

УДК 631.4

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ АНАЛИЗА РАЗМЕРНОСТИ В ЭКОЛОГИИ ПОЧВ

Чичулин А.В., Шапорина Н.А.

*ФГБУН «Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения РАН», Новосибирск,  
e-mail: chichulin1957@mail.ru*

Методами анализа размерности изучена структура почвенно-климатических ареалов в гидротермическом экологическом пространстве. Показано, что безразмерные комплексы, описывающие эту структуру, совпадают с известными гидротермическими коэффициентами – радиационным индексом сухости и коэффициентом увлажнения. В системе координат, образованных гидротермическими коэффициентами, в структуре почвенных общностей в дополнение к известным гидро- и терморядам, установлено существование новой закономерности – эвапорядов. Сформулирована феноменологическая теория, описывающая структуру почвенно-климатических ареалов, в основе которой лежит гипотеза их подобия. Показано, что для соблюдения условия подобия почв, масштабы измерения обоих гидротермических коэффициентов должны соотноситься с масштабом общей для них переменной – испарения. Предложенная теория обобщает гидротермическую систему В.Р. Волобуева, в частности, в ее рамках можно проводить различные группировки почв на глобальном, промежуточном и локальном уровнях.

**Ключевые слова:** анализ размерности, подобие, почвы, экологическое гидротермическое пространство

## METHODOLOGICAL VALUE OF ANALYSIS OF DIMENSION IN ECOLOGY OF SOILS

Chichulin A.V., Shaporina N.A.

*Institute of Soil Science and Agrochemistry of Siberian Branch RAS, Novosibirsk,  
e-mail: chichulin1957@mail.ru*

By the methods of analysis of dimension are study the structure of soil-climatic natural habitats in hydrothermal ecological space. It is shown that dimensionless complexes describing this structure coincide with the known hydrothermal coefficients – radiation index of dryness and coefficient of moistening. In the system of coordinates form hydrothermal coefficients, in the structure of soil habitats in addition to known hydro- and thermorows, existence of new conformity to law is set – evaporows. A phenomenological theory is set forth, describing the structure of soil-climatic natural habitats, that a hypothesis of their similarity is the basis of. It is shown that for the observance of condition of similarity of soils, the scales of measuring of both hydrothermal coefficients must be correlated with the scale of general for them variable are fumes. The offered theory summarizes the hydrothermal system by V.R. Volobuev, in particular, in her scopes it is possible to conduct the different groupments of soils on global, intermediate and lokal levels.

**Keywords:** analysis of dimension, similarity, soils, ecological space

Итогом многолетнего международного сотрудничества почвоведов явилось накопление ими огромного массива экспериментальных данных об организации почвенно-климатических ареалов в гидротермическом экологическом пространстве. Характерным при этом является практическое отсутствие попыток физико-теоретического осмысления собранной информации с целью выявления универсальных количественных принципов и законов, которым эта организация подчиняется. Однако дальнейший рост научного потенциала экологии почв, а также ее социальная престижность в настоящее время зависит уже не столько от дорогостоящих усилий по аддитивному сбору эмпирического материала, сколько от глубины и строгости его осмысления на основе фундаментальных принципов. Именно включение фундаментальных принципов в анализ, позволяет перейти от уровня непосредственных наблюдений и первичной обработки данных к физико-теоретическому уровню исследований. В настоящей работе

с помощью методов анализа размерностей и теории критических явлений, являющихся являющегося разновидностями теоретико-группового направления в современной физике, рассмотрена задача определения универсальных (общих) закономерностей структурной организации почвенно-климатических ареалов в гидротермическом экологическом пространстве. В процессе ее решения потребовалось ввести новые понятия и устранить логические пробелы в существующих трактовках эмпирических зависимостей, так что в целом оказалось, что полученные результаты обладают не только конкретным теоретическим смыслом, но и методологической значимостью. В качестве исходной экспериментальной базы данных (рис. 1А) использован материал, собранный и частично обработанный В.Р. Волобуевым [1].

**Результаты и обсуждение.** Из соображений симметрии вытекает, что законы природы и их математические модели, являясь отражением объективной реальности, в наи-

более общих формулировках, не должны зависеть от выбора мер. Это означает, что взаимосвязи предпочтительнее искать между безразмерными величинами. В нашей задаче определяющими переменными являются следующие величины: радиационный баланс земной поверхности  $R$  [кал/см<sup>2</sup> год], годовое количество осадков  $P$  [мм] и суммарное физическое испарение и транспирация почвенной влаги  $E$  [мм]. Поскольку процесс связан с испарением почвенной влаги, то в число определяющих величин должен входить параметр – скрытая теплота парообразования  $L = 589$  кал/см<sup>3</sup>. Таким образом, общее число переменных  $m=4$ . При этом, существуют только две независимые (первичные) размерности: [кал] и [мм], т.е.  $n=2$ .

сывать структуру почвенно-климатических ареалов в гидротермическом пространстве. Легко показать, что их форма имеет вид  $R/LP$  и  $P/E$ .

Еще в первой половине 20-го века в научную практику были введены понятия безразмерных гидротермических коэффициентов, радиационного индекса сухости  $I_p = R/LP^0$ , и коэффициента увлажнения  $K_p = P/E_0$ , где  $E_0$  – максимально возможное испарение (с водной поверхности) при заданном радиационном балансе [5]. С их помощью удалось сгруппировать экспериментальный материал и установить ряд эмпирических природных закономерностей. На основании радиационного индекса сухости  $I_R$  был сфор-

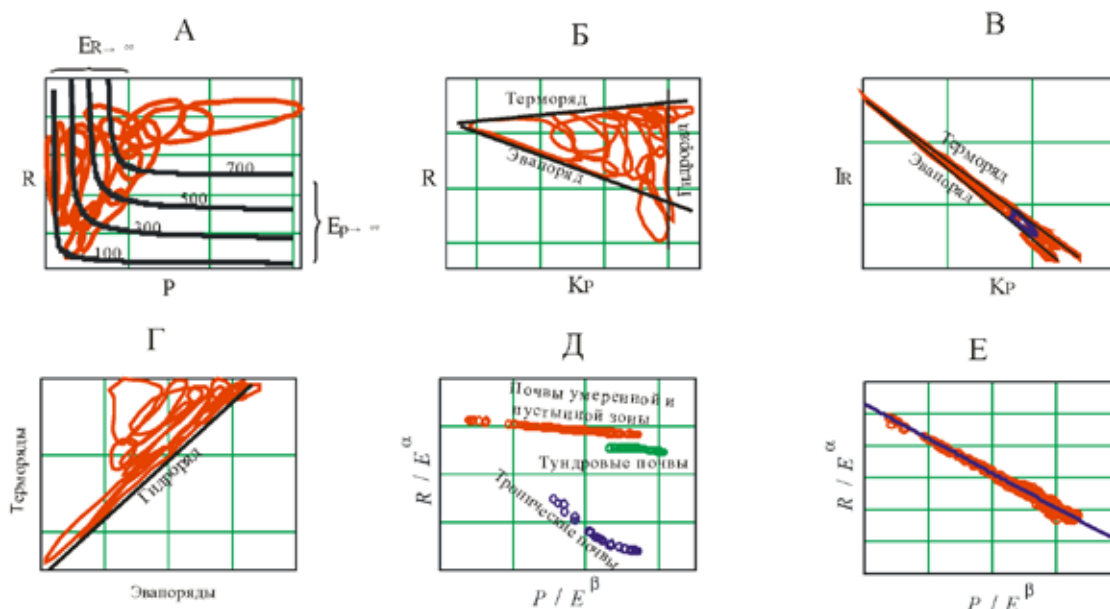


Рис. 1. А – исходные данные В.Р. Волобуева, черным цветом показаны изолинии испарения, красным – почвенные общности, названия в [1]; Б – преобразованные данные для гидротермической системы; В – те же данные в координатах гидротермических коэффициентов, в центре обозначена зона черноземов; Г – данные рисунка В, раскрытые; Д – почвенно-климатические ареалы в координатах  $(R/E^\alpha) - (P/E^\beta)$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  – глобальные константы; Е – почвенно-климатические ареалы в координатах  $(R/E^\alpha) - (P/E^\beta)$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  локальные константы, разные для разных почв (Б – Е – в логарифмических координатах)

В анализе размерности [2, 3, 4] доказывается так называемая  $\pi$  – теорема, утверждающая, что число безразмерных комплексов  $p$ , которые могут быть составлены из заданного набора размерных величин, определяется формулой Бэкингема:  $p = m - n$ . Таким образом, в нашем случае  $p = 2$ . Другими словами, существуют только два безразмерных комплекса, связь между которыми будет в самом общем виде опи-

мулирован качественно-количественный «закон периодической географической зональности» Григорьева – Будыко [5], а на основании коэффициента увлажнения  $K_p$  была построена гидротермическая система В.Р. Волобуева – распределение почвенных общностей в гидротермическом экологическом пространстве. На (рис. 1.Б) она изображена в логарифмических координатах  $(R - K_p)$ .

Анализ литературных ссылок на работы В.Р. Волобуева показывает, что эта эмпирическая система, первый вариант которой был предложен им еще в 1956 г., в настоящее время используется главным образом в качестве иллюстраций [6, 7]. Это свидетельствует о том, что, не смотря на все достоинства гидротермической системы, ее реальные возможности в качестве рабочего инструмента для получения принципиально новых результатов, продолжают оставаться не выявленными.

С точки зрения анализа размерности относительный успех вышеотмеченных работ не случаен. Он объясняется правильным выбором переменных – гидротермические коэффициенты являются типичными представителями безразмерных критериев подобия. Это и позволило авторам выйти на уровень установления общих закономерностей. Однако в этих работах существуют и очевидные недостатки. Так, в гидротермической системе, структура почвенно-климатических ареалов в гидротермическом пространстве определена в форме зависимости между размерной величиной  $R$  и безразмерным комплексом  $K_p$ . Это не позволило заметить В.Р. Волобуеву ряд важных закономерностей в структуре почвенно-климатических ареалов. Между тем простой переход к зависимости между безразмерными комплексами  $I_R$  и  $K_p$  позволяет перевести графическое изображение структуры почвенных общностей к виду (рис. 1В), когда пропущенные закономерности становятся очевидными.

В таком представлении в дополнении к структурным закономерностям, получившими название гидрорядов, явно выделяются терморяды (уравнения которых не были выведены и лишь приближенно аппроксимированы постоянными величинами), а также эвапоряды (которые вообще не были отмечены В.Р. Волобуевым). В безразмерном представлении существование термо- и эвапорядов становятся явным. Видно, что в логарифмических переменных  $I_R$  и  $K_p$  их уравнения являются строго линейными функциями. С позиций анализа размерности эти гидротермические ряды описывают предельные, в определенном смысле вырожденные ситуации, при которых число параметров, существенно влияющих на процессы почвообразования, становится минимальным. Поскольку они являются однозначно определяемыми функциями, их можно отнести к классу законов природы.

Т.о. применение анализа размерности к проблеме изучения структуры почвенно-климатических ареалов в гидротермическом пространстве приводит к выводу: эту

структуру необходимо рассматривать в безразмерных переменных, которые соответствуют ранее эмпирически установленным гидротермическим коэффициентам. Другими словами, необходимо перейти от переменных  $R$  и  $P$  к переменным  $I_R = R/LP_0$  и  $K_p = P/E_0$ . Это позволяет более полно выявить существующие закономерности.

Результаты, кратко описанные выше, не выходят за пределы простейшего применения анализа размерности. Некоторые из них были получены и В.Р. Волобуевым. Однако реальные возможности развития гидротермической системы ими не ограничиваются. Совместное рассмотрение структуры почвенных общностей и данных об испарении почвенной влаги, а также логической нити, ведущей от исходных представлений анализа размерности к ее конечным концепциям, приводит к заключению, что в гидротермической системе содержится еще много неиспользованных возможностей.

Прежде всего, обратим внимание на то, что простым переходом к безразмерным переменным мы еще не добились «идеального» решения – слияния границ всех почвенных ареалов в универсальную функцию. Внутренняя структура этой функции (рис. 1В) «раскрыта» на (рис. 1Г). Физический смысл этого результата заключается в том, что для границ почвенных ареалов, выраженных в переменных  $R, P, E$ , существует не одна структурная закономерность, а несколько. На (рис. 1Б,В) видно, что таких закономерностей как минимум три – это вышеотмеченные гидротермические ряды. Рассмотрим их в связи с испарением  $E$ . Если для простоты анализа пренебречь влиянием постоянных коэффициентов и показателей степеней, то очевидно, что гидротермические коэффициенты по существу являются функциями, обратными друг другу. Радиационный индекс сухости – это отношение  $R$  и  $P_0$ , а коэффициент увлажнения – отношение  $P$  и  $R_0$ . Этим и объясняется линейный характер зависимости (рис. 1В) в логарифмических координатах. Но  $P_0$  и  $R_0$  в асимптотических пределах равны граничным условиям  $R_0$  и  $P_0$  в модели испарения:

$$E(R, P) = (R - R_0)^{\alpha(E)} (P - P_0)^{\beta(E)}. \quad (1)$$

Эта связь изображена и на (рис. 1А):

$$P_0 = E_{R \rightarrow \infty} \text{ и } R_0 = E_{P \rightarrow \infty}. \quad (2)$$

Строго линейные зависимости на рис. 1В объясняются тем, что масштабы в задаче определяются асимптотическими климатическими условиями, когда радиационный баланс, с одной стороны, и среднегодовая величина осадков, с другой стороны, стре-

мятся к бесконечности. В первом случае это соответствует предельно жарким условиям, а во втором – предельному обводнению до состояния со свободной водной поверхностью. В эту единую «глобальную» систему координат и помещаются все почвенно-климатические ареалы. В этом месте удобно отметить второй, более важный, пробел в подходе В.Р. Волобуева к построению гидротермической системы. из (рис. 1А, 2), а также уравнения (1) видно, что для адекватного описания испарения необходимо симметричное задание обоих граничных условий  $R_0$  и  $P_0$ . В гидротермической системе В.Р. Волобуева учтено только одно. Этим объясняется различие в несимметричных результатах В.Р. Волобуева (рис. 1Б) и симметричных, полученных на основе совместного использования обоих гидротермических коэффициентов (рис. 1В).

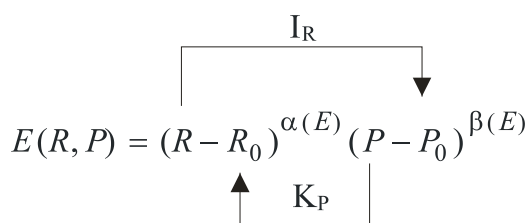


Рис. 2. Взаимосвязь между определяющими переменными и граничными условиями в модели испарения почвенной влаги. Стрелками показаны связи, формирующие соответствующие гидротермические коэффициенты. В гидротермической системе В.Р. Волобуева учитывается только нижняя связь, для коэффициента увлажнения  $K_p$

Далее необходимо перейти от глобальной системы координат к локальным, в которых каждая почва характеризуется «собственными»  $R$ ,  $P$ , и  $E$ . Это означает, что гидротермические коэффициенты должны быть заменены локальными переменными:  $I_R = R/LP_0$  заменяется на  $R/LE$ , а  $K_p = P/E_0$  заменяется на  $P/E$ . Физический смысл этой замены переменных заключается в следующем. Гидротермические коэффициенты по своему определению характеризуют асимптотические климатические условия, но не условия для конкретных почв. Испарение – это характеристика, относящаяся уже к конкретной почве. В локальных координатах мы соотносим масштабы радиационного баланса и осадков с масштабом общей для обеих переменных конкретной почвенной характеристики – испарения.

Перейдя к локальной системе координат, мы по существу перешли к рассмотрению структуры почвенно-климатических ареалов с точки зрения феноменологической теории критических явлений, основанной

на гипотезе подобия [8]. Ее суть сводится к предположению, что структура почвенных общностей должна подчиняться обобщенному уравнению состояния – масштабнo-инвариантному закону, описываемой однородной функцией

$$\Phi(R, P) = E^\alpha \Phi(E^\beta R, E^\chi P), \quad (3)$$

где  $\alpha, \beta, \chi$  – критические (масштабные) индексы. Результаты, полученные при обработке исходных данных (рис. 1А) с помощью модели (3) показаны на (рис. 1Е). Видно, что границы всех почвенно-климатических ареалов, изображенные в координатах  $\ln(R/E^\alpha) - \ln(P/E^\beta)$ , при соответствующем подборе индексов  $\alpha$  и  $\beta$ , действительно сливаются (стягиваются) в единую универсальную кривую (в нашем случае коэффициент корреляции равен 0.996). Кроме того, из (3) следует, что испарение входит в уравнение состояния только через масштабный фактор. После соответствующей операции приведения переменных к виду  $R/E^\alpha$  и  $P/E^\beta$ , уравнение состояния оказывается одним и тем же для всех почв (принадлежащих к классам, подчиняющихся законам подобия).

Это означает, что структуру почвенно-климатических ареалов можно рассматривать с точки зрения теории критических явлений и попытаться перенести принципиальные результаты, полученные в этой теории на модель почвенно-климатических ареалов.

Прежде всего, в этом случае почвенные общности интерпретируются как своеобразные «фазы», формирующиеся (выпадающие) из некоторого исходного «протопочвенного» субстрата при определенных климатических условиях. В отличие от однородных фаз в простых фазовых переходах типа «жидкость – пар», почвенные «фазы» являются более сложными образованиями, что проявляется в частности в существовании специфических взаимосвязей между ними, описываемых гидротермическими рядами.

Модель (3) можно изучать теоретически и результаты сопоставлять с экспериментальными данными. Например, легко показать, что почвы по близким значениям индексов группируются на промежуточном уровне на три класса (рис. 1Д). В первый класс входят почвы пустынных и умеренных общностей; во второй класс – почвы тропического пояса; в третий – почвы тундровой зоны. Отметим корреляцию этого вывода с более детальными представлениями почвоведов о взаимосвязях между почвами.

В теории критических явлений сделан вывод о том, что законы подобия представляют собой проявление некоторого глубокого свойства критических явлений. Сформулирован также закон универсальности, утверждающий, что критические индексы должны быть не чувствительны к деталям описываемых явлений, и определяться главным образом крупномасштабными свойствами, такими как симметрия гамильтониана взаимодействия.

В нашей задаче это означает, что критические индексы должны иметь близкие значения для широкого спектра «родственных» почв (рис. 1Д). Этими симметриями определяются классы систем, для которых уравнение состояния имеет вид (3). Замечательно, что в эти классы попадают почвы, индивидуальные значения характеристик которых различаются очень сильно.

Таким образом, если простой анализ размерности требует изучать структуру почвенных общностей в «глобальной» системе координат, задаваемой гидротермическими коэффициентами (рис. 1В), то более тонкий подход в рамках теории критических явлений переводит этот анализ на «локальный» уровень (рис. 1Д, Е). На этом уровне, на основании уравнения состояния (3) возможно изучать глобальные, промежуточные и локальные группировки почв. Кроме того, почвы в этом случае можно сопоставлять не только между собой, но рассматривать их в более широком спектре природных систем.

### Выводы

Показано, что безразмерными комплексами, описывающими структуру почвенных общностей, являются известные гидротермические коэффициенты – радиационный индекс сухости и коэффициент увлажнения. для адекватного теоретического описания

структуры почвенных общностей необходимо их одновременное использование.

Устранен логический пробел в гидротермической системе почвенных общностей В.Р. Волобуева – восстановлена симметрия граничных условий.

По образцу феноменологической теории критических явлений построена теория, описывающая структуру почвенно-климатических ареалов в гидротермическом экологическом пространстве, в основе которой лежит гипотеза подобия между различными почвами.

Показано, что для соблюдения условия подобия почв, необходимо соотносить масштабы радиационного баланса и среднегодового количества осадков с масштабом общей для обеих переменных почвенной характеристики – испарения.

В рамках предложенной теории получено универсальное для всех почвенных общностей уравнение состояния (3), использование которого позволяет получать различные почвенные группировки при различных взаимосвязях между определяющими переменными.

### Список литературы

1. Волобуев В.Р. Введение в энергетику почвообразования. – М.: Наука, 1974. – 128 с.
2. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1981. – 448 с.
3. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. – М.: Высшая школа, 1973. – 287 с.
4. Сена Л.А. Единицы физических величин и их размерности. – М.: Наука, 1988. – 432 с.
5. Реймерс Н.Ф. Природопользование. Словарь-справочник. – М.: Мысль, 1990. – 640 с.
6. Добровольский Г.В., Урусевич И.С. География почв. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 460 с.
7. Глазовская М.А. Общее почвоведение и география почв. – М.: Высшая школа, 1981. – 400 с.
8. Балеску Р. Равновесная и неравновесная статистическая механика. – М.: Мир, 1978. Т.1. – 407 с.