Сибирский экологический журнал, 3 (2010) 389–398

УДК 631.43

Пространственно-временные симметрии физических явлений в почвах

А. В. ЧИЧУЛИН

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
630099, Новосибирск, ул. Советская, 18
E-mail: chichulin@ngs.ru

АННОТАЦИЯ

Рассмотрен ряд методологических вопросов применения теоретико-групповых методов в физике почв. Проанализирована взаимосвязь между выбором геометрии пространства-времени, в котором локализованы изучаемые явления, и физическими законами этих явлений. В качестве конкретного случая рассмотрена зависимость между выбором количественных эталонов физических величин и инвариантностью законов, описывающих взаимосвязь этих величин. На ряде примеров продемонстрированы процедуры обобщения традиционных симметрий. В частности, сформулирован принцип суперпозиции симметрий подобия для теоретического описания влажностной характеристики почв (ВХП) и их теплофизических коэффициентов, а также указана возможность математического моделирования температурного режима почв без решения уравнения теплопроводности. Отмечена возможность более глубокого, с позиций симметрийного анализа, понимания структурно-функциональной концепции физических свойств почв. Рассмотренные задачи проиллюстрированы конкретными уравнениями.

Ключевые слова: сложные системы, физические свойства почв, теория групп, подобие, суперпозиция симметрий.

Для современного развития науки характерно стремление к синтезу, к попыткам объяснения все большего числа отдельных фактов на основе все меньшего числа так называемых “первых принципов”. Среди таких принципов заслуженно выдающуюся роль играют принципы симметрии. Практически вся современная физика построена на феноменологии, связанной с этим понятием. Основополагающие законы наиболее развитых ее направлений – классической механики, электродинамики, квантовой механики, теории относительности и ряда других – являются прямыми следствиями различного рода геометрических или динамических симметрий.

Применение симметрийного анализа в почвоведении и в физике почв, в частности, имеет свою историю. Ее рассмотрение обнаруживает и удачное использование отдельных критериев подобия (например, критерия относительной увлажненности В. Р. Волобуева [1]), и ряд глубоко проанализированных проблем и полностью решенных задач (в энергетике почвенной влаги [2]), но разрозненность отдельных попыток и недостаточно широкий фронт исследований в этом направлении свидетельствуют о недооценке роли симметрии как принципа познания. Между тем именно при изучении сложных природных систем, к которым относится и почвенный покров, симметрийный анализ зачастую может оказаться более полезным, чем динамические или статистические методы. Исследователей сложных систем должен привлечь прежде всего тот факт, что нахождение симметрии задачи позволяет кардинально упростить ее решение. Кроме того, необхо-

Чичулин Александр Валентинович

димо принять во внимание, что теоретико-групповые методы дают возможность получать информацию о сложных системах, не решая дифференциальных уравнений. Эти методы особенно эвристичны в тех случаях, когда дифференциальные уравнения, способные описывать систему, вообще неизвестны. Не случайно в математическом аппарате физики теоретико-групповые структуры заняли сегодня одно из ведущих мест, оттеснив на второй план дифференциально-аналитические структуры, присущие классическим разделам физической науки.

Мы полагаем, что более полная ассимиляция почвенной физикой представлений о симметрии, систематическое и целенаправленное их применение, поиск обобщений, учитывающих специфическую системную организацию почв, безусловно, будут способствовать и развитию концептуального единства этого направления в целом, и получению конкретных практических результатов, включая построение более простых математических моделей физических явлений в почвах.

Если оценивать симметрийный анализ с самых общих позиций, то можно сказать, что его специфика является следствием того факта, что среди всех количественных методов он является одним из самым "качественных". Это приводит к тому, что его математический аппарат достаточно прост, но вместе с тем его применение требует хорошего понимания сути изучаемых явлений. Поэтому только изучение тех физических идей, которые лежат в основе симметрийного анализа и воплощаются в его аппарате, может привести к правильному представлению о нем как орудии количественного исследования, о его действительных возможностях и рациональных формах применения [3]. Среди таких идей следует выделить проблему взаимосвязи физики и геометрии при количественном изучении природных феноменов. В методологической литературе эта взаимосвязь получила название "принципа дополнительности физики и геометрии". Без ее понимания нельзя в полной мере раскрыть эвристический потенциал симметрийных методов.

Среди наиболее известных ученых XX в., уделивших значительное внимание этому принципу, отметим А. Эйнштейна, А. Пуанкаре и В. И. Вернадского. Их точки зрения отличаются широтой постановки проблемы, глубиной анализа и в настоящее время представляют не только исторический интерес, но и напрямую связаны с актуальными задачами современной науки.

Суть принципа заключается в следующем. В процессе построения количественной теории исследователь сталкивается с необходимостью выбора соответствующей геометрии – плоской, искривленной, закрученной и т. д., на фоне которой разворачиваются физические события. Несмотря на то что формирование научных геометрических понятий определено влиянием внешнего мира, сама по себе геометрия (Г) ничего не говорит о поведении реальных вещей; это поведение описывает только геометрия вместе с совокупностью физических законов (Ф). Можно сказать, что только сумма (Г) + (Ф) является предметом проверки на опыте. Другими словами, допустимо произвольно выбирать как (Г), так и отдельные части (Ф). Необходимо лишь во избежание противоречий оставшиеся части (Ф) выбрать так, чтобы (Г) и полная (Ф) вместе оправдывались на опыте [4].

До создания специальной теории относительности А. Эйнштейном господствующая точка зрения в науке, разделяемая в том числе и А. Пуанкаре, заключалась в том, что при построении теории необходимо всегда выбирать наиболее простую и удобную геометрию (евклидову) и приспосабливать к ней законы физики. Однако в этом случае для обеспечения адекватности описания может потребоваться введение множества дополнительных допущений, что усложнит физику явлений. Альтернативная точка зрения, разделяемая А. Эйнштейном, заключалась в том, что можно изменить принятую геометрическую модель с целью возможного упрощения арсенала физических понятий [5]. Именно такое понимание геометрии позволило Эйнштейну создать специальную, а затем и общую теорию относительности, в которой вскрывается органическая взаимосвязь материи и пространства-времени как формы ее существования, а именно – зависимость структуры пространства-времени от материальных взаимодействий, локализованных в нем.

Хотя идея зависимости геометрических свойств пространства от специфики физических процессов высказывалась еще К. Гауссом, Н. Лобачевским, Б. Риманом – создателями неевклидовой геометрии [6–8], ее принятие в то время требовало выдающейся смелости ума. Обратим внимание, что современные натуралисты, в том числе и почвоведы, воспринимая эту идею через призму своего объекта исследования, считают ее совершенно очевидной.

В теоретико-познавательном споре между А. Эйнштейном и А. Пуанкаре методологический подход первого оказался более перспективным и оформился в научное направление, называемое геометризацией физики. Однако еще в течение нескольких десятилетий после создания теории относительности возможность использовать неевклидову геометрию связывали главным образом с решением физических и космологических проблем.

Новый, весьма яркий и нацеленный уже в гораздо большей степени на науки биосферного плана этап развития идеи взаимосвязи физики и геометрии природы связан с именем В. И. Вернадского. Он писал: "Натуралист, исходя из школьной рутины, все время мыслил о едином пространстве, но не о разных природных пространствах, не о состояниях пространства. ... В течение тысячелетий, говоря о природных или естественных телах, он не сознавал и не утверждал, что каждое природное тело и каждое природное явление имеет свое естественное материально-энергетическое специфическое пространство, которое натуралист изучает, изучая симметрию" [9, стр. 166]. Поясним мысль В. И. Вернадского о том, что, изучая симметрию, натуралист, по сути, изучает структуру материально-энергетического пространства природного явления. Дело в том, что пространственно-временные конструкции различных физических теорий (т. е. их геометрии) в самом общем виде могут быть охарактеризованы не только заданием соответствующих аксиоматик, но и рядом специфических принципов, к которым относится и принцип симметрии [10]. Для краткости можно предложить формулу: «*симметрия* ≡ *геометрия*». Другими словами, задавая преобразования симметрии, при которых изучаемое природное явление остается тождественным самому себе, мы тем самым определяем геометрический фон, на котором это явление реализуется и на которое оно воздействует. Поскольку геометрия природных феноменов есть устойчивое отражение своеобразия той совокупности физических процессов, которую они создают в окружающей их среде, поддерживают существование и согласовывают функционирование с ходом процессов в среде, изучение геометрии (симметрии) явлений – путь изучения и физики этих явлений.

Вообще, роль В. И. Вернадского в развитии концепции симметрии в природе трудно переоценить. В значительной степени его мысли на этот счет опередили свое время. Этим отчасти можно объяснить тот факт, что важные соображения о собственных временах и собственных пространствах физико-химических явлений нашей планеты воспринимались лишь как образная метафора и поэтому оставались долгое время невостребованными в качестве указания на построение количественных моделей этих явлении. Процитируем еще одно весьма типичное его высказывание, относящееся к этой теме: "Мы знаем, что геометрии Евклида и Лобачевского – две из бесчисленного множества возможных. Они распадаются на три типа (Евклида, Лобачевского и Римана), и в настоящее время идет разработка общей геометрии, всех их охватывающей. Во время Лобачевского это было неизвестно, и поэтому он мог ставить вопрос о единой геометрии Космоса. С таким же правом мы можем говорить о геометрической разнородности реальности, об одновременном проявлении в Космосе, в реальности, материально-энергетических, главным образом материальных, физических, состояниях пространства, отличающих разные геометрии. Мы увидим в дальнейшем, что эта проблема выявляется сейчас в разнородности биосферы, в косных и живых ее естественных телах. Должны наблюдаться процессы, нам пока неизвестные, перехода одного такого физического состояния пространства с одной геометрической структурой в пространство с другой" [9]. Отметим здесь, что под термином "пространство" мы понимаем и реальное пространство, и фазовое, которые с математической точки зрения могут не отличаться.

Практическое осознание того факта, что исследователи, работающие в различных научных направлениях, имеют дело не с универсальным единым пространством-временем, а с целым спектром биологических, геологических, географических и многих других "дисциплинарных" пространств и времен, произошло во второй половине XX в. Стало очевидным, что любые объекты или группы взаимосвязанных объектов, а точнее – преобразующие их процессы, допускают представления о собственном пространстве-времени. Это осознание дало мощный импульс развитию математического моделирования природных феноменов, основанного на этих представлениях. Разумеется, концепция собственных пространств и времен различных природных систем не исключает возможности в тех случаях, когда есть необходимость одновременного использования общего для всех эталонного пространства-времени, которое может обладать в общем случае и евклидовой метрической структурой [11, 12]. Однако необходимо ясно представлять себе, что для теоретического описания структур реальных природных явлений и процессов евклидова (плоская) геометрия во многих случаях является слишком сильной идеализацией в силу отсутствия в ней внутренних причин для задания мер этих явлений и процессов. В последние десятилетия появился цикл замечательных работ Пущинской школы почвоведов [13–15], в которых демонстрируется глубокое понимание пространственно-временной проблематики современного почвоведения. Разбирая, в частности, вопросы картографии, И. Н. Степанов пишет: «"Лоскуты" традиционных карт наук о Земле являются евклидовыми – искусственными созданиями разума, они не обусловлены ни силами, ни полями, их не коснулось взаимодействие» [13].

Преимущества, которые исследователи получают при выборе собственных пространств изучаемых явлений (следовательно, и их геометрий, систем отсчета и единиц измерения) вместо универсального евклидового пространства, в физике были осознаны еще в начале XX в. [16]. В то время М. Планк предложил использовать так называемую естественную систему единиц. Цель предложения заключалась в стремлении избавиться от особенностей тех конкретных тел и явлений, которые находятся в основании современной системы единиц измерения, т. е. в освобождении от элементов произвольного и случайного, которые в какой-то степени неизбежны в этом случае. М. Планк тем самым продолжал линию создателей метрической системы мер с их гордым лозунгом "для всех времен, для всех стран, для всех народов". В системе, предложенной им, роль эталонов принимают на себя универсальные законы природы, они становятся в полном смысле слова идеальными. Но недостаток этой системы заключается в том, что введение такой единой системы натуральных единиц не открывает никаких перспектив физическим теориям. В квантовой механике, например, противоестественно строить единицы, опираясь на постоянную тяготения, скорость света или постоянную Больцмана, поскольку они не играют существенной роли в тех явлениях, которые исследует квантовая механика. Более перспективны в данном случае естественные системы единиц для отдельных физических теорий. В классической и в квантовой механике, в электродинамике и других теориях существуют свои естественные системы единиц. Применение этих систем имеет теоретические и практические преимущества [16].

Таким образом, в современной физике, биологии и других направлениях все более отчетливо прослеживается тенденция перехода от единой, универсальной системы отсчета к локальным системам, которые и характеризуются собственными пространствами, собственными симметриями, собственными эталонами. Естественная мотивация этой тенденции – облегчение изучения явлений на количественном уровне и, как следствие, надежда сформулировать фундаментальные законы этих явлений.

С методологической точки зрения выбор собственной метрики природных явлений обосновывается следующими соображениями. В рамках физической методологии объективно существующим считается то, что удовлетворяет методологическим критериям существования, таким как принципиальная наблюдаемость, инвариантность, системность и т. д. Поэтому объективно существуют не только физические объекты, но и фундаментальные структуры, связи и отношения, в том числе и пространственно-временные. Пространственно-временная структура воспринимается нами не непосредственно, а через класс определенных физических объектов и процессов. Например, в случае макроскопического пространства-времени к таким объектам относятся твердые тела и световые лучи. Но фактически класс такого рода объектов более широк. Эти объекты и процессы в определенной степени отражают особенности пространственно-временной структуры данного типа и именно в связи с этим могут быть использованы для ее частичной интерпретации. С такой точки зрения выбор метрики не произволен – он имеет научные основания, связанные с объективным соответствием данной пространственно-временной структуры локализованному в ней классу физических объектов. Таким образом, выбирая подходящую симметрию задачи, мы, по сути, выбираем меры, внутренне присущие изучаемому явлению. Процедурой выбора этих мер устанавливается структура взаимосвязей различных характеристик явления.

Сравним между собой процедуры выбора метрики в случае непрерывного и дискретного пространств. Поскольку метрика плоского (и в общем случае непрерывного) пространства является произвольной и никак не связана с распределением вещества и энергии, то она вводится внешним образом и основана на определенных эмпирических процедурах. Иное дело в дискретных пространствах, в которых сравнение величин происходит путем счета. Это характеризует принадлежность меры протяженности самим величинам. То есть в применении к дискретному пространству мы можем сказать, что мера внутренне присуща ему, содержится в нем и основана на наличии определенного “атома” пространства, элементарной масштабной единицы. Особенность почвенных феноменов с этой точки зрения заключается в том, что для них дискретность проявляется в существовании максимальных границ, но внутри этих границ существует непрерывный спектр масштабов, что и дает принципиальную возможность подходить к изучению этих феноменов с симметрийных позиций.

Перейдем к конкретным примерам. Специфика физики как количественной науки проявляется в том, что рассматриваемые утверждения касаются величин, которые могут быть выражены числами. Значение такого числа может зависеть от выбранной системы отсчета. Если справедливость количественного утверждения не зависит от системы отсчета, то такое утверждение называется инвариантным. Всякое соотношение, имеющее физический смысл, инвариантно к изменению системы единиц, т. е. не меняет при этом своего физического содержания. Другими словами, чтобы уравнение имело физический смысл, оно должно быть инвариантным. Чтобы сделать уравнение инвариантным относительно системы отсчета, необходимо ввести в него масштабные преобразования. Понимание этого утверждения вошло в физику после работ А. Эйнштейна и получило дальнейшее развитие в так называемой инвариантной концепции реальности М. Борна [18].

1. Первый пример. Явление характеризуется одной границей.

В качестве самого простого примера рассмотрим вывод инвариантного уравнения влажностной характеристики почв (ВХП) – зависимость между потенциалом почвенной влаги Ψ и влажностью почвы ϑ. Это настолько важное уравнение, что, по предложению А. М. Глобуса [17], первичную ветвь развертки этой кривой часто называют ОГХ – основной гидрофизической характеристикой. По сути, это уравнение состояния почвенной влаги. В случае произвольно сложной почвенной структуры такие уравнения получаются только эмпирическим путем. Расчету поддаются только простейшие структуры типа однородного капилляра. Однако применение симметрийного анализа позволяет, приняв разумные допущения, обобщить капиллярную модель на случай произвольной структуры, т. е. получить ВХП теоретически.

Разберем теоретические понятия “почвенной влажности” – ϑ и “потенциала почвенной влаги” – Ψ, а также конкретизируем методы их экспериментального определения. Кроме того, будем различать понятия, относящиеся к “точечному” образцу, и отмечать их подстрочным индексом “0” и понятия, относящиеся к реальному образцу почвы высотой h, и отмечать их подстрочным индексом “h”. Понятия ϑ_0 и Ψ_0 для материальной точки (бесконечно малого образца) связаны с ϑ_h и Ψ_h реального образца высотой h по принципу соответствия.

На первый взгляд понятия ϑ и Ψ представляются простыми и очевидными, и даже трудно предположить, что они нуждаются в каком-то специальном методологическом осмыслении и анализе. Тем не менее это так. Отметим, что все теоретические понятия возникают как абстракции (идеализации) некоторых свойств физических объектов. Это относится и к основным понятиям термодинамики почвенной влаги ϑ и Ψ. Понятия ϑ и Ψ нельзя называть абсолютно правильными или неправильными. Они правильные, но только если допустимо рассматривать почвенный образец как материальную точку. Забегая несколько вперед, отметим, что эти понятия можно использовать в дифференциальных уравнениях. Тогда отклонения от идеальности "материальной точки" рассматриваются как погрешности и, если они малы, ими можно пренебречь. Если же использовать аппарат теории подобия (берем один образец и его "надуваем" – изменяем масштаб), тогда отклонения от идеальности могут стать принципиальными, поскольку одновременно "надуваются" и погрешности.

Реальный образец почвы всегда отличается от "материальной точки", но, чтобы его все-таки рассматривать как "точку", мы вынуждены усреднять все локальные значения соответствующих переменных по объему макроскопического образца. Это совершенно законный термодинамический прием, но необходимо помнить, что это приближение в определенных случаях может оказаться слишком грубым. Смысл дальнейших рассуждений и расчетов в первом примере как раз и заключается в том, чтобы продемонстрировать метод учета отклонений от "точечной" идеализации.

Строго говоря, понятия классической термодинамики применимы только к однородным системам, в так называемом "термодинамическом пределе" для которого выполняются следующие условия. При увеличении объема системы V количество частиц вещества в ней должно возрастать пропорционально, так что полная плотность вещества ρ стремится к постоянной величине:

$$V \to \infty,\ N \to \infty,\ N/V = \rho \to \text{const.} \qquad (1)$$

Это условие необходимо для того, чтобы исключить из рассмотрения энергию взаимодействия изучаемой системы с окружающей средой, учет которой привел бы к существенному усложнению задачи. По вполне очевидным причинам на практике выполнить условие (1) никогда строго не стремятся. Ограничиваются размерами систем, при которых интенсивные характеристики остаются постоянными с приемлемой для решения конкретной задачи точностью.

В соответствии с определением влажности почвы $\vartheta = (V_L/V_T) \cdot 100\ \%$, где V_L – объем влаги в образце, V_T – объем почвенного образца, ϑ относится к интенсивным характеристикам, следовательно, строго определена для однородных систем. Однако для капиллярной влаги ситуация, для которой выполняются условия (1), возможна только в случае, когда можно пренебречь влиянием гравитационного поля или, что аналогично, считать высоту капиллярного поднятия бесконечной. Очевидно, такая ситуация близка к реальности только для микроскопических образцов почвы. В общем случае для макроскопических образцов (например, когда их размеры сопоставимы с почвенным профилем) распределение влажности будет неоднородным, и поэтому требуется переопределить ϑ и Ψ.

В гравитационном поле, как известно, капиллярная влага поднимается на высоту, определяемую уравнением Лапласа: $h_0 = 2\sigma/\rho g R$, где ρ – плотность воды, σ – коэффициент поверхностного натяжения, R – радиус капилляра, g – ускорение силы тяжести. Возьмем за единицу измерения влажности максимальное количество воды в капилляре с высотой h_0. Эту же высоту примем за единицу потенциала. Тогда, учитывая, что реальная высота образца, на котором определяется ВХ капилляра, равна h, легко показать, что уравнение ВХ может быть записано в инвариантной форме только при условии, если мы перейдем от исходных переменных ϑ и Ψ к новым, определяемым с помощью масштабного преобразования с коэффициентом подобия k:

$$k = (h/h_0),\ \vartheta' = k\vartheta,\ \Psi' = k\Psi. \qquad (2)$$

Само уравнение ВХП тогда записывается в инвариантной форме

$$\vartheta' + \Psi' = 1. \qquad (3)$$

Повторим: если бы не было необходимости учитывать границы капиллярного поднятия, инвариантным было бы уравнение $\vartheta + \Psi = 1$. Если необходимо учитывать реальную высоту капиллярного поднятия, необходимо пользоваться уравнением (3).

Обобщение уравнения (3) на случай произвольно сложной структуры твердой фазы можно также осуществить с помощью симметрийного анализа, посредством замены функций ϑ и Ψ на однородные (показательные) функции ϑ^α и Ψ^β [19, 20]. Теоретически их можно трактовать либо в рамках обобщенной фрактальной модели, либо с точки зрения теории подобия и анализа размерности. Показатели α и β являются в этом случае характеристиками структуры твердой фазы почвы, взаимодействующей с ее жидкой фазой. Таким образом, окончательное инвариантное уравнение ВХП для произвольной почвенной структуры во "фрактальном приближении" запишется в форме

$$(k\vartheta)^\alpha + (k\Psi)^\beta = 1. \qquad (4)$$

Уравнение (4) можно получить также исходя из следующих соображений. Реальная структура порового пространства почв в отличие от однородного капилляра моделируется системой капилляров разного диаметра, в которой одновременно сосуществуют разные формы влаги. В такой системе состояние почвенной влаги описывается не простой переменной h, а с помощью эффективного радиуса корреляции R, очерчивающего в почве сферу с эквипотенциальной поверхностью почвенной влаги. Тогда переход от переменных ϑ и Ψ к переменным ϑ' и Ψ' осуществляется посредством следующего преобразования:

$$\vartheta' = \vartheta/R^\alpha, \Psi' = \vartheta/R^\beta. \qquad (5)$$

Исключая переменную R из выражения (5) и предполагая линейную зависимость между переменными ϑ' и Ψ', получаем уравнение (4).

В физике почв получила признание структурно-функциональная концепция физических свойств почв, впервые предложенная и обоснованная А. Д. Ворониным [21]. Эта концепция сводится к очевидному утверждению о зависимости почвенных свойств от структуры твердой фазы и особенностей ее взаимодействия с жидкой фазой. Анализ уравнения (5) позволяет подчеркнуть иные аспекты этой концепции. Отметим, что из (5) вытекает принципиальное следствие, что почвенная влажность ϑ и потенциал почвенной влаги Ψ не являются независимыми переменными. Независимой переменной является структурная характеристика почвы − радиус корреляции R, а ϑ и Ψ − ее функции. С математической точки зрения это уже не два скаляра, а компоненты одного вектора. Это утверждение не просто ограничивает применимость классической термодинамики, о чем вывод делался и ранее, например из факта существования гистерезиса ОГХ [22]. Оно означает необходимость нового концептуального подхода, целесообразность которого с практической точки зрения должна определяться величиной поправок. Так, из предельно простых моделей ВХП (2)−(4) можно сделать вывод, что поправки в общем случае малы. Но они должны возрастать для почв с более легким гранулометрическим составом. Для песков поправки могут достигать 100 % и более.

Проведем аналогии между преобразованиями (2)−(5) и известными физическими теориями. Так, уравнение (3) предполагает, что мы перешли от евклидовой геометрии к псевдоевклидовой. Известным аналогом является переход от классической механики Ньютона к специальной теории относительности Эйнштейна. Коэффициент подобия k в (2) − аналог преобразования Лоренца. Уравнение (4) предполагает переход к еще более общей геометрии Римана. В этом случае аналогом является общая теория относительности А. Эйнштейна.

С чисто математической точки зрения переходы между различными геометриями означают переходы к различным системам координат (рис. 1). Цель этих переходов одна − добиться, чтобы зависимость между изучаемыми переменными описывалась простейшим уравнением (прямолинейная зависимость) и была инвариантной по отношению к выбору эталонов измерения этих переменных. В процессе решения этой задачи и устанавливаются взаимосвязи между особенностями внут-

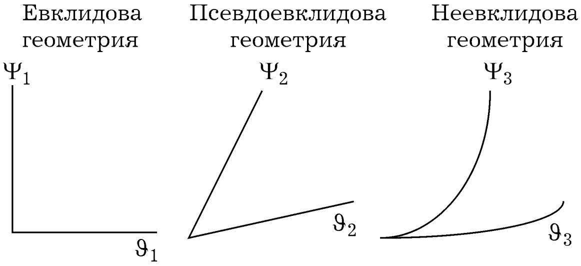

Рис. 1. Примеры различных систем координат, соответствующих евклидовой (Ψ_1 и ϑ_1 – независимые переменные, оси перпендикулярные, шкалы равномерные, эталоны определяются внешними причинами), псевдоевклидовой (Ψ_2 и ϑ_2 – зависимые переменные, оси неперпендикулярные, шкалы равномерные, эталоны определяются внутренними причинами) и неевклидовой (Ψ_3 и ϑ_3 – зависимые переменные, шкалы неравномерные, эталоны определяются внутренними причинами) геометриям пространства

ренней структуры твердой фазы почвы и ее физическими свойствами через выбор единиц их измерения. Это более сильное утверждение по сравнению с общепринятой формулировкой структурно-функциональной концепции о зависимости функции системы от ее структуры.

В монографии [23] приведен список полуэмпирических моделей ВХП. Если исключить из рассмотрения формальные модели типа логарифмических функций и полиномиальных зависимостей, то из этого списка и пояснительного текста ясно, что наиболее популярными являются модели, выраженные через показательные функции и в относительных единицах. Такими являются модели Брукса-Кори, Кэри и Чена, ван Генухтена и др. Легко показать, что все они при определенных условиях сводятся к уравнению (3). С точки зрения симметрийного анализа это не случайно, поскольку выбор подходящей симметрии задачи не является произвольной процедурой, а по своей сути всегда ориентирован на существующий эмпирический материал. Показательные же функции, как это следует из анализа размерностей [3], являются простейшими и одновременно наиболее общими, удовлетворяющими требованиям инвариантности к единицам измерения. Поэтому исследователи даже на эмпирической стадии своей работы часто приходят именно к таким моделям.

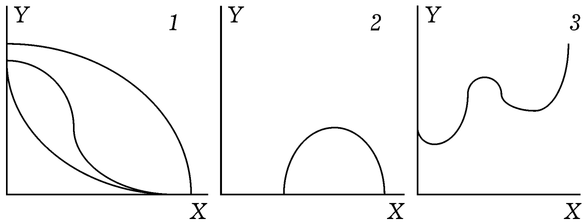

Рис. 2. Типичные графики зависимостей из примеров *1*, *2*, *3*. На рис. 2, *1* графики пересекают ось абсцисс в точке, принимаемой за 1. На рис. 2, *2* ось абсцисс пересекается графиком в двух точках – 0 и 1. На графике рис. 2, *3* обозначены три локальных экстремума. Каждый из экстремумов соответствует области преобладающего действия одного из “механизмов” теплопереноса. Остальные пояснения в тексте

2. Второй пример. Явление характеризуется двумя границами.

В первом примере каждая из переменных определялась одним видом симметрии подобия и существованием одной границы (рис. 2, *1*). Однако более распространены случаи, когда одна переменная определяется двумя симметриями и двумя границами. В природе этому случаю соответствуют ситуации, например, существования явления между рождением и гибелью, между началом и концом. Типичный график таких зависимостей приведен на рис. 2, *2*, а обобщенное уравнение записывается следующим образом:

$$\Psi(\vartheta) = \text{const}\ (0 + \vartheta)^{\alpha}(1 - \vartheta)^{\beta}. \qquad (6)$$

В (6) 0 – начало или появление переменной ϑ, 1 – конец существования переменной ϑ. Вне границ (0, 1) явления просто не существует. Уравнение (6) может описывать, например, реальные функции распределения в отличие от идеализированного распределения Гаусса, у которого нет границ и теоретическая правильность которого обеспечивается практически малым вкладом вдали от среднего. Но в реальности границы есть всегда.

3. Третий пример является естественным обобщением второго и соответствует ситуациям последовательной смены одних явлений другими, причем каждое из них зависит от одних и тех же переменных. Границы (0, 1) являются общими для всей системы явлений. Примером является последовательная смена механизмов теплопереноса в почвах в зависимости от влажности (рис. 2, *3*). Локальные

экстремумы на данном графике зависимости температуропроводности от влажности – это области преобладания одного из механизмов: пародиффузного, комбинированного и конвективного. Обобщенное уравнение является суммой уравнений (6):

$$\Psi(\vartheta) = \sum_i \mathrm{const}_i \ (0 + \vartheta)^{\alpha i}(1 - \vartheta J)^{\beta i}. \quad (7)$$

Индекс i, в нашем примере пробегающий значения *1*, *2*, *3*, нумерует области соответствующего экстремума. Проводя аналогию с известными разложениями по собственным функциям в квантовой механике, синергетике [24] или даже с формальным разложением в ряд Тейлора, уравнение (7) можно интерпретировать как разложение по собственным симметрическим функциям. По существу, мы использовали гипотезу о суперпозиции симметрий: возможность разложить сложное несимметричное явление на несколько симметричных. Другими словами, мы разложили функцию типа (рис. 2, *3*) на сумму трех более простых функций типа (рис. 2, *2*).

Уравнение (7) в случае его использования для изучения зависимости теплоемкости почв от влажности позволяет учесть вклад теплоты смачивания, что обычно не делается, хотя эффект выделения теплоты смачивания уверенно фиксируется экспериментально.

4. В качестве еще одного практического примера приложения описываемого метода укажем на возможность расчета изотерм температурного поля почв, не решая нелинейного дифференциального уравнения теплопроводности (что возможно только численными методами). В этом случае изотермы берутся в качестве исходных единиц (из эксперимента), к которым применяются масштабные преобразования. Знания граничных условий и профильного распределения теплофизических коэффициентов не требуется. Аналогичным образом можно поступать и при моделировании водного режима почв.

ВЫВОДЫ

1. В структуре теоретического знания физика явления и геометрический фон, на котором оно разворачивается, являются взаимодополнительными компонентами. Существует определенный произвол в выборе геометрии, который компенсируется формой физических законов. Чем сложнее геометрия, тем проще физика.

2. В современной науке при математическом описании сложных явлений четко обозначилась тенденция перехода от глобальных геометрий к локальным, которые характеризуются собственными симметриями, системами отсчета, метрикой и эталонами.

3. От выбора степени сложности эталона зависит сложность математической модели. Чем сложнее эталон, тем проще модель. Симметрийный анализ позволяет варьировать эталоны, строя именно такую модель, которая соответствует существующим экспериментальным данным. Изменится набор данных – можно дополнить модель. Модели, построенные на базе дифференциальных уравнений, в отличие от симметрийного анализа, сразу требуют полного набора данных, что не всегда возможно.

4. Симметрийный анализ позволяет выявить в структурно-функциональной концепции физических свойств почв ее более тонкую теоретическую структуру. В частности, он позволяет утверждать, что связь структуры и функций почв осуществляется не только напрямую, но и через единицы измерения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волобуев В. Р. Введение в энергетику почвообразования. М.: Наука, 1974. 128 с.
2. Мичурин Б. Н. Энергетика почвенной влаги. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 140 с.
3. Гухман А. А. Введение в теорию подобия. М.: Высш. шк., 1973. 296 с.
4. Мостепаненко А. М. “Дополнительность” физики и геометрии (Эйнштейн и Пуанкаре) // Эйнштейн и философские проблемы физики 20 века. М.: Наука, 1979. С. 223–254.
5. Эйнштейн А. Физика и реальность. М.: Наука, 1965. 359 с.
6. Ахундов М. Д. Проблема прерывности и непрерывности пространства и времени. М.: Наука, 1974. 256 с.
7. Панченко А. И. Логико-гносеологические проблемы квантовой физики. М.: Наука, 1981. 200 с.
8. Панченко А. И. Философия, физика, микромир. М.: Наука, 1988. 192 с.
9. Вернадский В. И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М.: Наука, 1965. 375 с.
10. Вейль Г. Симметрия. М.: Наука, 1969. 191 с.
11. Левич А. П. Метаболическое время естественных систем // Системные исследования. М.: Наука, 1989. С. 304–325.

12. Арманд А. Д., Таргульян В. О. Принцип дополнительности и характерное время в географии почв // Системные исследования. М.: Наука, 1974. С. 146–153.
13. Степанов И. Н. Формы в мире почв. М.: Наука, 1986. 192 с.
14. Степанов И. Н. Пространство и время в науке о почве. Недокучаевское почвоведение. М.: Наука, 2003. 184 с.
15. Степанов И. Н. Теория пластики рельефа и новые тематические карты. М.: Наука, 2006. 230 с.
16. Омельяновский М. Э. Философские аспекты теории измерения // Материалистическая диалектика и методы естественных наук. М.: Наука, 1968. С. 207–255.
17. Глобус А. М. Экспериментальная гидрофизика почв. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 355 с.
18. Алексеев И. С. Симметрия, инвариантность, реальность // Принцип симметрии (историко-методологические проблемы). М.: Наука, 1978. С. 47–88.
19. Чичулин А. В., Дитц Л. Ю. Симметрия физических явлений в почвах // Организация почвенных систем. Т. 1: Труды 2-й национальной конф. с междунар. участием: Пущино, 2007. С. 62–65.
20. Чичулин А. В., Елизарова Т. Н. Эвристический характер принципа подобия в физике почв // Сиб. экол. журн. 2004. № 3. С. 433–443.
21. Воронин А. Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв. М.: Изд-во МГУ, 1984. 204 с.
22. Спозито Г. Термодинамика почвенных растворов. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 240 с.
23. Глобус А. М. Почвенно-гидрофизическое обеспечение агроэкологических моделей. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 424 с.
24. Курдюмов С. П., Малинецкий Г. Г., Потапов А. Б., Самарский А. А. Структуры в нелинейных средах // Компьютеры и нелинейные явления. Информатика и современное естествознание. М.: Наука, 1988. С. 5–43.

Spatial-Temporal Symmetries of Physical Phenomena in Soil

A. V. CHICHULIN

Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS
630099, Novosibirsk, Sovetskaya str., 18
E-mail: chichulin@ngs.ru

A number of methodological aspects concerning the application of group-theoretical methods in soil physics is considered. The interconnection between the choice of the space-time geometry in which the phenomena under investigation are localized, and the physical laws governing these phenomena is analyzed. The dependence between the choice of quantitative standards of physical values and invariance of the laws describing the interconnections of these values is considered as a specific case. For some examples, the procedures of generalization of traditional symmetries are demonstrated. In particular, the principle of superposition of the symmetries of similarity is formulated for the theoretical description of the humidity characteristics of soil (HCS) and the thermophysical coefficients; the possibility of mathematical modeling of the temperature regime of soil without solving the heat conductivity equation is indicated. The possibility of deeper understanding, from the symmetry analysis viewpoint, of the structural and functional concept of the physical properties of soil is stressed. The considered problems are illustrated with specific equations.

Key words: complex systems, physical characteristics of soil, group theory, similarity, superposition of symmetries.