов.

*Графики для новых факторов и построение векторов, которые объясняют остатки.* Если (как это обычно и бывает) в результате качественного критического анализа необходимо опробовать новые факторы, то надо получить требующиеся данные и исследовать их вместе с соответствующими значениями отклика и остатками для полученного уравнения.

*Исследование некоторых построенных уравнений регрессии.* Выбранные предикторы (X) теперь можно включить в уравнение регрессии. В нем могут участвовать и преобразованные предикторы. Например, по конкретным графикам для остатков можно выяснить, что лучше применить логарифм предиктора, чем сам предиктор или что-то другое? Преобразования предикторов необходимо выбирать, исходя из содержательной стороны

исследуемого процесса. Это очень важно!

*Оценка достижимости целей исследования.* Если в итоге (иногда после нескольких попыток), обнаружено, что получена наилучшая модель, то необходимо изучить её в свете целей, сформулированных на стадии планирования. Если заданные стандарты не достигнуты, то решается вопрос о том, следует ли приостановить реализацию работы или повторить весь цикл. При этом, быть может, удастся изменить исходные цели. Это одна из контрольных точек в работе.

### **Проверка и использование порождающих регрессионных моделей.**

*После того как уравнение удовлетворит множеству целей, выбранных на стадии планирования, и модель будет признана полезной для предсказания, целесообразно определить процедуры для ее проверки и использования.* Физиолог А.А. Ухтомский [23] писал: «Нельзя ругать модель за то, что с ее помощью можно получить неверный результат, как нельзя ругать топор за то, что им можно поранить руку».

*Оценка стабильности коэффициентов модели в выборочном параметрическом пространстве.* При изучении стабильности параметров полезно различать два вида массивов данных: данные, собранные в течение длительного отрезка времени («продольные» данные), и данные, собранные за короткое время («поперечные» данные, «мгновенная фотография» объекта).

Данные за длительное время. Если модель была построена по наблюдениям, проведенным в течение длительного времени, то можно проверить устойчивость  $b$ -коэффициентов, строя модели для более коротких отрезков времени и сравнивая оценки. Если, например, имеются месячные данные за четыре последовательных года, то можно построить модели за каждый год отдельно и получить четыре множества оценок коэффициентов регрессии. Если оцениваемые коэффициенты проявят определенную тенденцию, то использование уравнения, построенного по всем данным для целей предсказания, будет неразумным.

Данные, полученные за короткое время. Если данные можно рассматривать как информацию, собранную в «одно мгновение», то для такого случая есть несколько методов. Основная идея этих методов заключается в том, чтобы сначала на основе некоторого рационального критерия (или критериев) разделить имеющийся массив данных на

подмножества, а затем, использовать одну часть данных для построения «предсказывающего» уравнения, а оставшуюся часть – для «проверки» («экзамена») этого уравнения, то есть для того, чтобы посмотреть, насколько хорошо оно предсказывает! Как и при выборе переменных, здесь нет единственного или наилучшего ответа на все вопросы. Зато есть несколько подходов, среди которых можно выбирать.

*Подход «выбрасывать по одному наблюдению».* Метод PRESS, предложенный Алленом (1971), представляет собой процедуру проверки такого типа. После выбрасывания какого-нибудь одного наблюдения, строим заданную модель для тех наблюдений, что остались, предсказываем с ее помощью отброшенное значение и получаем квадрат расхождения между фактическим и предсказанным. Повторяем эту операцию, последовательно отбрасывая каждую из экспериментальных точек; в итоге получим сумму квадратов расхождений для некоторой данной модели.

Исследуя, таким образом, различные модели можно найти некоторую «наилучшую» модель, которая окажется наиболее «жизнеспособной» при фиксированном наборе данных.

*Подход «выбрасывать более, чем по одному наблюдению».* Джиссер (1975) рассматривал метод, аналогичный методу Аллена, в котором исходная идея обобщалась на случай отбрасывания  $m$  наблюдений и использования остальных  $(n - m)$  наблюдений для построения модели и испытания ее на « $m$ » отброшенных точках. Стоун (1974), обсуждая методы такого типа, попытался найти «оптимальное» разбиение на подвыборки.

Существуют и некоторые другие методы верификации регрессионных моделей. Проведение какой-либо из указанных проверок – полезная и необходимая часть полного метода множественного регрессионного анализа. Иногда информация, полученная таким путем, может привести к полному пересмотру всей задачи.

*Оценка на систематическую неадекватность.* Даже если параметры построенного уравнения оказываются очень стабильными, некоторые факторы все-таки могут быть пропущены. Всегда нужно исследовать остатки всеми возможными способами, чтобы выявить какие-либо признаки, указывающие на наличие подобных пропусков. Например, пропуск предиктора – тумана, росы, создающих влагу в песках при определении каналов питания лишайникового (любого типа) бора (сосняка) описан нами



при анализе данных по Бузулукскому бору [11].

*Практика рассмотрения моделей.*

**Приемлемы ли коэффициенты?** Этот вопрос может показаться необычным, но следует помнить, что моделью будут пользоваться и те, кто не подозревает о том, что регрессионные коэффициенты, вычисленные с помощью МНК (метод наименьших квадратов), зависят от остальных факторов, входящих в регрессию. Поэтому могут иметь место попытки предсказать отклик, меняя только один фактор и, используя соответствующий ему коэффициент, который теперь якобы хорошо заменяет остальные. Если все коэффициенты оцениваются независимо, то вред не будет большим. Однако, когда независимые переменные (и оцениваемые их коэффициенты) сильно коррелированы, доверять индивидуальным коэффициентам опасно. Эйнштейн говорил: «Когда все сходится (верно), я ищу ошибку». Разумно ограничить предсказание областью пространства  $X$ , в которой получены исходные данные; полезно также проверить, будут ли индивидуальные коэффициенты, безусловно, корректными.

**Правдоподобно ли уравнение?** Необходимо тщательно рассмотреть уравнение на «физический смысл», оценить подходящи ли включенные в уравнение факторы и нет ли очевидных пропусков (табл.2) (как мы выше привели пример модели по Бузулукскому бору).

**Пригодно ли уравнение?** Окончательная модель может содержать множество переменных, которые полезны для предсказания, но, возможно, ими нельзя воспользоваться для управления.

*5. Использование модели.*

Если все предшествующие критерии пропустили модель, и если все контрольные точки были благополучно пройдены, то следует определить процедуру использования модели. Физические условия меняются, и поэтому необходимо определить, когда отклонения фактических наблюдений от предсказанных значений указывают признаки несостоятельности модели.

Таковы основные принципы и этапы освоения метода множественного регрессионного анализа, которые должны использоваться при проведении эмпирических исследований сложных (почвенных) процессов, протекающих в агроэкосистеме и в любых природно-социальных системах вообще.

Таблица 2. Зависимость дефляционных потерь мелкозема почвы от климатических условий на ветровых коридорах (результатирующая регрессионная модель для зависимой переменной) [13]

Независимая переменная (факторы погоды)	Коэффициент регрессии	Уровень значимости	Доля влияния фактора
<b>I. Предуральский ветровой коридор (1951-1978 гг.)</b>			
Y-пересечение	-25,98	0,001	-
(t_5)(t_6) – средняя месячная температура воздуха (май)x(июнь), °С	-0,134	0,003	9,97
d_6 – дефицит влажности воздуха (июнь), мБ	1,229	0,006	24,08
(d_6)(d_7)(d_8) – дефицит влажности воздуха (июнь)x(июль)x(август), мБ	0,003	0,000	26,40
h_4 – продолжительность пыльных бурь, часы	0,315	0,025	9,36
o_11p – осадки ноября, предшествующего года, мм	0,104	0,000	5,62
o_7 – осадки июля, мм	0,089	0,001	5,48
t_5 - температура воздуха мая, °С	2,447	0,010	3,42
O_2 – осадки февраля, мм	0,071	0,0342	3,37
Для полной регрессии: Среднее по ряду Y = 6,77т/га; стандартная ошибка оценки = 2,13 т/га; R <sup>*</sup> - квадрат = 0,877; F-отношение = 16,9			
<b>II. Зауральский (1951-1978 гг.)</b>			
Y-пересечение	-64,63	0,008	-
(d_6)(d_7)(d_8) – дефицит влажности воздуха (июнь)x(июль)x(август), мБ	0,006	0,000	28,67
(b_4)+(b_5) – пыльные бури (апрель)+(май), дни	1,243	0,000	7,21
(o_10p)+(o_11p)+(o_12p) - осадки (октябрь)+(ноябрь)+(декабрь), мм	-0,169	0,002	3,96
d_7 – дефицит влажности воздуха июль, мБ	-6,668	0,000	4,22
t_7 – средняя месячная температура воздуха июль, °С	8,286	0,000	18,79
o_7 – осадки июль, мм	-0,279	0,000	13,54
(o_12p)+(o_1)+(o_2) – (осадки декабрь) + (осадки январь сл.года)+(осадки февраль сл.года)	-0,114	0,005	7,80
Для полной регрессии: Среднее по ряду Y = 11,68т/га; стандартная ошибка оценки = 4,10 т/га; R- квадрат = 0,842; F-отношение = 15,2			

\* Стандартная ошибка – ошибка при средних значениях всех предикторов, входящих в модель

Если исследователь желает применить множественную регрессию как средство, помогающее ему решать задачи выявления закономерностей формирования (плодородия почвы), то крайне необходимо, чтобы он

следовал приведенным выше ориентирам. При этом никогда нельзя отказываться от научного понимания исследуемого явления в угоду пристрастию к некоторым вычислительным процедурам, что, к сожалению, имеет место во многих «исследованиях».

### **Методологические ограничения.**

Реализуемые процедуры обработки данных при регрессионном анализе предполагают использование следующих методологических типов переменных. Для откликов (выходных переменных) должен использоваться методологический тип -  $\{2,1,1,1,1,1\}$ . Для входных управляемых переменных -  $\{2,1,1,0,1,0\}$ , а для входных неуправляемых -  $\{2,1,1,1,1,0\}$ . То есть речь идет только о метрических переменных, использование не метрических переменных недопустимо. Могут использоваться все введенные выше методологические типы параметров. Исследуемые отклик и неуправляемые входные переменные (факторы) должны рассматриваться как случайные непрерывные величины, имеющие дискретное представление. Управляемые входные переменные рассматриваются как детерминированные переменные.

### **Основные формализмы и методы регрессионного анализа.**

В основе построения регрессионных моделей лежит довольно развитая теория [9], позволяющая получать обоснованные варианты моделей на базе эффективных вычислительных процедур. Здесь мы приведем только основные идеи и формализмы, обеспечивающие выбор и построение соответствующих регрессионных моделей.

Пусть мы имеем  $N$  входных переменных  $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_N\}$  и выходную переменную (отклик), отвечающих определенным выше методологическим ограничениям. В результате измерений получена модель с данными, представляющая собой матрицу:

$$d = \begin{bmatrix} x_{0,1} & x_{0,2} & \dots & x_{0,L} \\ x_{1,1} & x_{1,2} & \dots & x_{1,L} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{N,1} & x_{N,2} & \dots & x_{N,L} \end{bmatrix}, \text{ где } x_{n,l} - l\text{-ое значение } n\text{-ой переменной.}$$

Тогда классическая задача регрессионного анализа состоит в оценивании параметров некоторой функции порядка  $i$  на основе данных представленных матрицей:

$$d : \hat{X}_0 = \varphi_j^{(i)}(\bar{A}_i, \bar{X}_i), \text{ где } \varphi_j^{(i)}(\bar{A}_i, \bar{X}_i) - \text{некоторая } j\text{-ая функция } i\text{-го}$$

порядка;  $\bar{X}_i \subset \bar{X}_N = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_N\}$ ,  $i < N$ ;  $\bar{A}_i = \{a_1, a_2, \dots, a_i, a_{i+1}\}$  - вектор оцениваемых параметров. Вид функции  $\varphi_j^{(i)}(\bar{A}_i, \bar{X}_i)$  выбирается, исходя из конкретно-предметных соображений. В общем случае она имеет линейный вид.

Коэффициенты функции (регрессионной модели) обычно оцениваются методом наименьших квадратов (МНК) из условия:

$$S^2 = \sum_{l=1}^L (x_{0,l} - \hat{X}_{0,l})^2 \rightarrow \min$$

Качество регрессионной модели оценивается с помощью различных критериев:

$$\sigma_{ост}^2 = \frac{S^2}{L - (i + 1) - 1} \text{ - остаточная дисперсия;}$$

$R^2 = 1 - \sigma_{ост}^2 / \sigma_{x_0}^2 \leq 1$  - коэффициент детерминации, показывающий какую долю вариаций объясняет модель (если  $R^2$  выражается в %, то он называется уровнем адекватности);

$R \leq 1$  - корреляционное отношение.

При  $R^2=1$  и  $R=1$  значения  $x_0$  получаемые по модели совпадают с фактическими значениями  $x_0$ .

Оценка модели по уровню адекватности должна дополняться оценкой её статистической значимости. Это связано с тем, что оценивание параметров модели осуществляется по ограниченной выборке объёма  $L$ . Статистическая значимость может оцениваться по критерию Фишера (F). Критерий рассчитывается по формуле:

$F_p = \sigma_{факт}^2 / \sigma_{ост}^2$ , где  $\sigma_{факт}^2$  - дисперсия фактической значений  $x_0$ ;  $\sigma_{ост}^2$  - остаточная дисперсия для модели; Затем оценивается табличное значение критерия Фишера  $F_T$  при степенях свободы  $\nu=L-(i+1)-1$ ,  $\nu=L-1$  и уровне значимости  $\alpha = 0,05$ . Здесь  $L$ -число измерений;  $i+1$ - число оцениваемых параметров модели. Если  $F_p > F_T$ , то модель принимается статистически значимой с вероятностью 0,95.

Рассмотренные выше формализмы, относятся к модели, описывающей зависимость  $x_0$  от некоторого  $i$ -го подмножества входных переменных.

На множестве входных переменных  $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_N\}$  может быть построено целое семейство моделей:

$$\Phi^{(1)} = \{\Phi_1^{(1)} + \Phi_2^{(1)}, + \dots, \Phi_j^{(1)}\} \text{ - множество моделей 1-го порядка (зави-}$$

симость  $x_0$  от одной входной переменной);

$\Phi^{(2)} = \{\Phi_1^{(2)} + \Phi_2^{(2)}, + \dots, \Phi_j^{(2)}\}$  - множество моделей 2-го порядка (зависимость  $x_0$  от двух входных переменных) и так далее  $\Phi^{(N)} = \{\Phi_1^{(N)}\}$  - множество моделей N-го порядка (зависимость  $x_0$  от всех N входных переменных).

Общее число моделей определенного типа составляет

$M = C_N^1 + C_N^2 + C_N^3 + \dots + C_N^i + \dots + C_N^N$ , где  $C_N^i$  - число сочетаний из N по i. Поэтому возникает задача выбора среди M моделей наилучшей (то есть выбор наилучшего подмножества входных переменных) в качестве критериев используются  $S^2$ ,  $R^2$  и производные от них статистики, например  $C_p$  – критерий Маллоуза. Разработано достаточно много алгоритмов решения этой задачи: метод всех возможных регрессий, метод исключения, гребневая (ридж) регрессия, «пресс» процедура и другие [9].

*При выборе порядка моделей, включаемых в анализ, необходимо иметь ввиду, что число измерений (объем выборки) должен как минимум в 5-6 раз превосходить число оцениваемых параметров модели, что очень влияет на адекватность модели.*

Изложенные выше идеи и формализмы регрессионного анализа используются в дальнейшем для выбора и построения порождающих моделей, описывающих систему взаимосвязей параметров почвенного плодородия и для других разных целей.

### **Заключения.**

1. Математическое моделирование можно рассматривать в качестве расширения естественно-научного понятия «эксперимент», особенно в случаях, когда невозможно поставить эксперимент в сложных системах в его классическом понимании (например, необходимо много лет вести опыты).

2. Применяя математическую статистику в своих исследованиях, мы делаем попытку оценивать ошибку в своих наблюдениях и анализировать источники ошибок своих наблюдений. Методология сомнения в лице математической статистики дает ту степень независимости и твердости суждений, которая составляет существо научного поиска. Иными словами, пренебрежение количественными методами исследования и отсутствие формализаций теоретических построений, в том числе в почвоведении или экологии, является самым опасным заблуждением начинающего исследователя.

3. Новые подходы в исследованиях сводятся к применению

программно-целевых методов, основанных на принципах системности, комплексности и междисциплинарности исследований, их инновационной направленности.

**Благодарности:** Приносим свои благодарности доктору географических наук, профессору Вячеславу Евгеньевичу Тихонову, согласившемуся просмотреть рукопись статьи и дать ряд ценных замечаний по ее редакции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аккофф Р., Эмери Ф. О целеустремленных системах. Пер.с англ. М.: Советское радио, 1974. 271 с.
2. Апарин Б.Ф. Почва как носитель биоразнообразия. Материалы по изучению русских почв. СПб: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2001. Вып.2 (29).
3. Берг А.И. Избранные труды. Т.1-2. М.:Л., 1964.
4. Берталанфи Л. История и статус общей теории систем. В кн.: Системные исследования. М., 1973: 38-51.
5. Богданов А.А. Тектология (всеобщая организационная наука). В 2 т. М.: Экономика, 1989. 653 с.
6. Вернадский В.И. Философские мысли. М., 1988. 1103 с.
7. Винер Н. Кибернетика и общества. 2 изд. М., 1968.
8. Докучаев В.В. Русский чернозем. СПб: Вольное экономическое общество, 1983. 376 с.
9. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Пер. с англ. М.: Финансы и статистика, 1987. 350 с.
10. Иванов В.В. Технологическое пространство и экология технологий. Вестник РАН. 2001. 81 (5): 414-418.
11. Климентьев А.И. Бузулукский бор: почвы, ландшафты и факторы географической среды. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 401 с.
12. Климентьев А.И., Тихонов В.Е. Оценка эрозионных потерь органического вещества в почвах степной зоны Южного Урала. Почвоведение. 1994. 40 (3): 117-122 // Kliment'ev A.I., Tikhonov V.Ye. Organic Matter Erosion Losses in Steppe Soils of the Southern Urals. Eurasian soil science. 1994. 40 (3): 117-122.
13. Климентьев А.И., Павлейчик Е.В. Дефляция почв и опустынивание степей Урало-Каспийского субрегиона. Аридные экосистемы. 2013. 2: 47-57 // Kliment'ev A.I., Pavleichik E.V. Soil Deflation and Desertization of Steppes in Ural-Caspian Subregion. Arid Ecosystems. 2013. 2: 92-100.
14. Клир Дж. Системология: автоматизация решения системных задач. М.: Радио и связь, 1990. 539 с.
15. Ковда В.А. Основы учения о почве. Кн.1. М.: Наука, 1973. 447 с.
16. Колмогоров А.И. Комбинаторные основания теории информации. Успехи математических наук. 1983. 38. Вып. 4 (232): 27-36.
17. Месарович М., Тахакара Я. Общая теория систем: математические основы. Пер. с англ. Мир, 1978. 311 с.
18. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981. 487 с.
19. Моисеев Н.Н. О методологии математического моделирования процессов сельскохозяйственного производства. Вестник с.-х.науки. 1984. 1: 14-20.
20. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. Пер. с англ. Пфанцгль и Теория измерения. М.: Прогресс, 1986. 248 с.
21. Саймон Г. Науки об искусственном. Пер. с англ. М.: Мир, 1972.
22. Сукачев В.Н. Избранные труды. Т.1-3. Л., 1975.
23. Ухтомский А.А. Доминанта. Статьи разных лет. 1887-1939. СПб.: Питер, 2002. 448 с.
24. Флейшман Б.С. Основы системологии. М.: Радио и связь, 1983. 368 с.

25. Хакен Г. Синергетика. Пер. с англ. М.: Мир, 1980.
26. Шмальгаузен И.И. Кибернетические вопросы биологии. Новосибирск: Наука, 1968.
27. Эшби У.Р. Введение в кибернетику. Пер. с англ. М.: ИЛ, 1959.

*Поступила 25.05.2014 г.*

*(Контактная информация: **Климентьев Александр Ильич** – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник Института степи УрО РАН; Адрес: 460000, г. Оренбург, ул. Пионерская, 11. Тел./факс (3532) 774432, 776247; e-mail: orensteppe@mail.ru)*