

РАЗВИТИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ С ПРИЛОЖЕНИЕМ ТЕОРИИ И МЕТОДОВ

ПОДОБИЯ В АГРОФИЗИКЕ

И. Б. Усков, К. Г. Моисеев

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»,
195220, Санкт-Петербург, Гражданский проспект, 14
E-mail: Kir_moiseev@mail.ru

Поступила в редакцию 17 марта 2017 г., принята к печати 26 февраля 2018 г.

Гносеология науки заключается в модели её постепенного развития. Сущность модели выражена в утверждении И. Ньютона о том, что истоки любого нового знания можно найти в прошлом, необходимо лишь внимательное отношение, внимательное изучение работ своих предшественников и своих современников. В статье рассматриваются опыт и история применения в Агрофизическом институте теории подобия и методов моделирования в исследованиях процессов энерго- и массообмена в почве и приземном слое воздуха, роста и развития растений, сукцессий геобиоценозов. Статья является обзорной и посвящена истории физического моделирования в Агрофизическом институте со времени его создания в 1932 году. Во введении рассматривается история организации Физико-агрономического (позднее – Агрофизического) института, даются краткое определение теории и метода подобия, обоснование его применимости к агрофизическим задачам, формулируется цель статьи. Первые три главы представляют собой законченные исследования по истории физического моделирования с применением теории подобия: развитие методов подобия и моделирования в гидрофизике почв; применение теории подобия и анализа размерности в исследованиях структуры и физико-механических свойств почв; развитие теплофизики почв на основе физического моделирования и подобия. В четвертой главе рассматриваются глубокие отличия индикаторов и показателей от критериев физического подобия и возможности применения теории подобия в микроклиматологии.

Ключевые слова: теория подобия, физическое моделирование, история, обзор.

DEVELOPMENT OF MODELLING WITH APPLICATION OF THE THEORY AND METHODS OF SIMILARITY IN AGROPHYSICS

I. B. Uskov, K. G. Moiseev

Agrophysical Research Institute, 14, Grazhdansky prospect, St. Petersburg, 195220, Russia
E-mail: Kir_moiseev@mail.ru

The epistemology of science lies in the model of its gradual development. The essence of the model is expressed in the statement of I. Newton, according to which the origins of any new knowledge can be found in the past, only an attentive attitude, careful study of works of the predecessors and the contemporaries are necessary. The paper presents the description of the experience and history of application of the similarity theory and modeling methods at the Agrophysical Research Institute in the studies of energy and mass transfer processes in the soil and the near-ground layer of air; growth and development of plants; successions of geobiocenoses. The paper is a review of the history of physical modeling at the Agrophysical Research Institute since the time when the institute was founded in 1932. The introduction presents the history of the Physico-Agronomical (later – Agrophysical) Institute, a brief definition of the theory and the method of similarity, the justification of its applicability to agrophysical tasks and the purpose of the paper. The first three chapters describe the completed studies on the history of physical modeling with application of the similarity theory: the development of methods of similarity and modeling in soil hydrophysics; application of the similarity theory and dimension analysis in studies of the soil structure and soil mechanical properties; the development of soil thermal physics on the basis of physical modeling and similarity. The fourth chapter discusses the significant differences between indicators and indexes from the criteria of physical similarity and the possibility of the similarity theory application in the microclimatology.

Key words: similarity theory, physical modeling, history, review.

Я видел дальше других только потому,
что стоял на плечах гигантов.

И. Ньютон

ВВЕДЕНИЕ

Агрофизика служит проводником теории подобия в сферу сельскохозяйственных наук и имеет богатую историю применения методологии модельных исследований. В 1930–1931 гг. академик А. Ф. Иоффе активно занялся организацией агрофизических исследований в стенах Физико-технического института АН СССР. По его инициативе и при поддержке президента ВАСХНИЛ академика Н. И. Вавилова в 1932 г. в Ленинграде на базе Физико-технического института был организован Физико-агрономический институт (впоследствии – Агрофизический научно-исследовательский институт). Стартовая направленность работ института полностью соответствовала актуальным проблемам, сформулированным его создателем и первым директором. Он полагал, что стратегически исследования новой отрасли естественных и агрономических наук должны обеспечить переход от описательной агрономии к агрономии, основанной на измерениях и расчетах. А. Ф. Иоффе в 1937 г. чётко сформулировал необходимость перехода от методологической основы сельскохозяйственных наук к количественной основе. Современник и сподвижник Иоффе Р. Н. Асейкин писал: «...Мы отвергаем претензии на научность у концепций, которые ставят своей целью [и ограничиваются] нахождением некоторых эмпирических суммарных эффектов..., сущность процессов при этом остается скрытой».

Перевод исследований агроэкологических систем на уровень количественных обобщений в перспективе неизбежно ведет к использованию теории подобия. На Западе количественный переход наблюдается на протяжении последних 30-ти лет. Современная российская агрофизика, а также земледельческие и растениеводческие науки не слишком уверенно и необоснованно редко используют принципы и правила подобия в опытном деле и численном моделировании продукционных

процессов, несмотря на то, что общие основы теории подобия, правила и принципы подобия наилучшим образом разработаны именно советскими и российскими учеными – Н. Е. Жуковским, М. В. Кирпичёвым, А. А. Гухманом, П. К. Конаковым, А. В. Лыковым, Л. Г. Лойцяным (Усков и др., 1982, 2002; Моисеев, 2002).

Агроэкосистемы в силу сложности внутренней организации характеризуются множественностью связей между параметрами, отражающими их состояние и влияние факторов окружающей среды, обуславливающих существование и функционирование биологического блока. Исходя из весьма общих соображений можно утверждать, что множественность связей в натуральных экспериментах не является собственным свойством частных задач, решаемых в опытах. Влияние различных факторов, представленных многообразными параметрами и их величинами, проявляется не по отдельности, а совместно (комплексно). Такие комплексы должны иметь ясный физический смысл, они являются устойчивыми комбинациями из величин, существенных для исследуемого процесса и агроэкосистемы в целом. Обобщенные формализованные безразмерные комплексы обладают важными методологическими преимуществами при проведении полевых опытов: во-первых, уменьшается число переменных, требующих измерения и учёта; во-вторых, проявляется совокупное влияние факторов в одном комплексе, называемом обобщенной переменной, что возможно при наличии метрологически обоснованных переменных; в-третьих, выявляются внутренние связи, определяющие направленность и интенсивность развития исследуемого процесса, и, наконец, единичный эксперимент становится натурной моделью для ряда сходственных (подобных) объектов и процессов, описываемых построенными критериями подобия (Усков и др., 2002). Таким образом, исследуется не отдельный вариант, а класс подобных явлений и процессов. Метод подобия является весьма подходящим инструментом для обобщения данных натурального, лабораторного и численного экспериментов, каждого по

отдельности, попарно и комплексно во взаимосвязи.

В статье ставится задача продемонстрировать историю развития и применения методов теории подобия для натурального (полевого), физического и аналогового моделирования в Санкт-Петербургской научной школе агрофизики.

МОДЕЛИРОВАНИЕ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ И ГИДРОФИЗИКИ ПОЧВ

В период создания Агрофизического института исследования по физике, гидрофизике, теплофизике почв и почвенной структуре возглавили энергичные молодые ученые П. В. Вершинин, Ф. Е. Колясев, Б. П. Александров и А. В. Куртнер. Исследования структуры почв, их физико-механических свойств, водного и теплового режимов тесно взаимосвязаны, однако в Агрофизическом институте они постепенно разделились на три до известной степени независимых направления.

В 1946 г. Ф. Е. Колясев привлек к сотрудничеству с АФИ виднейшего физико-химика, впоследствии академика РАН Б. В. Дерягина. В 1957 г. впервые в истории отечественной агрофизики было применено физическое моделирование. Б. В. Дерягин, С. В. Нерпин, М. К. Мельникова и Б. Н. Мичурин создали физическую модель почвенной щелевой колонки: структуру почвы моделировали стальными шариками одинакового размера (диаметром 1 и 1,6 мм), а почвенную влагу имитировали при помощи разных жидкостей – спирта, керосина, бензола. Такая модель позволила исследовать капиллярные явления и влагопроводность в почве. Достижения первого периода развития физического моделирования в институте отражены в «Основах агрофизики» (Вершинин и др., 1959). Физическое моделирование изотермического водного потока в колонне через систему стальных шаров позволило развить теорию изотермического влагопереноса, построить модельные уравнения массообмена в почве и предложить трехслойную модель распределения энтальпии в диффузном слое (Усков и др., 2002; Глобус, 2007).

Метод колонн явился также первой физической моделью при исследовании

процесса неизотермического влагообмена в почвах. Первая модель теплообмена в почве была создана в 1977 г. А. М. Глобусом, С. К. Розенштоком и И. Б. Циприсом (Глобус, 2007). Ими также предложены преобразования подобия для слоистых неравномерно увлажненных структурных систем. Результаты физического моделирования неизотермического влагообмена убедительно свидетельствуют об эффективности преобразований подобия в данном случае. В других работах (А. М. Глобус, А. В. Арефьев) с помощью принципа подобия посредством нормировки по приведённой толщине водной плёнки удалось установить связь между гидрофизическими и теплофизическими характеристиками, а также электрофизическими и теплофизическими свойствами пористых сред. Результаты физического моделирования неизотермического почвенного влагообмена нашли отражение в монографии А. М. Глобуса 1983 г. (Глобус, 2007).

Наконец, ещё одна обширная область применения идей подобия в физике почв возникла благодаря введению Б. Мальдельбротом в 1982 г. в теорию недифференцируемых функций определения фрактала. Исследованию фрактальной природы физических процессов в почвах как хаотических сигналов посвящено большое количество отечественных (Глобус, 1998; Моисеев, 2015) и зарубежных работ. В исследовании (Глобус, 1998) были установлены фрактальные размерности функций влагопроводности ряда почв России и Украины.

МОДЕЛИ ПОЧВЕННОЙ СТРУКТУРЫ, ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

П. В. Вершинин в АФИ возглавил исследования, касающиеся структуры почв, условий ее формирования, строения, прочности и водпрочности, химического закрепления непрочных и неустойчивых структур и почв в целом, физико-химической механики и физических свойств почв.

В 1933 г. Б. Н. Кин (Ротамстендская опытная станция, Великобритания) предложил модель идеальной почвы. Идеальная почва – это структурная система,

состоящая из различно упакованных шаров одинакового размера. К такой системе можно применить пространственные геометрические представления. От типа укладки шаров зависит величина интегральной и дифференциальной пористости такой модели, а также форма почвенных пор. Система укладки шаров определяет физические свойства модели.

Модель «идеальная почва» развивали и использовали при физическом моделировании процессов влагопереноса в капиллярной среде И. А. Лытаев, Б. В. Дерягин, С. В. Нерпин, Н. Ф. Бондаренко, Б. И. Мичурин (1958–1975 гг.). Обобщая модель из шаров, Б.И. Мичурин разработал многоуровневую модель почвенной структуры, указав на то, что отношение плотности системы к плотности слагающих её частиц инвариантно относительно степени уплотнения и структурного состояния почв. Б. Н. Мичурин предположил, что инвариантность почвенной структуры обуславливает инвариантность ряда водных свойств почв. Данное предположение было подтверждено работой Б. Н. Мичурина и И. А. Лытаева (Усков и др., 2002; Глобус, 2007). Мичурин указал на особое значение удельной поверхности в процессах водоудерживания и перемещения почвенной влаги. В 1973–1975 гг., а затем в 1975–1984 гг. совместно со своим учеником и последователем В. Г. Онищенко Б. Н. Мичурин при исследованиях состояния и поведения влаги в низкодисперсных средах, содержащих капиллярную влагу, для обобщённого описания зависимостей давление-влажность использовал уравнение Лапласа, которое связывает давление влаги с радиусом капилляра. Отношение энергии объёма почвенной влаги в виде произведения объёма влаги на её давление (PW) и поверхностная энергия влаги в почве в виде произведения $\sigma \cdot S_o$ формируют симплекс $\frac{P \cdot W}{\sigma \cdot S_o} = \frac{h}{\sigma \cdot S_o}$ или, точнее, безразмерную

переменную $P' = \frac{P \cdot W}{\rho \cdot \sigma \cdot S_o}$, которую

Б. Н. Мичурин и В. Г. Онищенко назвали приведённым капиллярно-сорбционным

давлением почвенной влаги. Изложенные представления отражены в знаменитой монографии Б. Н. Мичурина «Энергетика почвенной влаги» (1975). А. М. Глобус в 1987 г. предложил назвать построенный симплекс $\frac{P \cdot W}{\sigma \cdot S_o}$ критерием Мичурина (Ми).

Приведённый коэффициент влагопроводности однородных дисперсных систем может быть представлен в виде безразмерного комплекса:

$$K' = \frac{\nu \cdot K \cdot S_o^2}{g},$$

где ν – кинематическая вязкость жидкости; K – коэффициент влагопроводности; g – ускорение силы тяжести. Обобщенные переменные позволили осуществить переход от индивидуальных зависимостей $P(W)$, $K(W)$, $K(P)$ к обобщенным на основе критериальных зависимостей $K'(P')$. Автомодельные координаты, когда места функции и аргумента на экспериментальном графике занимают обобщенные переменные (K' и P'), позволяют уложить хаотическое облако экспериментальных точек на единой кривой. Равенство всех критериев подобия для модели и природы является необходимым условием физического моделирования.

В засоленных почвах или почвах, содержащих растворимые вещества, существенный вклад в величину полного потенциала влаги вносит осмотическое давление, величина которого зависит от концентрации соли. Обобщённая переменная приведенного давления P^* засоленных почв имеет следующую структуру (Усков и др., 2002):

$$P^* = \frac{P}{\sigma \cdot C \cdot S_c \cdot d}, \quad (1)$$

где S_c – удельная поверхность соли; C – концентрация растворимых солей; d – объёмный вес почвы.

Для учета гистерезиса ОГХ В. Г. Онищенко предложена обобщенная переменная вида:

$$P^{**} = \frac{P \cdot W^m}{\sigma \cdot \gamma \cdot S_o}, \quad (2)$$

где $m = n - 1/n$; n – тангенс угла наклона кривой $P(W)$ к оси абсцисс; γ – плотность почвы в воздушно-сухом состоянии.

КРИТЕРИИ ФИЗИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ И ИНДИКАТОРЫ

Величина липкости является функцией ряда переменных. При помощи π -теоремы получен безразмерный комплекс, названный приведенной липкостью (Онищенко, 1984; Усков и др., 2002):

$$A^* = A \frac{\sigma \cdot S_o \cdot d}{\rho^2}. \quad (3)$$

На примере соотношения (3) очевидно, что величина липкости почв A приводится к безразмерному виду путём сопоставления с набором переменных. Такая операция называется нормированием и имеет отдаленную родственную связь с канонической теорией подобия и анализом размерности. Сам комплекс (3), как, впрочем, и практически все нормированные переменные, по сути не является критерием подобия физических процессов. Такие нормированные переменные представляют собой индикаторы физического или экологического состояния почвы. Так, оптические индексы NDVI, PDI и VI широко используются при дистанционном зондировании почв и посевов в точном земледелии. Индексы показывают относительное преобладание в отраженном спектре длин волн, соответствующих красной или инфракрасной области спектра (Сурин и др., 2011; Kanash et al., 2013), но никак не свидетельствуют о подобии явлений, приводящих к процессу отражения света исследуемой поверхностью. Сущностные различия между индикаторами и критериями подобия очевидны из исследований физико-механических явлений в почвах при их эрозии или обработке, проводившихся в Агрофизическом институте в 1992–2002 гг. (Усков, 1992; Моисеев, 2002).

В 1995 г. В. Г. Онищенко построил комплекс $\chi = \frac{N \cdot tg\varphi}{\tau}$. К. Г. Моисеевым (2002) было продемонстрировано, что, с одной стороны, больший физический смысл имеет обратная величина, то есть

$\chi = \frac{\tau}{N \cdot tg\varphi}$ – относительное сопротивление

сдвига (где χ – обозначение индикатора; N – нормальная нагрузка при сдвиге почвы; τ – сопротивление сдвига почв; φ – угол внутреннего трения), но, с другой стороны, критерием подобия является

отношение $\pi = \frac{N}{\gamma \cdot l}$ (Моисеев, 2004). Вообще

при сдвиге слоев почв или почвенных частиц (агрегатов) возникает две системы напряжений (Куртнер и др., 1988; Усков, 1992), подобие которых для различных объектов-почв определяется набором критериев и индикаторов. Была построена критериальная функция (Моисеев, 2002):

$$\frac{\tau}{N \cdot tg\varphi} = f\left(\frac{N}{\gamma \cdot l}; \frac{V^2}{\sigma \cdot S_o}; \frac{1}{W}\right) \quad (4)$$

где γ – плотность сложения почв; l – характерный линейный размер (протяженность зоны сдвига; диаметр макроагрегатов почвы); V – скорость сдвига.

Сопротивление сдвига почв – центральный параметр при рассмотрении подобия процессов ветровой эрозии почв. Количество критериев подобия при рассмотрении данного процесса возрастает согласно увеличению числа определяющих размерных параметров процесса. И. Б. Усковым построено пять критериев подобия процесса ветровой эрозии почв (Усков, 1992). При моделировании процессов дефляции для выполнения подобия почв необходимо и достаточно обеспечить равенство пяти построенных критериев в натуральных и модельных образцах.

Исследования И. А. Романова с сотрудниками по созданию искусственной структуры и коркообразованию в 2000-х гг. продолжила Т. Н. Данилова (Усков и др., 2002). Ею было проведено физическое моделирование условий коркообразования в засоленных песках и при помощи анализа размерности и теории подобия построены критерии физико-химического подобия прочности солевых пленок на поверхности песков.

Сравнительно недавно (в конце XX – начале XXI вв.) появились фрактальные

модели почвенной структуры на основе обобщения классических фракталов – ковры Серпинского и губки Менгера. Исследованиями А. М. Глобуса и его аспиранта В. Д. Гончарова подтверждено, что зависимость между размерами почвенных агрегатов и их плотностью подчиняется фрактальным закономерностям (Глобус, 2007).

РАЗВИТИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ТЕПЛОФИЗИКИ ПОЧВ

В 1922 г. Н. Н. Павловским была опубликована теория электрогидродинамической аналогии ЭГДА (Веников и др., 1984). Суть методов электрической аналогии состоит в изоморфизме явлений, имеющих различную физическую природу, но описываемых одинаковыми математическими уравнениями.

При отказе от требований физической однородности расширяются возможности физического моделирования. До компьютерной эпохи под математическим моделированием понималось именно и только аналоговое моделирование. С большой эффективностью электрические аналогии неэлектрических процессов были применены в Агрофизическом институте. Среди исследователей, стоявших у истоков становления теплофизики почв, необходимо назвать Ф. Е. Колясева, Б. П. Александрова, В. З. Богомолова и А. В. Куртнера. В 1937 г. А. В. Куртнер и Б. П. Александров сформулировали основные подходы к решению задач измерения тепловых свойств почвы, а также созданию методов определения термических характеристик почвы. Результаты, полученные в области аналитической теории теплопроводности, обобщены в книге Б.П. Александрова «Физические основы теплового баланса почвы». В дальнейшем данное направление исследований получило всестороннее развитие в трудах А. Ф. Чудновского, опубликованных в 1948–1976 гг. (Куртнер, 2002). А. Ф. Чудновский создал в стенах Агрофизического института всемирно известную школу теплофизики.

Использование электротепловой аналогии при замещении температурного поля полем электрического потенциала с

успехом осуществлялось при решении стационарных задач теплопроводности в почвах. Для нахождения температурного поля в почве при различных рельефах поверхности была применена модель из токопроводящей бумаги с соблюдением геометрического подобия. Анизотропность граничных условий на поверхности массива почвы учитывалась при помощи так называемого дополнительного слоя и моделировалась продольными разрезами по периметру бумажной плоской модели. На электроинтеграторе типа ЭГДА-56 были рассчитаны температурные поля в гребне и почвенном массиве гребнистого поля, а также в пахотном слое почвы на террасах и горных склонах. Для решения задач физико-химической гидродинамики, которые осложнены тем, что движение растворенных веществ происходит как совместно с потоком раствора, так и независимо от его направления под влиянием градиента концентрации растворенных веществ, был использован прием квазианалогового моделирования (Моисеев и др., 2012). Аналоговое моделирование теплового режима, основанное на методах электротепловой аналогии, отражено в монографии Д. А. Куртнера и А. Ф. Чудновского 1979 г. (Куртнер, 2002).

Исследованиями распределения температурных полей в теплицах и других культивационных сооружениях с начала 70-х гг. занимались Г. З. Гершуни, Е. М. Жуковицкий, И. Б. Усков и Д. А. Куртнер (1982). Установление закономерностей формирования температурного поля в объеме и вокруг культивационного сооружения на основе аналитического описания представляет собой весьма сложную задачу. Относительно более простым путем является применение методов физического моделирования (Куртнер и др., 1982). Экспериментальный метод исследования процессов на физической модели основывается на теории подобия. Процессы тепло- и массообмена в теплице протекают в полях массовых сил. Критериями подобия свободного теплового конвективного движения являются критерии Грасгофа ($Gr = g \cdot \beta \cdot \theta \cdot L^3 \cdot \nu^{-2}$), Фурье ($F_o = \alpha \cdot t \cdot L^{-2}$), Прандтля ($Pr = \nu / \alpha$) и

Релея ($Ra = Gr \cdot Pr$) (здесь g – гравитационное ускорение; β – коэффициент температурного расширения; θ – характерная разность температур и сред, обменивающихся теплом; ν – коэффициент кинематической вязкости; α – коэффициент температуропроводности; L – характерный размер; t – время). Равенство именно этих критериев натурной теплицы и ее геометрически подобной физической модели является необходимым и достаточным условием для выполнения подобия процессов в модели и в натурном образце. При отсутствии теплообмена через ограждение с наружным атмосферным воздухом стенки модели теплоизолируются. Условия теплообмена с внешней средой моделируются либо изготовлением ограждения из хорошо проводящего тепло материала, либо размещением на ограждении тепловыделяющих электронагревателей. В первом случае возникает необходимость подбора жидкостей, заполняющих объем модели и объем вне её. Во втором случае внешний объем модели заполняется жидкостью, температура которой поддерживается постоянной на заданном уровне. При выборе параметров модели учитывается условие сохранения и возможного нарушения конвективной устойчивости неравномерно нагретой жидкости. Порог устойчивости оценивается по наименьшему значению модифицированного критерия Релея и соответствующего волнового числа возмущения, зависящего от формы поперечного сечения натурального образца (Куртнер и др., 1982). Исследования теплообмена в двухслойных (в том числе продуваемых) ограждениях натуральных теплиц осуществить практически невозможно. Физическое моделирование является единственным реализуемым методическим приемом. В данном случае при полном геометрическом подобии с натурой внутренние стенки модели ограждения покрываются тепловыделяющими элементами с регулируемой мощностью. На моделях продуваемых ограждений при вынужденной тепловой и наложенной гравитационной конвекции вводится критерий Рейнольдса (Усков и др., 2002), и

обобщенная функция интенсивности теплообмена принимает вид $Nu = \xi(Gr; Pr)$. Исследования процессов теплообмена на поверхности сельскохозяйственных полей в элементах расчлененных ландшафтов, а также процессов массопереноса на склонах в холмистой местности и возникающих в суточных циклах склоновых ветров являются задачами, которые весьма трудно реализовать в натуральных условиях. Использование физических моделей склонов с изменяемыми углами наклона и температурами поверхности, а также с «управляемыми» температурными разностями «всплывающих» и «стекающих» по склону воздушных потоков позволяет имитировать данные процессы. При этом следует отметить оригинальность измерения параметров и визуализации неизотермических воздушных потоков на склонах и в объеме теплицы оптическим полуколичественным теневым методом (прибор ИАБ-451) цветного отображения (Усков и др., 2005).

Для физического моделирования процессов энерго- и массопереноса в природных объектах применялся метод магнитогидродинамической аналогии (Бондаренко и др., 1989). Для физического моделирования взаимодействия процессов энергопереноса с ветровыми потоками в природных объектах и воздушными потоками внутри культивационных сооружений возможно использование в качестве модельной жидкости электролитов, а для организации их движения – магнитогидродинамической конвекции. Для управления турбулентной структурой и скоростью модельных потоков в слоях от 1 до 5 мм со свободной поверхностью в качестве источника массовых сил предложено применять специальным образом сформированные скрещенные в пространстве электрические и магнитные поля задаваемой конфигурации.

При исследовании взвесенесущих потоков, возникающих при развевании золо- и шлакоотвалов или при дефляции почв, в 1998–2000 гг. В. Н. Лазутиным успешно применялись методы электростатической аналогии (Усков и др., 2002). Процесс развевания верхнего слоя почвы начинается

с вертикального отрыва частиц под воздействием аэродинамических сил. Подобную траекторию движения частиц можно смоделировать в электростатическом поле (Лазутин, 1997).

При наложении электростатического поля высокой напряжённости на почвенных частицах возникает электрический заряд. При определённой конфигурации и напряженности электростатические силы преодолевают силы тяжести и адгезии, частицы отрываются от поверхности и двигаются вдоль силовых линий электрического поля. Изменяя геометрическую форму электродов и напряженность, можно управлять движением частиц и измерять энергию отрыва, имитируя аэродинамический процесс. Согласование экспериментальных данных опытов в аэродинамической трубе и электростатическом поле показало, что процессы выноса почвы в ветровоздушном потоке и в электростатическом поле являются аналогичными. На такой аналоговой модели могут быть получены значения критической скорости ветра по измеренной напряжённости электростатического поля на основе закона сохранения энергии. При помощи метода электростатической аналогии можно оценить величину удельной поверхности почв.

В методе сравнительного определения удельной поверхности почвы с помощью газовой хроматографии (Банкин и др., 1998) использовано перемещение смеси газов по колонке, заполненной мелкозернистым пористым сорбентом минеральной, органической или полимерной природы с развитой удельной поверхностью. По последовательности выхода газов из колонки определяется время удержания индивидуального газа: оно пропорционально удельной поверхности сорбента. Тогда при постоянной температуре T и скорости газа носителя Q :

$$\frac{t_R^1}{t_R^2} = \frac{S_o^1}{S_o^2} \text{ или } S_o^2 = \frac{t_R^1 + S_o^1}{t_r^2}$$

В 2008 г. К. Г. Моисеев, используя метод анализа размерности и теорию подобия, получил точное однозначное решение зависимости между удельной поверхностью и гигроскопической

влажностью почв, а также между относительной влажностью воздуха и гигроскопической влажностью почв:

$$S = 19,54 \cdot GB,$$

или, более корректно, в произвольных термодинамических условиях (Моисеев, 2008):

$$S = \frac{7,23}{\varphi} GB,$$

где φ – относительная влажность воздуха в месте хранения почвенных образцов; GB – гигроскопическая влажность почв, определяемая стандартным методом.

В последнее время (Данилова, 2009) теория подобия нашла применение при моделировании смены одних растительных сообществ другими – сукцессий биогеоценозов. Любая экосистема находится в состоянии динамики в процессе приспособления к изменяющимся факторам внешней среды. Динамика может касаться как отдельных звеньев экосистемы (организмов, популяций), так и всей системы в целом. Смена фитоценозов во время сукцессии идет в направлении к более климатически устойчивым растительным сообществам. В состав предикторов, определяющих скорость изменения структуры ценозов при сукцессиях, включаются: U_n (С°/дни) – скорость прогнозируемого изменения температуры корнеобитаемого слоя почвы; τ_e – время вегетационного периода (дни); U_s (количество дней) – скорость отмирания вегетативных органов; $\sum \tau_p$ (дни) – сумма дней жизни; $T_{кр}$ (С°) – температура, при которой не закладываются зачатки вегетативных органов. Получен критерий подобия вида:

$$H_\phi = \frac{U_n \cdot \tau_B}{U_B \cdot \sum \tau_p T_{кр}}$$

Критерии подобия такого вида принято называть числами гомохронности, в данном случае он может быть назван критерием фитогомохронности.

Вторым критерием подобия при моделировании системы «почвенный покров растительного ценоза – почвенный покров окружающей среды» следует считать отношение тепловых критериев гомохронности F_o (критериев Фурье),

выписанных отдельно для обоих сравниваемых почвенных покровов. Таким образом учитывается связь между скоростями изменения температурных полей в двух смежных структурных элементах физической модели, теплофизические характеристики которых существенно различаются. Данный критерий подобия имеет вид:

$$Fo = \frac{F_{01}}{F_{02}} = \frac{a_1 \cdot \tau_1}{a_2 \cdot \tau_2} \cdot \left(\frac{l_2}{l_1} \right)^2,$$

где $Fo = \frac{a \cdot \tau}{l^2}$, индекс 1 относится к корнеобитаемому слою ценоза, индекс 2 – к почвенному покрову окружающего массива; a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2 \cdot \text{час}^{-1}$; τ – время, час; l – толщина почвенного слоя, м.

Если рассматривать процесс как протекающий за равные промежутки времени, что методически оправдано при подборе почвенно-растительного ценоза и окружающего массива по теплофизическим характеристикам и соотношению толщин почвенного покрова в физической модели, то критерий преобразуется к виду:

$$Fo = \frac{a_1}{a_2} \left(\frac{l_2}{l_1} \right)^2.$$

Включение чисел гомохронности в число определяющих критериев позволит расчетным путем прогнозировать время изменения структуры ценозов в результате ускоренных сукцессий без проведения натуральных измерений, обобщать результаты натуральных наблюдений и экспериментов на

модельных системах в критериальном виде и выполнять прогнозные расчеты изменений климата на заданный промежуток времени по любой редакции регионального прогноза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теория подобия является основой физического и математического моделирования и выполняет функцию организации и планирования научного эксперимента, а также обобщения данных опытов. Факторное планирование эксперимента, статистическая обработка его результатов и идентификация моделей являются частями единой теории подобия. Идентификация моделей позволяет переносить результаты моделирования на подобные среды, процессы и явления. Критерии идентификации особенно необходимы для математических моделей агроэкосистем, так как обычно в процессе математического динамического моделирования реальная среда исчезает.

В современной науке нет такой области, в которой не использовались бы правила, положения и теоремы подобия. Применение теории подобия осознанно или интуитивно, явно или не явно, в той или иной степени носит по-настоящему всеобщий характер. Некоторые положения теории подобия (например, правила Фурье) воспринимаются многими исследователями как нечто само собой разумеющееся, очевидное настолько, что их методологически глубокий (базовый) смысл уже неотделим от общенаучной методологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Банкин М. П., Банкина Т. А., Богданова Н. Н. Метод сравнительного определения удельной поверхности с помощью газовой хроматографии // *Агрофизические методы и приборы в трех томах. Физика почв*. 1998. Т. 1 / под ред. А. М. Глобуса. СПб.: АФИ. С. 18–21.
- Бондаренко Н. Ф., Гак Е. З., Гак М. З., Смоляр Э. И. Гидродинамическое моделирование в системе «воздух – растение – почва» // *Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук*. 1989. № 10. С. 11–18.
- Веников В. А., Веников Г. В. Теория подобия и моделирования. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа. 1984. 439 с.
- Вершинин П. В., Мельникова М. К., Мичурин Б. Н. Основы агрофизики. М.: Физматгиз, 1959. 910 с.
- Глобус А. М. Агрофизический институт: 75 лет на пути к точному земледелию. СПб.: ПИЯФ РАН, 2007. 112 с.
- Данилова Г. В. Физическое моделирование динамики структуры и сукцессий растительных ценозов при климатических изменениях // *Глобальные изменения климата и прогноз рисков в сельском хозяйстве России: коллективная монография / под ред. академиков Россельхозакадемии А. Л. Иванова, В. И. Кирюшина*. М.: Россельхозакадемия, 2009. 518 с.
- Куртнер Д. А., Усков И. Б. Климатические факторы и тепловой режим в открытом и защищенном грунте. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 231 с.
- Куртнер Д. А., Усков И. Б. Управление микроклиматом сельскохозяйственных полей. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 206 с.
- Куртнер Д. А. Почвенная теплофизика // *Агрофизика от А. Ф. Иоффе до наших дней*. СПб.: АФИ, 2002. С. 62–73.
- Лазутин В. Н. Использование электростатических полей для определения свойств и качества сельскохозяйственных материалов и объектов: дисс... доктора техн. наук. СПб., 1997. 291 с.
- Моисеев К. Г. Применение теории подобия в исследованиях физико-механических свойств почв: дисс... канд. с.-х. наук. СПб.: ФБГНУ АФИ, 2002. 153 с.
- Моисеев К. Г. Применение теории подобия к процессу уплотнения почв // *Почвоведение*. 2004. № 8. С. 934–936.
- Моисеев К. Г. Определение удельной поверхности почв на основе величины гигроскопической влажности // *Почвоведение*. 2008. № 7. С. 845–849.
- Моисеев К. Г. Фракталы: анализ временных рядов в агрофизике // «2015 International Year of Soils». Сб. докл. заседаний Санкт-Петербургского отделения общества почвоведов им. В. В. Докучаева. СПб.: ООО «ВВМ», 2015. С. 3–13.
- Моисеев К. Г., Бойцова Л. В., Гончаров В. Д. Способы выделения илстой фракции почв // *Агрофизика*. 2012. № 1. С. 35–39.
- Онищенко В. Г., Веденина А. А. Зависимости между некоторыми (удельная поверхность, липкость) физико-механическими свойствами почв // *Бюлл. АФИ*. 1984. № 55. С. 54–59.
- Сурин В. Г., Моисеев К. Г., Пищик В. Н. Использование вегетационного индекса для калибровки оптических тестеров по азотному питанию растений в посевах // *Современное состояние агрофизики и ее задачи*. Материалы научной сессии Агрофизического института. СПб.: АФИ, 2011. С. 90–94.
- Усков И. Б. Правила подобия в модельных исследованиях почвозащитных систем // *Почва и растение – процессы и модели / Усков И. Б., Ермаков Е. И., Мошков Б. С., Полуэктов Р. А. Сборник научных трудов*. СПб.: АФИ, 1992. С. 49–57.
- Усков И. Б., Глобус А. М., Онищенко В. Г. Физическое моделирование и подобие // *Агрофизика от А. Ф. Иоффе до наших дней*. СПб.: АФИ, 2002. С. 35–49.
- Усков И. Б., Трегуб В. П., Козырева Л. В., Ефимов А. Е. Расшифровка цветных тенегрмм. СПб.: АФИ, 2005. 78 с.
- Globus A. M. On fractal character of soil solid phase surface as revealed by retentivity function // *Annales Geophysicae*, 1998, v. 16, no. 4, pp. 1072–1082.
- Kanash E. V., Panova G. G., Blokhina S. Yu. Optical criteria for assessment of efficiency and adaptogenic characteristics of biologically active preparations. *Acta Horticulturae*, 2013. DOI: 10.17660.

REFERENCES

- Bankin M. P., Bankina T. A., Bogdanova N.N. Metod sravnitel'nogo opredeleniia udel'noi poverkhnosti s pomoshch'iu gazovoi khromatografii [Method of comparative definition of a specific surface area by means of gas chromatography]. *Agrofizicheskie metody i pribory v trekh tomakh. Fizika pochv. T. 1* [Agrophysical methods and devices in three volumes Physics of soils t.1] / Under edition of A. M. Globus. Saint-Petersburg: ARI, 1998, pp. 18–21.
- Bondarenko N. F., Gawk E. Z., Gawk M. Z., Smokier E. I. Gidrodinamicheskoe modelirovanie v sisteme «vozdukh – rastenie – pochva» [Hydrodynamic model operation in the «air – a plant – the soil» system]. *Doklady Rossiiskoi akademii sel'skokhoziaistvennykh nauk*, 1989, no. 10, pp. 11–18.

- Venikov V. A., Venikov G. V. *Teoriia podobiia i modelirovaniia. 3-e izd., pererab. i dop.* [Similarity theory and model operations. 3 edition processed and added]. Moscow: Publishing house the Higher School, 1984. 439 p.
- Vershinin P. V., Mel'nikova M. K., Michurin B. N. *Osnovy agrofiziki.* [Fundamentals of Agrophysics]. Moscow: Fizmatgiz, 1959. 910 p.
- Globus A. M. *Agrofizicheskii institut: 75 let na puti k tochnomu zemledeliiu* [Agrophysical institute; 75 years on the way to precise agriculture]. Saint-Petersburg: PIYAF RAS, 2007. 112 p.
- Danilova G. V. Fizicheskoe modelirovanie dinamiki struktury i suksessii rastitel'nykh tsenozov pri klimaticheskikh izmeneniyakh [Physical model operation of dynamics of structure and successions of vegetable tsenoz at climatic changes]. *Global'nye izmeneniya klimata i prognoz riskov v sel'skom khozyaistve Rossii: kollektivnaya monografiya* [Global climate changes and the forecast it is risk in agriculture of Russia: collective monograph]. / Under edition of academicians of the Russian Agricultural Academy A. L. Ivanov, V. I. Kiryushin. Moscow: Russian Agricultural Academy, 2009. 518 p.
- Kurtener D. A., Uskov I. B. *Klimaticheskie faktory i teplovoi rezhim v otkrytom i zashchishchennom grunte* [Climatic factors and thermal conditions in the opened and protected soil]. Leningrad: Hydrometeorological publishing, 1982. 231 p.
- Kurtener D. A., Uskov I. B. *Upravlenie mikroklimatom sel'skokhozyaistvennykh polei* [Management of a microclimate of agricultural fields]. Leningrad: Hydrometeorological publishing, 1988. 206 p.
- Kurtener D. A. Pochvennaia teplofizika [Soil thermal physics]. *Agrofizika ot A.F. Ioffe do nashikh dnei* [Agrophysics from A.F. Ioffe to our days]. Saint-Petersburg: ARI, 2002, pp 62–73.
- Lazutin V. N. *Ispol'zovanie elektrostaticheskikh polei dlia opredeleniia svoistv i kachestva sel'skokhozyaistvennykh materialov i ob'ektov:* diss... doktora tekhn. nauk [Use of electric fields for definition of properties and quality of agricultural materials and objects. Dr. teh. sci. diss]. Saint-Petersburg, 1997. 291 p.
- Moiseev K.G. *Primenenie teorii podobiia v issledovaniyakh fiziko-mekhanicheskikh svoistv pochv:* diss... kand. s.-kh. nauk [Application of a similarity theory in researches of physical and mechanical properties of soils. Cand. agr. sci. diss]. Saint-Petersburg, FBSSI ARI, 2002. 153 p.
- Moiseev K. G. Primenenie teorii podobiia k protsessu uplotneniia pochv [Application of similarity theory for the study of soil compaction phenomena]. *Pochvovedenie*, 2004, no. 8, pp. 934–936.
- Moiseev K. G. Opredelenie udel'noi poverkhnosti pochv na osnove velichiny gigroskopicheskoi vlazhnosti [Determination of the specific soil surface area from the hygroscopic water content.] *Pochvovedenie*, 2008, no. 7, pp. 845–849.
- Moiseev K. G. Fraktaly: analiz vremennykh riadov v agrofizike [Fractals: the analysis of time series in agrophysics]. «2015 International Year of Soils». *Sb. dokl. zasedanii SPb otdeleniia obschestva pochvovedov im. V. V. Dokuchaeva* [Digest reports of meetings of Saint-Petersburg offices of society of soil scientists of V. V. Dokuchayev]. Saint-Petersburg: LLC VVM, 2015, pp. 3–13.
- Moiseev K. G., Boitsova L. V., Goncharov V. D. Sposoby vydeleniia ilistoi fraktsii pochv [Ways of selection of oozy fraction of soils]. *Agrofizika*, 2012, no. 1, pp. 35–39.
- Onishchenko V. G., Vedenina A. A. Zavisimosti mezhdu nekotorymi (udel'naia poverkhnost', lipkost') fiziko-mekhanicheskimi svoistvami pochv [Dependences between some (specific surface area, stickiness) physico-mechanical properties of soils]. *Bulletin ARI*, 1984, no. 55, pp. 54–59.
- Surin V. G., Moiseev K. G., Pischik V. N. Ispol'zovanie vegetatsionnogo indeksa dlia kalibrovki opticheskikh testerov po azotnomu pitaniyu rastenii v poseve [Use of a vegetative index for calibration of optical testers on a nitric delivery of plants in crops]. *Sovremennoe sostoianie agrofiziki i ee zadachi* [The current state of agrophysics and its problem]. *Materialy nauchnoi sessii Agrofizicheskogo instituta* [Materials of a scientific session of Agrophysical institute]. Saint-Petersburg: ARI, 2011, pp. 90–94.
- Uskov I. B. Pravila podobiya v model'nykh issledovaniyakh pochvozashchitnykh sistem [Rules of similarity in model researches of soil-protective systems]. *Pochva i rastenie - protsessy i modeli* [The soil and a plant – processes and models] / Uskov I. B., Ermakov E. I., Moshkov B. S., Poluektov R. A. Collection of scientific works. Saint-Petersburg: ARI, 1992, pp. 49–57.
- Uskov I. B., Globus A. M., Onishchenko V. G. Fizicheskoe modelirovanie i podobie [Physical modeling and similarity]. *Agrofizika ot A.F. Ioffe do nashikh dnei* [Agrophysics from A.F. Ioffe to our days]. Saint-Petersburg: ARI, 2002, pp. 35–49.
- Uskov I. B., Tregub V. P., Kozyreva L. V., Efimov A. E. *Rasshifrovka tsvetnykh tenegramm* [Interpretation color shadowgraph]. Saint-Petersburg: ARI, 2005, 78 p.
- Globus A. M. On fractal character of soil solid phase surface as revealed by retentivity function. *Annales Geophysicae*, 1998, v. 16, no. 4, pp. 1072–1082.
- Kanash E. V., Panova G. G., Blokhina S. Yu. Optical criteria for assessment of efficiency and adaptogenic characteristics of biologically active preparations. *Acta Horticulturae*, 2013, DOI: 10.17660.