

УДК 910.1

## РАЗВИТИЕ НОВЫХ НАПРАВЛЕНИЙ В ДИСЦИПЛИНАХ ГЕОФИЗИКИ ЛАНДШАФТОВ

К.Н. Дьяконов<sup>1</sup>, В.В. Сысуев<sup>2</sup>

<sup>1-2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии и ландшафтоведения

<sup>1</sup>Зав. кафедрой, чл.-корр. РАН, профессор; e-mail: diakonov.geofak@mail.ru

<sup>2</sup>Профессор, докт. геогр. н.; e-mail: v.v.syss@mail.ru

Фундаментальной основой при постановке и разработке дисциплины «Геофизика ландшафта» выступали системный подход, физический монизм, метод балансов, модель трофической пирамиды. Широкое использование измерительных процедур и ГИС-технологий в начале XXI в. привело к накоплению огромного массива данных о состоянии ландшафтов. Утвердилось представление о необходимости создания физико-математического базиса для синтеза структуры и функционирования геосистем. На кафедре физической географии и ландшафтоведения с начала века значительно усилилась физико-математическая подготовка в результате постановки дисциплин: «Инструментальная база ландшафтных исследований», «Методы анализа пространственных данных», «Моделирование геосистем», «Геоинформационные технологии ландшафтных исследований», «Биогеофизика и биогеохимия ландшафтов», «Математическая морфология ландшафта», «Физико-математические основы ландшафтоведения» и др. Рассмотрены особенности изложения материала в расчете на знание математики в объеме, преподаваемом на физико-географическом потоке. Обоснован путь введения основных уравнений и моделей на физическом уровне строгости. Представлено краткое обсуждение новых дисциплин. На примере ландшафтно-гидрологических геосистем по Хортону – Стралеру показана связь системной методологии с физико-математической сущностью этой модели организации ландшафтов. Отмечено практическое значение развития направления для задач оптимизации природопользования и управления лесопользованием.

**Ключевые слова:** геофизика и биогеофизика ландшафта, методы преподавания, физико-математическое моделирование, теория геосистем, структура и функционирование ландшафтов

### ВВЕДЕНИЕ

Широкое использование измерительных процедур и ГИС-технологий привело к накоплению огромного массива данных о состоянии земной поверхности, что неизбежно привело к применению математики для их обработки. Это повлекло за собой резкое увеличение работ по моделированию пространственно распределенных систем и появление новых пакетов прикладных программ в самых разнообразных отраслях науки об окружающей среде.

В начале XXI в. утвердилось понятие о необходимости создания физико-математического базиса для синтеза структуры и функционирования геосистем. Например, в монографии [Мотовилов, Гельфан, 2018], систематизирующей модели формирования речного стока, географы Мотовилов Ю.Г. и Гельфан А.Н. подчеркивают объективность развития гидрологии в направлении построения собственной методологии на базовых физико-математических принципах и понятиях, единых для геофизических наук – метеорологии, океанологии, климатологии, физики Земли. Стала очевидна физическая сущ-

ность большинства процессов функционирования и структурообразования геосистем и возможность говорить не просто о «математизации» географии, а о возникновении качественно новой геофизической парадигмы ландшафтоведения, которая и должна стать фундаментом физической географии в целом [Сысуев, 2020].

Для адекватного описания процессов в геосистемах необходимы детальные модели, разработка которых невозможна без специалистов физико-географов и ландшафтоведов. Поэтому остро стоит задача привлечения внимания нового поколения исследователей к проблемам разработки теории ландшафта. Вместе с тем опыт работы на географическом факультете показал, что физико-математическая подготовка географов традиционно оставляет желать лучшего. Проблемы качества обучения в университетских курсах математики и их прикладного использования, в том числе на естественно-научных факультетах, стоят и в ведущих университетах других стран. Обсуждению этих вопросов посвящены Международные конференции по мате-

математическому образованию, например ICME-13, по результатам которой Springer выпустил специальную серию отдельных публикаций [Cai et al., 2016; Viza et al., 2016], а также статьи в специализированном международном журнале [Geisler, Rolka, 2021].

В связи с необходимостью приведения содержания дисциплин в соответствие с современным состоянием наук об окружающей среде, на кафедре физической географии и ландшафтоведения был введен целый ряд новых дисциплин в расширение традиционных курсов «Геофизика ландшафта» и «Биогеофизика ландшафтов». В статье изложены опыт и некоторые аспекты преподавания этих новых направлений. Оригинальные курсы, рассматривающие основные принципы моделирования процессов функционирования и формирования пространственной структуры геосистем разработаны и преподаются в университетской географии России впервые.

#### НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ОСОБЕННОСТИ ИХ ПРЕПОДАВАНИЯ ГЕОГРАФАМ-ЛАНДШАФТОВЕДАМ

В связи с вышеизложенным, на кафедре физической географии и ландшафтоведения было существенно усилено направление геофизики ландшафта – разработана и преподается с 2000-х гг. целая группа дисциплин: «Физико-математические основы ландшафтоведения» (В.В. Сысуев); «Моделирование геосистем» (В.В. Сысуев, А.С. Викторов); «Геоинформационные технологии ландшафтных исследований» (Д.Н. Козлов); «Методы анализа пространственных данных» (Ю.Г. Пузаченко); «Прикладная математика (Математическая статистика)» (А.В. Хорошев); «Инструментальная база ландшафтных исследований» (В.В. Сысуев); «Биогеофизика и биогеохимия ландшафтов» (К.Н. Дьяконов, И.А. Авессаломова, В.В. Сысуев), в том числе разделы «Популяционная динамика. Модели продуктивности экосистем и биогеоценозов. Структура и функционирование болотных ландшафтов» (В.В. Сысуев). Последовательность курсов складывалась не сразу и не всегда логично. Основные дисциплины – «Физико-математические основы ландшафтоведения», «Биогеофизика и биогеохимия ландшафтов» – читались в предпоследнем семестре специалистам, а затем и бакалаврам. Расширенный курс «Моделирование геосистем» был добавлен магистрам в первом семестре. Дисциплины оснащены электронными презентациями, учебными пособиями и монографиями [Дьяконов, 1988; Пузаченко, 2004; Сысуев, 2003; Николаев и др., 2008; Сысуев, 2014а; 2020]. Учебные планы и программы курсов опубликованы на сайтах географического факультета

МГУ имени М.В. Ломоносова [Программы дисциплин..., 2020; Учебные планы, 2020].

Наряду с лекциями большое внимание уделяется самостоятельной работе студентов. Обязательным является участие студентов в работе семинаров, подготовка рефератов и докладов с презентациями по темам занятий. В качестве тем поощряется использование направления собственных курсовых работ студентов. При обсуждении докладов выясняется степень понимания использованных материалов.

Курсы лекций создавались в расчете на знание математики в объеме, преподаваемом на физико-географическом потоке. Это накладывает существенные ограничения на применение прикладной математики в обучении. Так называемая математическая строгость часто отталкивает – студенты-географы отчасти «напуганы» математикой еще на первых курсах. В классическом определении математика (значит «доказательство») оказалась практически не применима к преподаванию дисциплин. Фактически обучение сводится к тому, чтобы показать или *доказать, что данная задача географии может быть решена именно этим методом*, используя именно этот раздел математики, именно это уравнение... Немного перефразируя популяризатора математики [Пантаев, 2020, с. 7], можно сказать: «Вообще пока неизвестно, существует ли „оптимальный метод“ обучения математике нематематиков. Прежде всего потому, что слишком неоднороден и индивидуален сам обучающийся. Да, будущие географы не любят доказательств. Но они по природе своей любознательны, подозрительны и недоверчивы, как любой русский человек, привыкший к тому, что его обманывают на каждом шагу. Поэтому хорошо, если все утверждения будут сопровождаться хоть какими-то доказательствами: иногда – совершенно строгими, иногда – уступающими место эвристическому рассуждению; в отдельных глубоких местах целью должно стать – донести до читателя хоть что-то».

Был выбран путь *введения основных уравнений и моделей на физическом уровне строгости*, привлекая известные фундаментальные законы и соотношения в сочетании с образными определениями. Для успешного освоения дисциплин студенты должны знать собственные объекты физической географии, понимать физический смысл природных процессов, поскольку формулирование моделей проводится от объекта (геосистем и геосистемных процессов), а не от аппарата выведения (математики).

Любой курс начинается с введения аксиом и важнейших понятий, которые затем многократно используются в лекциях. Хотя и предполагаются некоторые начальные знания у студентов, но ряд фундаментальных понятий необходимо вводить снова.

Опыт преподавания «Физико-математических основ ландшафтоведения» показал, что эти понятия необходимо вводить через их физический смысл.

Простейшие примеры: *производная* – это скорость течения жидкости, но это еще и уклон, сила, импульс, цена, мера чувствительности и т. д. А иногда – просто скорость изменения одной величины при изменении другой и применяется как «инструмент», например, при решении задачи оптимизации. *Вторая производная* по времени – ускорение и т. д. Более сложные понятия не просто постулируются, а неоднократно объясняются. Например, абсолютное значение *градиента высоты* – это уклон в долях единицы (или, как на дорожных знаках, в %), тангенс угла наклона на местности или по топографической карте. Затем рассматривается элементарная работа  $dA$  по перемещению материальной точки в потенциальном поле сил  $U(x, y, z)$ , которая равна сумме произведений сил  $F_x, F_y, F_z$  на расстояния  $dx, dy, dz$ , пройденные в их направлении. Из выражения суммы приращений элементарных работ  $dA$ , равной приращению потенциальной энергии  $dU$ , получаем уравнение для вектора сил:

$$dA = F_x dx + F_y dy + F_z dz = dU \Rightarrow$$

$$\vec{F} = -\left(\frac{\partial U}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial U}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial U}{\partial z} \vec{k}\right) = -\text{grad}U = -\nabla U, \quad (1)$$

где  $\nabla$  – набла, оператор пространственного дифференцирования. Из этого выражения следует более корректное определение: *градиент это вектор, своим направлением указывающий направление наибольшего возрастания некоторой величины*, или дифференциальный оператор скалярной величины по пространственным координатам. Такое определение позволяет в дальнейшем правильно использовать  $\text{grad}U$  и  $\nabla U$ . После этого вектор градиента поля гравитации воспринимается студентами намного проще.

Аналогичный подход для известных в физической географии понятий дивергенция и конвергенция. Используем понятие потока  $J$  вектора  $A$  в трехмерном пространстве: суммируя потоки через поверхности трехмерного параллелепипеда, в соответствии с направлением получаем сначала приращение потока вдоль оси  $x$ :

$$-A_x(x)dydz + A_x(x+dx)dydz = dJ_x, \text{ или}$$

$$dJ_x = \frac{\partial A_x}{\partial x} dx dy dz$$

Складывая полученные таким же образом приращения потока через остальные поверхности по направлениям  $y$  и  $z$ , получим суммарное значение

приращения потока  $dJ$  и точное выражение для определения *дивергенции – скалярной меры расходимости вектора*:

$$dJ = \left(\frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z}\right) dx dy dz \Rightarrow$$

$$\text{div } \mathbf{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} = (\nabla \mathbf{A}), \quad (2)$$

где  $\text{div } \mathbf{A}$  – это дифференциальный оператор векторной величины по пространственным координатам, или скалярное поле, характеризующее плотность источников векторного поля.

После введения этих понятий остается совсем немного до понимания физического смысла рассчитываемых по ЦМР морфометрических величин, теорем о механизмах аккумуляции вещества и вывода математических моделей геофизических процессов в ландшафтах.

Следующий прием – *построение моделей всегда начинается с аксиом и фундаментальных законов*. Например, усложнение закона Ньютона (ускорение выражается через производную скорости по времени, масса выражается через произведение плотности среды на приращение объема, а сила расписывается как сумма объемных внешних сил и внутренних напряжений трения) приводит к системе уравнений Навье – Стокса. Последующая детализация турбулентной среды – к уравнениям Рейнольдса, решение которых весьма не простое. Поэтому в дальнейшем производится последовательное упрощение – интегрирование уравнений Рейнольдса до уравнений «мелкой воды», а затем упрощение до уравнений Сен-Венана, и, наконец, до уравнения кинематической волны.

Для ввода моделей природных процессов применяются аналоги и других законов: неразрывности – балансовые соотношения потоков различных субстанций за определенный интервал времени; Ома – поток вещества/энергии равен частному от деления значения потенциала/концентрации на сопротивление среды; Фика – диффузия в неподвижной среде вследствие градиента концентраций и др. Часто имитационные модели описывают просто скорость изменения количества компонента в зависимости от его общего содержания и баланса поступления-оттока в компартменте. В любом случае уделяется внимание физическому смыслу применяемого закона, размерности независимых величин, параметров и коэффициентов.

**Небольшое число практических задач разбираются наиболее подробно:**

1. Дифференциация поверхности рельефа на основе данных дистанционного зондирования и системы морфометрических величин (МВ), описы-

вающих распределение градиентов геофизических полей гравитации и инсоляции; дифференциации геосистем на основе типологического и функционального подхода.

2. Модели дождевого склонового стока и динамики фильтрации влаги в почвах с учетом эвапотранспирации и изменения влагозапасов; верификация численного моделирования по данным натурных экспериментов.

3. Перенос растворенных веществ в дерново-подзолистых почвах с описанием сорбционных процессов; постановка математической модели и проведение целенаправленных экспериментов для получения физико-химических параметров.

4. Эмпирические механизмы задержания и трансформация дождевых осадков пологом леса и выбор независимых переменных, вывод системы уравнений и сравнение численного моделирования с наблюдениями по перехвату осадков пологом леса.

5. На основе уравнения Дарси вывод формул кривой депрессии уровня грунтовых вод, и их адаптация к ландшафтными исследованиям.

Полезность этих примеров в том, что моделирование структуры геосистем и природных процессов выполнено автором от постановки задачи, численного решения уравнений и определения параметров, до последней железки экспериментальных установок и измерительных приборов. *Изложение якобы незначительных подробностей вперемежку с воспоминаниями иногда способствует эффективности занятий.*

Ряд задач рассматривается на практических работах с использованием расчетов по простейшим моделям (например, уровня грунтовых вод, одномерной кинематической волны, стационарной формы верхового болота и др.), а также в доступных программных пакетах типа FractDim, ГИС SAGA, GRASS и др.

## ОБСУЖДЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ НОВЫХ ДИСЦИПЛИН

**Общезначительные постулаты теории геосистем.** Любая теория предполагает наличие аксиом, постулатов, некоторой длины логических построений и аппарата выведения. В одних случаях постулаты в задачах моделирования геосистем формулируются аналогично принятым в физике, в других – в виде соотносящихся определений. В курсе «Физико-математические основы ландшафтоведения» сжато приводятся некоторые основные положения.

*Пространство определяется* как совокупность точек, задаваемых числами – *координатами точек*. Геометрия пространства геосистем низких рангов с высокой степенью точности является евклидовой. Соответственно, декартова система координат и

евклидова метрика, на которых отображается дискретизация пространства и, в частности, сетки цифровых моделей рельефа (ЦМР), естественным образом отображают пространство геосистем.

*Геосистемы состоят из макроскопических тел*, которые сложены очень большим числом отдельных частиц в любом существенном для геосистем объеме. Поэтому каждое тело будем рассматривать как *сплошную среду*, заполняющую предоставленную часть пространства целиком.

*Элементарной составной частью геосистемы*, исходя из концепций материальной точки и абсолютно твердого тела, *предлагается считать пиксель цифровой модели рельефа*. Из пикселей осуществляется синтез геосистем соответствующего иерархического уровня. Такая дискретизация соответствует эмпирическим представлениям о дифференциации ландшафтов (геосистем), и является основой численного решения уравнений.

*Состояние элементарных пикселей и геосистем* может характеризовать набор независимых друг от друга величин. Смена состояний (процесс) позволяет рассматривать законы, которым подчиняется поведение геосистемы в пространстве состояний. Описание процессов требует введения фундаментального параметра – *времени*. Используем абсолютное время.

Инвариантность физических законов относительно перехода из одной геосистемы в другую обеспечивает принцип инерции Галилея.

*Состояние простых (механических) систем описывается* координатами систем и их частей, соотношением величин массы, длины и времени и их комбинаций (площадь, объем, плотность, скорость, поток, ускорение, сила, давление, энергия), численное значение которых можно получить с помощью определенных операций, называемых *измерениями*. Важнейшим независимым параметром диссипативных систем является температура. Рассчитываемые в ЦМР *геоморфометрические величины*, напрямую описывающие *градиенты полей* силы тяжести (высота, уклон, кривизна, удельная площадь сбора и др.) и инсоляции (доза прямой солнечной радиации, экспозиция и освещенность склонов), будем также считать *параметрами состояния элементарных пикселей и геосистем*. Выбор параметров состояния обусловлен простым видом, прямым описанием физических полей (например, уклон – абсолютная величина градиента геопотенциала; горизонтальная/плановая кривизна – дивергенция линий тока; доза прямой солнечной радиации – относительная величина поступающей энергии) и независимым входением в описание разных структурообразующих процессов.

*Цифровые данные дистанционного зондирования (ДДЗ) также являются параметрами состояния элементарных пикселей и геосистем – точнее ландшафтного покрова, если говорить о данных спутникового зондирования.*

*Пространственную дифференциацию геосистем (структуру) на основе параметров состояния пикселей ЦМР можно осуществить с помощью разных методов численной классификации (кластерный и дискриминантный анализ, нейронные цепи и др.).*

*Потоки (процессы переноса) возникают под действием градиентов потенциалов физических силовых полей, параметров и функций состояния системы. Важнейшими являются потенциалы гравитационного и электромагнитного (в том числе инсоляционного) полей Земли, взаимодействующие с полями давлений, температур, химических потенциалов и др. в различных компонентах ландшафтов и в целом в ландшафтном покрове.*

*Под функционированием геосистем, их текущей жизнедеятельностью подразумевается совокупность процессов переноса, обмена и трансформации энергии и вещества в них. При этом уравнениями математической физики описываются «сквозные» потоки субстанций, которые объединяют все компоненты в одно целое. Вертикальные процессы энерго-, влаго- и массопереноса являются системообразующими для элементарных геосистем со структурой геогоризонтов; по горизонтали геосистема захватывает территорию, на которой размещаются все ее компоненты, обеспечивающие целостность функционирования. Латеральные процессы водных и воздушных переносов осуществляют синтез геосистемы более высокого уровня. Входными и выходными являются потоки вещества и энергии через внешние границы. Важен учет механизмов обратной связи и сопряжение пространственно-временных характерных размеров.*

*Выведение моделей процессов и дифференциации (синтеза) геосистем отвечает принципам термодинамики необратимых процессов. Так, на основе билинейного уравнения Онзагера*

$$J = -L \text{grad} U = LX \rightarrow J_i = \sum_k L_{ik} X_k \quad (3)$$

они могут определяться: а) по системообразующим потокам  $J_i$ ; б) по градиентам потенциалов  $U$  силовых полей  $X_k$  (инсоляции, гравитации и др.); в) по феноменологическим коэффициентам  $L_{ik}$ , характеризующим обобщенную проводимость среды.

Если выделять геосистемы по градиентам поля силы тяжести (наиболее общего для любых геосистем), придем к выведению геосистем по потокам в поле геопотенциала. Рассматривая поведения элементарных объемов воды в поле геопотенциала,

получим иерархию геосистем водосборов (речных бассейнов), которая будет соответствовать формализованным схемам Хортонa, Стралера, Токунаги, Философова. При анализе сыпучих, трещиноватых или размываемых потоками воды массивов грунта в поле геопотенциала получим различные формы склонов (рельефа). Если рассматривать динамику растений и животных одновременно в поле геопотенциала и в других физических полях (радиационном, химическом, термодинамическом и т. д.), то получим распределение в пространстве биогеоценотических систем (экосистем). Такие подходы к выделению и исследованию геосистем на основе структурообразующих процессов называют функциональными. Выделение геосистем по принципу резкого изменения феноменологических коэффициентов  $L$  приводит к дифференциации природно-территориальных комплексов (ПТК) по принципу однородности – это классический типологический подход.

***Дифференциация поверхности рельефа методами численной классификации.*** Построение ЦМР – важнейший этап для моделирования геосистем. ЦМР на основе топокарт масштаба 1:10 000 с привязкой пикселя к съемке Landsat позволяют выделять ПТК ранга урочищ [Сысубев, 2003]. По регулярной сетке ЦМР рассчитываются морфометрические параметры (МП), систематизация которых в поле силы тяжести приведена в работе [Shary, 1995]. Закономерно выделение трех основных групп параметров: а) описывающих распределение инсоляции (*доза прямой солнечной радиации, экспозиция и освещенность склонов, уклон*); б) описывающих распределение воды под действием силы тяжести (*удельная площадь сбора и дисперсионная площадь, глубина В-депрессий и высота В-холмов, уклон*); в) описывающих механизмы перераспределения вещества под действием гравитации (*горизонтальная и вертикальная кривизна, уклон, высота*). Выделенные курсивом величины рассматриваются как параметры состояния материальных объектов от пикселей до геосистем.

Далее строится матрица данных, в которой строки соответствуют элементам поверхности рельефа (пикселям ЦМР), а столбцы – параметрам, описывающим состояние элемента (МП, значения яркостей каналов ДДЗ, индексы NDVI). Все параметры нормируются. Векторы-строки матрицы данных характеризуют множество элементов поверхности рельефа. Геометрически два таких вектора в пространстве параметров тем ближе, чем меньше различаются между собой значения параметров для обоих объектов. Мерой близости между векторами-объектами принято евклидово расстояние. Адекватными понятию дифференциации являются *методы*

разделительной численной классификации. Моделирование структуры ПТК проводится методом дихотомической группировки элементов поверхности рельефа по параметрам в программном обеспечении FractDim [Пузаченко, 2004].

**Типологическая модель структуры ландшафта.** Выбор параметров проводится в соответствии с классическими определениями [Дьяконов, 2008]. Результаты классификаций существенно зависят от числа параметров состояния и их весовых значений – для их обоснования предварительно проводится ряд численных экспериментов [Сысуев, 2003]. *Подчеркнем решающую роль ландшафтного анализа*, позволяющего выделить роль факторов дифференциации ПТК в конкретных физико-географических условиях. С другой стороны, варьирование значений и наборов параметров позволяет моделировать изменение структуры ландшафтов под влиянием климатических, неотектонических и других процессов.

*Агрегационные методы классификации* позволяют синтезировать ПТК по геофизическим параметрам (например, методом К-средних), для чего надо изначально задать число кластеров, т. е. единиц структуры ландшафта.

*Функциональный подход к моделированию структуры геосистем* низкого ранга определяется главным образом процессами водного стока. Задача классификации – отображение иерархии водосборных геосистем на морфометрических величинах, описывающих распределение воды рельефом в поле гравитации. Эта классификация позволяет выделять водосборные геосистемы различных порядков в соответствии со схемой Хортон – Стралера.

Формальный аппарат классификации поверхности рельефа на основе параметров состояния приобретает геофизический смысл. Полиструктурность ландшафта становится физически обоснованной: выбирая те или иные параметры и структурообразующие процессы можно реализовать разные классификации ландшафтов. Так реализации типологического подхода позволяют получать иерархию классических ПТК (фацция – урочище – местность – ландшафт); реализации подхода гидрологического функционирования ландшафта – иерархию водосборных геосистем; реализации подхода классификации параметров и нормализованных коэффициентов ДДЗ – структуру растительного покрова. Таким образом, обоснованы эмпирические представления о трех механизмах ландшафтной структуризации – геостационарном, геоциркуляционном и биоциркуляционном [Солнцев, 1981].

Создание *термодинамических моделей* является неотъемлемой частью познания любого природного процесса, венчающей представлением о его генезисе

[Kleidon, 2010]. Основой выведения моделей геосистемных процессов в многомерном поле сил должно служить билинейное уравнение (3). Примером может являться работа [Палагин, 1981], в которой на основе термодинамики необратимых процессов аккуратно выведена модель взаимосвязанного переноса тепла и влаги при замерзании-оттаивании почв. Разрабатывать и реализовывать такие модели непросто. Основы термодинамики и ряд термодинамических моделей в геосистемах рассмотрены в курсе «*Моделирование геосистем*».

Большинство моделей сложных систем строится по другому принципу – *расслоения по физическим процессам*. В силу своей общности уравнения математической физики стали широко применяться в таких системах, как гидродинамика – экосистема, гидрология – русло, гидрологический сток – морфология склона, почва – растение – атмосфера и т. д. [Сысуев, 2020]. Построение комплекса общих моделей процессов атмосферных переносов в ландшафте демонстрируется на примере работы [Леса..., 2017]. Авторы составляют и решают систему гидродинамических уравнений турбулентного переноса в приземном слое атмосферы, описывающих трехмерное поле ветра и турбулентного переноса  $\text{CO}_2$ , с граничными условиями на холмистой местности с неоднородной растительностью (масштаба «фацция – урочище – ландшафт»). Одновременно строятся трехмерные модели переноса солнечной радиации и процессов продуктивности в растительном покрове. При таком подходе модели частных процессов связываются по параметрам, источникам-стокам и граничным условиям.

Детерминированные модели, рассмотренные выше, реализованы на основе эйлерова подхода. Однако перспективен и *лагранжев подход*. Например, моделирование процессов снегонакопления и схода лавин на склоне использует метод «сглаженных частиц» – расчет процессов высокоскоростного соударения частиц с разлетом вещества [Соловьев, Калач, 2013]. Вязкоупругое взаимодействие элементов снежной массы позволяет учитывать расслоение снежной массы и проследить ее эволюцию. Траектория движения каждого из тысяч элементов снега рассчитывается в соответствии со вторым законом Ньютона. По-видимому, этот метод перспективен также и для описания эрозии склонов и речных русел. В настоящее время нет единой общепринятой теории эрозионных и русловых процессов для равнинных рек с несвязанным основанием, с наличием двух подвижных свободных границ [Петров, Потапов, 2019].

*Нелинейность природных процессов*, скачкообразный характер их динамики приводят к *фрактальной геометрии структур*, наиболее ис-

следованных в речных системах. Объединение эмпирических законов строения речной сети Хортон – Стралера – Токунаги, закона функционирования водосборов Хака (Hack's law) и стохастический вывод законов скейлинга бассейново-русловых систем [Dodds, Rothman, 2000] выявили возможность применения законов скейлинга только для определенных частей бассейнов крупных рек. Таким образом, можно говорить скорее о мультифрактальности геосистем, чем об универсальном законе скейлинга.

**Функционирование геосистем** определяется, главным образом, процессами влагооборота. Реальное движение воды описывается в терминах механики сплошной среды. Уравнения гидродинамики и теплопереноса (Навье – Стокса, Рейнольдса, Фурье и др.) приводятся к моделям природных процессов (уравнениям «мелкой воды», Сен-Венана, кинематической волны, переноса влаги и растворенных веществ в почвах и т. д.). Модели с распределенными параметрами миграции вещества обеспечивают соблюдение условий идентичности параметров и измеряемых в природе величин, использование априорной и эмпирической информации. Геофизическая дифференциация структуры геосистем и ЦМР является граничным условием, обеспечивающим однозначность и единственность решения уравнений переноса. Поэтому стали развиваться программные комплексы гидрологических процессов на водосборах с использованием ЦМР и полуэмпирических либо эмпирических моделей стока, например TOPMODEL, SIMWE, KWOFF и др. [Beven, 2012; Mitas, Mitasova, 1998; Tarboton, 2003; Johnson, Miller, 1997], которые дают возможность количественной оценки влияния водно-миграционных процессов на структуру почвенного покрова.

Для **описания эволюции ландшафтов** перспективно использование моделей динамики геоморфологических систем, рассматривающих взаимодействие между склоновыми и гидрологическими процессами, речной эрозией, тектоническим поднятием, климатом и литологией на ближних геологических временах. В работе [Coulthard, 2001] приведен анализ нескольких таких программных комплексов. Некоторые из них (например, CASCADE и GOLEM) лучше подходят для больших временных масштабов, тогда как другие (SIBERIA, CAESAR и CHILD) – для более коротких периодов. CHILD, CAESAR включают моделирование речных процессов, включая гранулометрию переносимых отложений и стратиграфию долин, тогда как SIBERIA, GOLEM лучше представляют процессы на склонах, включая выветривание горных пород и тектонические эффекты. Интенсивно развиваются методы теоретического описания русловых процессов формирования

речных систем и их морфометрических характеристик [Чалов, 2018; Петров, Потапов, 2019].

В большом курсе *«Биогеофизика и биогеохимия ландшафтов»* рассматриваются процессы трансформации «вещество – энергия», включая продукционные процессы в растительном покрове и процессы детрификации органического вещества, которые описываются на основе физических моделей переноса излучения, тепла, влаги и элементов питания в среде обитания и внутри растений и моделей фотосинтеза, дыхания и перераспределения ассимилятов, а также моделей популяционной динамики. Все модели связаны между собой по параметрам. Динамика пространственной и возрастной структуры леса описывается моделями на основе уравнения неразрывности, диффузии, а также имитационными моделями, учитывающими природную динамику многопородных древостоев и воздействие природопользования [Сысуев, 2020].

Для однозначности решения моделей необходимо задать граничные и начальные условия, которые соответствуют постановке задачи и отражают природные процессы. Граничными условиями на поверхности рельефа являются параметры состояния пикселей ЦМР и потоки через них, верхняя граница приземного слоя атмосферы и потоки через нее определяются в теории климата [Леса..., 2017]. Сложнее учесть нижние (гидрогеологические и внутрпочвенные), а тем более биогеофизические границы и потоки через них.

**Методы полевых и лабораторных исследований** важны не только для верификации результатов моделирования, но и для определения параметров физических процессов. Детальному анализу современных методов и аппаратуре для измерения геофизических параметров посвящен отдельный курс «Инструментальная база ландшафтных исследований». Пространственно-временная дискретность измерений должна быть согласована с шагом моделей и характерными масштабами геосистемных процессов. В этом плане возрастает роль геофизических методов измерения параметров приземных слоев атмосферы, структуры и продуктивности растительности, структуры и свойств почв и грунтов, подповерхностных границ ландшафтов и др. [Сысуев, 2014б].

Отождествлять измеряемые величины с физическими параметрами процессов не всегда тривиально – часто необходимы соотносящиеся определения. Например, абсолютная высота лишь приближенно характеризует гравитационный потенциал; перенос влаги происходит под действием градиента капиллярно-сорбционного потенциала влаги в почвах, а не измеряемой разности влажности почв; движущей силой переноса химических веществ являются градиенты химических потенциалов, а не концентраций и т. д.

Перечислены далеко не все условия успешного описания природных процессов при том, что вычислительные проблемы априори считаем решаемыми. Поэтому итогом моделирования часто остаются теоретические, математические и методические аспекты – анализ процессов формирования структур отсутствует.

**Практическое значение ландшафтно-геофизических исследований** всегда было представлено в различных разделах дисциплин. Например, еще в 1960-е гг. в таежной зоне Восточно-Европейской равнины был выявлен процесс заболачивания вырубок леса, в частности в Республике Коми, Вологодской и Архангельской областях. Этот же процесс был зафиксирован после пожаров. Темнохвойные спелые леса с сомкнутостью крон более 0,7 при высоте солнца более  $30^\circ$  из-за низких значений альbedo в 8–10% характеризуются повышенным значением радиационного баланса на 25–30% по сравнению с лугом. Второе важнейшее свойство леса – высокие транспирационные коэффициенты растений. В возрасте 40–80 лет в подзонах средней и южной тайги расход влаги на транспирацию равен 250–300 мм/год. Также важно, что над обширными по площади лесами годовое количество осадков больше на 5–10% за счет внутреннего влагооборота. Геофизический эффект сплошных вырубок заключается в снижении годового радиационного баланса в первые 5–10 лет не менее чем на 30%, транспирации – в два раза. Русловый сток, как правило, увеличивается примерно на 10%. При значении радиационного баланса 28–32 ккал/см<sup>2</sup>·год наблюдается дефицит энергии на испарение, что приводит в условиях плоских моренных равнин к возникновению очагов заболачивания, а затем его росту. Ежегодная консервация влаги равняется 20–40 мм/год. Другой пример на эту тему – изменение структуры теплового баланса при орошении или осушении земель.

Практическое значение трофической пирамиды и установленных величин потока энергии от продуцентов к гетеротрофам заключается в обосновании выделения лицензий на промысловую и спортивную охоту. Не нормированная выдача лицензий неизбежно приводит к потере устойчивости региональной экосистемы.

**Оптимизация процессов природопользования** подробно рассмотрена в курсе «Природно-антропогенные ландшафты». Описание ландшафта как динамической системы дает возможность постановки и решения задачи оптимального управления, которая включает систему дифференциальных уравнений, моделирующих функционирование

объекта, и критерий оптимальности (функционал), который следует минимизировать, выбирая управляющие переменные. Решением задачи является оптимальный процесс, т. е. соответствующая ему оптимальная траектория системы во времени. Некоторые типичные задачи оптимизации и оптимального управления лесопользованием рассмотрены в работах [Николаев и др., 2008; Сысуев, 2020].

## ВЫВОДЫ

Впервые в практике преподавания географии в университетах России разработан и читается цикл дисциплин «Основы геофизической парадигмы ландшафтоведения: введение в теорию геосистем», в котором объясняются возможности описания эмпирических концепций ландшафтоведения физическими законами.

Множественность подходов к описанию структуры и функционирования обусловлена сложностью геосистем. Необходимо подчеркнуть – эмпирические концепции физической географии, активное использование измерений геофизических величин, накопленный опыт работы в ГИС-среде и возрастающее количество программных комплексов позволяют использовать физические законы для описания структуры и функционирования ландшафтов.

Формулирование общегеофизических постулатов и анализ основных методов выведения моделей показали, что единый подход описания процессов и структуры геосистем реализуем на основе физического монизма и уравнений математической физики.

Ландшафтные структуры выделяются классификационными методами на морфометрических параметрах геофизических полей силы тяжести и инсоляции. Становится определенным понятие полиструктурности ландшафта: выбирая структурообразующие процессы и их содержательные параметры можно реализовать разные классификации ландшафтов. Моделирование процессов функционирования ландшафтов в терминах механики сплошной среды связано со структурой ландшафтов через граничные условия и распределенные геофизические параметры процессов переноса.

Вследствие недостаточности математического образования географов все уравнения и модели вводятся на физическом уровне строгости исходя из фундаментальных законов; подробно рассматриваются некоторые практические задачи от постановки и численных методов решения до экспериментов с измерением и верификацией параметров. Формулирование математических моделей проводится от объектов – геосистем и геосистемных процессов, а не от аппарата выведения (математики).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дьяконов К.Н. Геофизика ландшафта. Метод балансов. М.: МГУ, 1988. 95 с.
- Дьяконов К.Н. Базовые концепции и понятия ландшафтоведения // Географические научные школы Московского университета. М.: Городец, 2008. С. 348–381.
- Леса европейской территории России в условиях меняющегося климата / под ред. А.В. Ольчева. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2017. 276 с.
- Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Изд-во Института водных проблем РАН, 2018. 300 с.
- Николаев В.А., Копыл И.В., Сысубев В.В. Природно-антропогенные ландшафты. М.: Географический ф-т МГУ, 2008. 160 с.
- Палагин Э.Г. Математическое моделирование агрометеорологических условий перезимовки озимых культур. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 191 с.
- Пантаев М.Ю. Матанализ с человеческим лицом. М.: ЛЕНАНД/URSS, 2020. 358 с.
- Петров А.Г., Потапов И.И. Избранные разделы русловой динамики. М.: ЛЕНАНД/URSS, 2019. 244 с.
- Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: Академия, 2004. 416 с.
- Солнцев В.Н. Системная организация ландшафтов. М.: Мысль, 1981. 239 с.
- Соловьев А.С., Калач А.В. Современное состояние вопроса изучения снежных лавин. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2013. 137 с.
- Сысубев В.В. Физико-математические основы ландшафтоведения. М.: Географический ф-т МГУ, 2003. 245 с.
- Сысубев В.В. Экологическое нормирование и мониторинг. М.: Географический ф-т МГУ, 2014а. 176 с.
- Сысубев В.В. Георадарные исследования полимасштабных структур в ландшафтах на примере Смоленско-Московской возвышенности // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. № 4. 2014б. С. 26–33.
- Сысубев В.В. Введение в физико-математическую теорию геосистем. М.: ЛЕНАНД/URSS, 2020. 600 с.
- Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 1: Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. 2-е изд. М.: URSS, 2018. 608 с.
- Beven K.J. *Rainfall-runoff modelling: the primer*, 2nd ed., Chichester, Hoboken, Wiley-Blackwell, 2012, 457 p.
- Biza I., Giraldo V., Hochmuth R., Khakbaz A., Rasmussen C. *Research on Teaching and Learning Mathematics at the Tertiary Level*, Hamburg, Springer Nature, 2016, 32 p., DOI: 10.1007/978-3-319-41814-8.
- Cai J., Mok I.A.C., Reddy V., Stacey K. *International Comparative Studies in Mathematics*, Lessons for Improving Students' Learning, Hamburg, Springer Nature, 2016, 36 p., DOI: 10.1007/978-3-319-42414-9.
- Coulthard T.J. Landscape evolution models: a software review, *Hydrol. Processes.*, vol. 15, 2001, p. 165–173.
- Dodds P.S., Rothman D. H. Scaling, universality, and geomorphology, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 2000, vol. 28, p. 571–610.
- Geisler S., Rolka K. “That Wasn’t the Math I Wanted to do!” – Students beliefs during the transition from school to university mathematics, *International Journal of Science and Mathematics Education*, 2021, vol. 19, p. 599–618, DOI: 10.1007/s10763-020-10072-y.
- Johnson D.L., Miller A.C. A Spatially Distributed Hydrologic Model Utilizing Raster Data Structures, *Computers and Geosciences*, 1997, vol. 23(3), p. 267–272.
- Kleidon A. Life, hierarchy, and the thermodynamic machinery of planet Earth, *Physics of Life Reviews*, 2010, vol. 7(4), p. 424–460.
- Mitas L., Mitasova H. Distributed soil erosion simulation for effective erosion/deposition modeling and enhanced dynamic visualization, *Water Resources Res.*, 1998, vol. 34, p. 505–516.
- Shary P.A. Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures, *Mathematical Geology*, 1995, vol. 27(3), p. 373–390.
- Электронные ресурсы*
- Tarboton D.G. Rainfall-runoff processes. A workbook to accompany the Rainfall-Runoff Processes, Web module, 2003, URL: <http://www.engineering.usu.edu/dtarb/rrp.html> (дата обращения 17.11.2018).
- Программы дисциплин направления «География» (Магистратура). Географический факультет МГУ. URL: [http://geogr.msu.ru/student/programs/m\\_geography/index.php](http://geogr.msu.ru/student/programs/m_geography/index.php) (дата обращения 20.05.2020).
- Программы дисциплин направления «География» (Бакалавриат). Географический факультет МГУ. URL: [http://geogr.msu.ru/student/programs/bac\\_geography/index.php#1](http://geogr.msu.ru/student/programs/bac_geography/index.php#1) (дата обращения 20.05.2020).
- Учебные планы. Географический факультет МГУ. URL: [http://geogr.msu.ru/student/uch\\_plan/](http://geogr.msu.ru/student/uch_plan/) (дата обращения 20.05.2020).

Поступила в редакцию 27.02.2021

После доработки 05.05.2021

Принята к публикации 02.06.2021

## DEVELOPMENT OF NEW TRENDS IN THE DISCIPLINES OF LANDSCAPE GEOPHYSICS

K.N. Diakonov<sup>1</sup>, V.V. Sysuev<sup>2</sup>

<sup>1-2</sup> *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,  
Department of Physical Geography and Landscape Science*

<sup>1</sup> *Head of the Department, Professor, D.Sc. in Geography, Corresponding Member of the RAS;  
e-mail: diakonov.geofak@mail.ru*

<sup>2</sup> *Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: v.v.syss@mail.ru*

The formulation and development of the discipline “Geophysics of the landscape” were based on the system approach, physical monism, method of balances and the trophic pyramid model. The wide application of measuring procedures and GIS-technologies at the beginning of the 21<sup>st</sup> century led to the accumulation of a huge array of data on the state of landscapes. The idea of the necessity of creating a physical and mathematical basis for the synthesis of the structure and functioning of geosystems was established. Since the beginning of the century physical and mathematical training made a considerable progress at the department of physical geography and landscape studies as a result of the establishment of such disciplines as “Instrumental base of landscape studies”, “Methods of analysis of spatial data”, “Modeling of geosystems”, “Geoinformation technology of landscape studies”, “Biogeophysics and biogeochemistry of landscapes”, “Mathematical morphology of landscape”, “Physical and mathematical principles of landscape studies” and others. Specific features of material presentation with the account of the knowledge of mathematics in the volume taught to the physical geography stream are considered. The way of introducing basic equations and models at the physical level of rigor is justified. New disciplines are discussed in brief. The link of systems methodology with the physical and mathematical essence of the landscape organization model is shown by the example of landscape-hydrological geosystems according to Horton and Straler. Practical value of the development of the direction for optimization of nature management and forest management is shown.

**Keywords:** geophysics and biogeophysics of landscape, teaching methods, physical and mathematical modeling, geosystem theory, structure and functioning of landscapes

### REFERENCES

- Beven K.J. *Rainfall-runoff modelling: the primer*, 2nd ed., Chichester, Hoboken, Wiley-Blackwell, 2012, 457 p.
- Biza I., Giraldo V., Hochmuth R., Khakbaz A., Rasmussen C. *Research on Teaching and Learning Mathematics at the Tertiary Level*, Hamburg, Springer Nature, 2016, 32 p., DOI: 10.1007/978-3-319-41814-8.
- Cai J., Mok I.A.C., Reddy V., Stacey K. *International Comparative Studies in Mathematics. Lessons for Improving Students' Learning*, Hamburg, Springer Nature, 2016, 36 p., DOI: 10.1007/978-3-319-41814-9.
- Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika, T. 1, Ruslovy'e processy': faktory, mehanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnyh rusel* [Channel science: theory, geography, practice, vol. 1, Channel processes: factors, mechanisms, forms of expression and conditions of river channel formation], izd. 2, Moscow, URSS Publ., 2018, 608 p. (In Russian)
- Coulthard T.J. Landscape evolution models: a software review, *Hydrol. Processes*, 2001, vol. 15, p. 165–173.
- Dodds P.S., Rothman D.H. Scaling, universality, and geomorphology, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 2000, vol. 28, p. 571–610.
- D'yakonov K.N. [Basic concepts of landscape science], *Geograficheskie nauchnye shkoly Moskovskogo universiteta* [Geographical scientific schools in the Moscow University], Moscow, Gorodets Publ., 2008, p. 348–381. (In Russian)
- D'yakonov K.N. *Geofizika landshafta. Metod balansov* [Geophysics of the landscape. Balance method], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1988, 95 p. (In Russian)
- Geisler S., Rolka K. “That Wasn't the Math I Wanted to do!” – Students beliefs during the transition from school to university mathematics, *International Journal of Science and Mathematics Education*, 2021, vol. 19, p. 599–618.
- Johnson D.L., Miller A.C. A Spatially Distributed Hydrologic Model Utilizing Raster Data Structures, *Computers and Geosciences*, 1997, vol. 23(3), p. 267–272.
- Kleidon A. Life, hierarchy, and the thermodynamic machinery of planet Earth, *Physics of Life Reviews*, 2010, vol. 7(4), p. 424–460.
- Lesy Evropeiskoi territorii Rossii v usloviyakh menyayushchegosya klimata* [Forests of the European territory of Russia under changing climate], A.V. Ol'chev (ed.), Moscow, KMK Publ., 2017, 276 p. (In Russian)
- Mitas L., Mitasova H. Distributed soil erosion simulation for effective erosion/deposition modeling and enhanced dynamic visualization, *Water Resources Res.*, 1998, vol. 34, p. 505–516.
- Motovilov Yu.G., Gel'fan A.N. *Modeli formirovaniya stoka v zadachax gidrologii rechnyh bassejnov* [Flow formation models in the hydrology of river basins], Moscow, Institute of Water Problem Publ., 2018, 300 p. (In Russian)
- Nikolaev V.A., Kopyl I.V., Sysuev V.V. *Prirodno-antropogennye landshafty* [Natural and anthropogenic landscapes], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2008, 160 p. (In Russian)
- Palagin Eh.G. *Matematicheskoe modelirovanie agrometeorologicheskikh uslovii perezimovki ozimnykh kul'tur* [Math-

- emational modeling of agrometeorological conditions for wintering of winter crops], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1981, 191 p.
- Pantaev M.Yu. *Matanaliz s chelovecheskim litsom* [Mathematical analysis with a human face], Moscow, LENAND/URSS Publ., 2020, 358 p. (In Russian)
- Petrov A.G., Potapov I.I. *Izbrannye razdely' ruslovoj dinamiki* [Selected Chapters of Channel Dynamics], Moscow, LENAND/URSS Publ., 2019, 244 p. (In Russian)
- Puzachenko Yu.G., Onufrenya I.A., Aleshchenko G.M. Kolichestvennyye metody klassifikatsii form rel'efa [Quantitative methods for the classification of landforms], *Izvestiya RAN, Seriya geogr.*, 2002, no. 6, p. 17–25. (In Russian)
- Shary P.A. Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures, *Mathematical Geology*, 1995, vol. 27(3), p. 373–390.
- Solntsev V.N. *Sistemnaya organizaciya landshaftov* [System organization of landscapes], Moscow, Mysl' Publ., 1981, 239 p. (In Russian)
- Solov'ev A.S., Kalach A.V. *Sovremennoe sostoyanie voprosa izucheniya snezhnykh lavin* [State-of-the-art in studying snow avalanches], Voronezh, Voronezh St. Univ. Publ., 2013, 137 p. (In Russian)
- Sysuev V.V. *Ekologicheskoe normirovanie i monitoring* [Ecological normalization and monitoring], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2014a, 176 p. (In Russian)
- Sysuev V.V. *Fiziko-matematicheskie osnovy landshaftovedeniya* [Physical-mathematical foundations of landscape science], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2003, 245 p. (In Russian)
- Sysuev V.V. Georadarnye issledovaniya polimasshtabnykh struktur v landshaftakh na primere Smolensko-Moskovskoj vozvyshehnosti [Geo-radar investigation of the poly-scale structures in landscapes (case study of the Smolensk-Moscow Highland)], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2014b, no. 4, p. 26–33. (In Russian)
- Sysuev V.V. *Vvedenie v fiziko-matematicheskuyu teoriyu geosystem* [Introduction to the theory of geosystems], Moscow, LENAND/URSS Publ., 2019, 600 p. (In Russian)
- Web sources*
- Educational plans. Faculty of Geography, Moscow State University, URL: [http://geogr.msu.ru/student/uch\\_plan/](http://geogr.msu.ru/student/uch_plan/) (access date 05.20.2020).
- Programs of disciplines of the direction “Geography” (Bachelor). Faculty of Geography, Moscow State University, URL: [http://geogr.msu.ru/student/programs/bac\\_geography/index.php#1](http://geogr.msu.ru/student/programs/bac_geography/index.php#1) (access date 05.20.2020).
- Programs of disciplines of the direction “Geography” (Master’s degree). Faculty of Geography, Moscow State University, URL: [http://geogr.msu.ru/student/programs/m\\_geography/index.php](http://geogr.msu.ru/student/programs/m_geography/index.php) (access date 05.20.2020).
- Tarboton D.G. Rainfall-runoff processes. A workbook to accompany the Rainfall-Runoff Processes Web module, 2003, URL: <http://www.engineering.usu.edu/dtarb/rfp.html> (access date 17.11.2018).

Received 27.02.2021

Revised 05.05.2021

Accepted 02.06.2021