

## ДИСКУССИИ

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-6071151461-83>ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ПАРАДИГМА ЛАНДШАФТОВЕДЕНИЯ:  
ПОСТУЛАТЫ И КОНЦЕПЦИИ

© В. В. СЫСУЕВ

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

E-mail: v.v.syss@mail.ru

Перспективы развития современного ландшафтоведения связаны с синтезом физико-математического, геофизического и эмпирических направлений на базе ГИС-технологий. Этот этап характеризуется как геофизическая парадигма ландшафтоведения, особенностью которой является новое осмысление фундаментальных физических основ, необходимость рассмотрения ландшафтов с точки зрения динамических систем.

Эмпирические обобщения ландшафтоведения и физической географии позволяют использовать концепции и аппарат уравнений математической физики. Ландшафтные структуры описываются с помощью независимых морфометрических параметров силовых геофизических полей (силы тяжести и инсоляции), которые могут рассматриваться как параметры состояния геосистем. Моделирование процессов функционирования ландшафтов в терминах механики сплошной среды тесно связано со структурой ландшафтов через граничные условия и распределенные параметры процессов переноса. Верификация и развитие моделей требует применения комплекса геофизических методов исследования. Создание моделей в соответствии с принципами термодинамики необратимых процессов венчает представления о генезисе природных процессов. Дуализм и сильная нелинейность обуславливает необходимость стохастического анализа геосистем, в том числе методами фрактальной геометрии.

Ключевые слова: физико-математическое моделирование, геофизика ландшафта, парадигмы ландшафтоведения, теория геосистем.

**Введение.** В философии науки *парадигма* — один из основополагающих концептов, ориентирующий ученых на новый специфический подход к исследованию объекта данной науки [14]. В понятие парадигмы входят не только научные теории, но и методы сбора фактов, их классификации, решения частных и общих научных задач, т. е. вся методология данного подхода. Разработка и переход к новой парадигме позволяют получить более глубокие и содержательные ответы на «старые» или «вечные» вопросы. Новая парадигма очерчивает область применимости предшествующих теорий в соответствии с *принципом соответствия*. Этот принцип предполагает, что новая теория должна выводить старую, как свой предельный случай. По образному выражению Г. Г. Малинецкого [17, с. 322], можно «измерять „реальный возраст“ науки, сопоставляя его с числом тех парадигм, которые определяли ее развитие».

Анализируя концептуальное разнообразие географии в прошлом веке, В. Н. Солнцев выделил четыре парадигмы ландшафтных исследований: гео-

компонентную, геокомплексную, экологическую и геоструктурную [31]. Такая классификация имела скорее характер констатации направлений, чем методологии развития, и не повлияла заметно на состояние ландшафтоведения в последующий период. Широкое использование в последние десятилетия измерительных процедур и ГИС-технологий привело к накоплению огромного массива данных о состоянии земной поверхности, что неизбежно вызывает применение физических теорий и математического аппарата для их обработки, и построения моделей изучаемых явлений. Поэтому «...реальным становится введение новой информационно-организующей парадигмы» [25]. Причем потенциал развития классических направлений географии связывается с опорой именно на физико-математическое направление, обеспечивающее достоверность результатов и вписывание физической географии в единую науку о природе — физику [7].

К концу XX в. в науке утвердилось представление о необходимости развития геофизического и связанного с ним физико-математического направления исследования структуры и функционирования ландшафтов и его компонентов; это направление приобрело большое число сторонников. Настоящая работа основана на идеях, прежде всего, отечественных ученых, развивавших направления геофизики ландшафта, биогеофизики, методы математического моделирования природных процессов, ландшафтов, экосистем, и связанных с ними проблем природопользования (Д. Л. Арманд, Н. Л. Беручашвили, М. И. Будыко, А. С. Викторов, К. Н. Дьяконов, К. Е. Иванов, И. Л. Калюжный, И. К. Карпов, Л. С. Кучмент, А. Н. Ласточкин, Н. И. Маккавеев, Н. Н. Моисеев, А. И. Москаленко, В. М. Московкин, А. А. Павлов, Э. Г. Палагин, В. В. Пененко, Ю. Г. Пузаченко, А. Ю. Ретеюм, Ю. К. Росс, Ю. М. Свиричев, О. Д. Сиротенко, В. В. Сысуев, А. М. Трофимов, Г. Ф. Хильми, П. М. Хомяков, А. К. Черкашин, А. Ф. Чудновский, П. А. Шарый, Е. В. Шеин Е. В и др.). Во главе списка стоит Давид Львович Арманд, слова которого: «В конечном счете, все физико-географические процессы имеют в основе физические явления. Сведение географических закономерностей к геофизическим, а по мере возможности и к физическим законам представляется крайне желательным. Только физический анализ убеждает, что явление понято» [2] — могут служить эпиграфом к направлению и статье. Можно также выделить методологически близкие работы Ю. Г. Пузаченко [26, 27 и др.] и А. К. Черкашина [44, 45 и др.]. Приведенный список ученых достаточно субъективен и может быть существенно расширен, особенно при включении большого сообщества зарубежных исследователей. Таким образом, можно говорить о возникновении геофизической парадигмы ландшафтоведения.

Работа посвящена введению некоторых основных положений геофизической парадигмы ландшафтоведения и, подчеркнем, не является обзором, который невозможен в рамках статьи.

**1. Общефизические постулаты теории геосистем.** Особенности развития парадигмы является новое осмысление *фундаментальных физических основ* физической географии и ландшафтоведения. Соотнесение современных физических и термодинамических постулатов с анализом геосистем оказывается далеко не тривиальным. Стала очевидна необходимость рассмотрения ландшафтов с точки зрения динамических систем с привлечением соответствующего математического аппарата моделирования. Поскольку адекватное моделирование геосистемных процессов принципиально невозможно без одновременного рассмотрения их в пространстве и во времени, прежде всего

имеется в виду использование уравнений математической физики. Подчеркнем: построение физико-математической модели является основным способом построения теории и должно отвечать целям и задачам строящейся теории, а результаты моделирования должны соотноситься с экспериментами и иметь вид, адекватный исходному объекту. Для моделирования можно использовать стандартные уравнения математической физики — однако такой подход позволяет только в самых общих чертах описать структурообразующие процессы и геосистемы. Для адекватного описания необходимы более детальные модели, разработка которых невозможна без участия специалистов, в том числе физико-географов и ландшафтоведов.

Любая теория предполагает наличие аксиом, постулатов, некоторой длины логических построений и аппарата выведения. Таким образом постановка задач моделирования геосистем и процессов их функционирования требует введения общефизических постулатов и аксиом. В одних случаях постулаты можно сформулировать аналогично принятым в классической физике, в других — в виде соотносящихся определений. Ряд постулатов для геосистем отсутствует и необходимо будет сформулировать их в будущем. Несмотря на это, сжато приведем некоторые основные положения.

1.1. *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.

1.2. Геосистемы состоят из макроскопических тел, которые состоят из очень большого числа отдельных частиц, в любом существенном для геосистем объеме. Поэтому каждое тело будем рассматривать как *сплошную среду*, заполняющую предоставленную часть пространства сплошным образом. Такая идеализация позволяет использовать аппарат дифференциального и интегрального исчисления.

1.3. Исходя из концепций материальной точки и абсолютно твердого тела классической механики, *элементарной составной частью геосистемы*, которая в рассматриваемом круге явлений не разрушается и не деформируется существенным образом, предлагается считать *пиксель цифровой модели рельефа*. Из пикселей тем или иным формальным способом осуществляется синтез геосистем соответствующего иерархического уровня. Такая дискретизация соответствует как общему подходу построения любой феноменологической макроскопической физической теории, так и эмпирическим представлениям о дифференциации ландшафтов (геосистем), и, кроме того, является основой численного решения дифференциальных уравнений.

1.4. Набор независимых друг от друга величин может характеризовать *состояние элементарных пикселей и геосистем*. Смена состояний — есть процесс и позволяет рассматривать *законы*, которым подчиняется поведение геосистемы в пространстве состояний. Описание процессов требует введения фундаментального параметра — *времени*. Будем использовать абсолютное время.

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

1.6. *Состояния* простых (механических) *систем* описываются: координатами систем и их частей, соотношением величин массы, длины и времени и их

комбинаций (таких как площадь [длина · длина], объем [длина · длина · длина], плотность [масса/объем], скорость [длина/время], поток [плотность · скорость], ускорение [длина/время/время], сила [масса · длина/время/время], давление [сила/площадь], энергия [масса · длина/время/время]), численные значения которых можно получить с помощью определенных стандартизируемых операций, называемых *измерениями*. Важнейшим независимым параметром диссипативных систем является температура.

1.7. *Геоморфометрические величины ЦМР*, напрямую описывающие *градиенты полей силы тяжести* (высота, уклон, горизонтальная, вертикальная и средняя кривизна, удельная площадь сбора и удельная дисперсивная площадь; глубина В-депрессий и высота В-холмов) и инсоляции (доза прямой солнечной радиации; экспозиция и освещенность склонов) — будем считать *параметрами состояния элементарных пикселей и геосистем*. Выбор параметров обусловлен их простым (не составным) видом, прямым описанием физических полей (например, уклон — абсолютная величина градиента геопотенциала; горизонтальная/плановая кривизна — дивергенция линий тока; вертикальная (или профильная) кривизна — производная фактора крутизны по длине линии тока; доза прямой солнечной радиации — относительная величина поступающей энергии и т. д.), независимым вхождением в описание разных процессов и т. д.

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

1.8. Пространственную дифференциацию (классификацию) геосистем на основе параметров состояния пикселей ЦМР можно осуществить с помощью разного математического аппарата (кластерный и дискриминантный анализ, нейронные цепи, и т. п.); известны многочисленные применения различных математических методов. Однако необходимо четко понимать смысл таких классификаций.

1.9. *Потоки* (процессы переноса, скорости в широком смысле) возникают под действием *градиентов потенциалов физических силовых полей, параметров и функций состояния системы* (массы, температуры, плотности, концентрации, и т. д.). Важнейшими являются потенциалы гравитационного, магнитного и электромагнитных (в том числе инсоляционного) полей Земли, взаимодействующие с полями давлений, температур и химических потенциалов и др. в различных компонентах ландшафтов, и в целом в ландшафтном покрове.

1.10. Модели процессов и их взаимодействия, а также модели выделения (синтеза) геосистем отвечают принципам термодинамики необратимых процессов. Так, на основе билинейного уравнения Онзагера:

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

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, и пропорциональным коэффициентам теплопроводности, диффузии, вязкости и др.

1.11. Под *функционированием геосистем* подразумевается совокупность процессов переноса, обмена и трансформации энергии и вещества в них. При-

нимается общепринятая концептуальная модель природной геосистемы [9, 21]. При этом, уравнениями математической физики описываются именно «сквозные» потоки субстанций, которые играют интегрирующую, системообразующую роль, объединяя все компоненты в одно целое. Вертикальные процессы энерго-, влаго-, массопереноса являются системообразующими для элементарных геосистем, для них характерно наличие вертикальной структуры геогоризонтов; по горизонтали элементарная 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. При моделировании структурообразующих процессов важен учет механизмов обратной связи и сопряжение пространственно-временных характерных размеров.

1.12. Необходимое отождествление измеряемых в поле и в лабораториях величин с физическими параметрами процессов далеко не всегда тривиально — часто необходимы соотносящиеся определения. Простые примеры: абсолютная высота лишь приближенно характеризует гравитационный потенциал; перенос влаги происходит под действием градиента всасывающего матричного потенциала, а не измеряемой разности влажности почв; движущей силой переноса химических веществ являются градиенты химических потенциалов, а не концентраций, и т. д.

## **2. Обсуждение основных методов вывода в теории геосистем.**

2.1. Если выделять геосистемы по градиентам поля силы тяжести (наиболее общего для любых геосистем), то придем к выведению геосистем по потокам в поле геопотенциала. Рассматривая поведение элементарных объемов воды в поле геопотенциала, получим иерархию геосистем водосборов (речных бассейнов), которая будет соответствовать формализованным схемам Хортона, 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 других физических полях (радиационных, химических, термодинамических и т. д.), то получим распределение в пространстве биогеоценотических систем (экосистем). Такие подходы к выделению и исследованию геосистем на основе структурообразующих процессов их формирующих называются функциональными. Выделение геосистем по принципу резкого изменения феноменологических коэффициентов  $L$  приводит к классификации природно-территориальных комплексов (ПТК) по принципу однородности — это классический типологический подход.

2.2. Простейшие случаи *выведения структуры геосистем* с использованием стандартных уравнений математической физики получены при описании развития склонов в геоморфологии [41, 46]. Начиная с работы П. К. Соболевского [30] в геоморфологии утвердилось представление о рельефе как о скалярном поле высот  $z(x, y)$ . Такое представление ничего не сообщает о физической сущности развития рельефа, а является лишь формой отображения взаимодействия рельефа с рельефообразующими процессами. Однако в процессе эрозии-аккумуляции происходит именно перенос массы в потенциальном поле силы тяжести, поэтому «...говорить о поле рельефа (высот) как о потенциальном поле не совсем правильно» [41, с. 10]. Модели геопотенциала с учетом кривизны земной поверхности были построены в работах [29, 47].

2.3. Создание *термодинамических моделей* является неотъемлемой частью познания любого природного процесса, венчающей представлением о его генезисе [54]. Реальная динамика геосистем реализуется в многомерном поле сил — это в явном виде описывает билинейное уравнение Онзагера, которое и должно служить основой выведения моделей сложных процессов в геосистемах. Тем не менее известно ограниченное число моделей, построенных таким образом. Примером может являться работа [23], в которой аккуратно на основе термодинамики необратимых процессов выведена *модель* взаимосвязанного переноса тепла и влаги при замерзании-оттаивании почв. Разрабатывать и реализовывать такие модели не просто. Покажем это на примере описания ландшафтно-геохимических систем. Первоначально необходимо выписать уравнения производства энтропии, билинейное уравнение и соотношения взаимности Онзагера, уравнения баланса, сохранения и др. для всех процессов. Уже эти шаги далеко не простые: требуется анализ процессов на предмет выполнения принципа симметрии (скалярная причина не может вызвать векторный или тензорный эффект); необходимо получить теоретический вид коэффициентов перекрестных процессов да еще и их экспериментальные значения. Только тогда возможно корректное введение понятия поля геохимических потенциалов [40].

Природные процессы осуществляются так, что при общем необратимом течении процесса в каждом данном элементарном участке в каждый момент устанавливается состояние равновесия. Это возможно, если скорость преобразований в системе, скорость ее приспособления, или скорость релаксации, оказывается больше, чем скорость изменения факторов состояния системы. В соответствии с этим *принципом частичного равновесия*, например, при физико-химическом моделировании почв требуется учет лишь тех компонентов, которые могут подчиняться принципам устойчивого, частичного или временного равновесия с почвенным раствором. К таким компонентам относятся новообразованные продукты почвообразования и вторичные минералы — высокодисперсные глинистые минералы, гумусовые вещества, аморфные и окристаллизованные оксиды и гидроксиды железа и т. д. Переход к расчетам равновесий от метода по реакциям к методу минимизации термодинамических потенциалов имеет большое значение для развития физико-химического анализа многокомпонентных и многофазных природных систем, таких как почвы [49], а возможно и ландшафты в целом. Имеющиеся успехи термодинамического моделирования речной сети [57], почвенной влаги [48], физической химии почвенных растворов и минералообразования в почвах [49] позволяют надеяться на перспективность этого направления.

Наиболее сложным является построение *термодинамических моделей систем, удаленных от положения механического, теплового и химического равновесий*. Отклонения состояния таких систем от положения термодинамического равновесия приводят: к возникновению протяженно- и длительно-корреляционных взаимодействий между отдельными частями системы; разрушению свойств эргодичности, аддитивности и локальной равновесности; сокращению производства энтропии; фрактализации внутреннего строения и протекающих процессов; поиску системой нового устойчивого энерго-вероятностного состояния; перебору возможных конфигураций структуры и агрегатных состояний [20]. Для класса неравновесных стационарных (или близких к ним) состояний систем с медленной динамикой предложено обобщение статистики Больцмана—Гиббса, получившее название статистики Тсаллиса (Tsallis) или

T-статистики. Этот формализм рассматривается как попытка суперпозиции двух различных статистик, относящихся к неравновесным системам под действием медленно меняющихся или постоянных внешних сил и обнаруживающих макроскопические состояния, близкие к стационарным или с медленной динамикой, но сопровождающиеся флуктуациями интенсивных (распределенных) параметров. Однако модели доведены до расчетов только для некоторых конкретных ограниченных случаев [20, 28].

2.4. Большинство современных моделей сложных систем строятся по другим принципам — *принципам расслоения по физическим процессам*. Такой физический подход важен в плане включения частных процессов и систем в более общие геосистемы. В силу своей общности уравнения математической физики стали широко применяться в сложных системах: таких, например, как гидродинамика—экосистема, гидрологические процессы—русло, водный сток—эрозия—морфология склона [41 и др.], почва—растение—атмосфера и т. д. Построение комплекса подобных моделей для описания процессов атмосферных переносов в масштабах ландшафта можно видеть на примере работ коллектива ученых физического и географического факультетов МГУ [16]. 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 (в масштабе ландшафтного покрова «фация—урочище—ландшафт»). Одновременно строятся трехмерные модели переноса солнечной радиации в неоднородном растительном покрове и процессов продуктивности лесного полога [19, 22]. Численные значения энергетических характеристик ветровых напряжений, концентрации  $\text{CO}_2$ , и значений ФАР несомненно имеют содержательное значение для построения пространственной структуры растительного покрова. При таких подходах все модели частных процессов связываются по параметрам, источникам-стокам, масштабам и граничным условиям. Учет и формализация в модели всех процессов невозможен в силу объективных причин (их большого числа, подсеточного масштаба, высокой частоты и т. д.); тогда прибегают к различным гипотезам, допущениям, параметризациям и т. д.

Для однозначности решения моделей необходимо задать граничные и начальные условия, которые соответствуют постановке задачи (существует 4 рода граничных условий), а с другой стороны — правильно отражают природные процессы. Например, граничными условиями на поверхности рельефа могут являться параметры состояния пикселей ЦМР и потоки через них; верхняя граница приземного слоя атмосферы и потоки через нее определяются в теории климата [16]. Сложнее учесть нижние (гидрогеологические и внутрипочвенные), а тем более биогеофизические границы и потоки через них. Не просто получить распределенные параметры для проведения численных экспериментов, верифицировать модель по независимым полевым данным.

Особая роль методов полевых и лабораторных исследований важна не только для верификации результатов моделирования, но и для определения параметров физических процессов. Как правило, эти параметры необходимы в виде функции пространства и времени, поэтому дискретность измерений должна быть согласована с шагом моделей и характерными масштабами геосистемных процессов [37]. В этом плане возрастает роль комплекса геофизических методов измерения параметров приземных слоев атмосферы, структуры

и продуктивности растительности, структуры и свойств почв и грунтов, гидрологических процессов и др.

Перечислены далеко не все условия успешного описания природных процессов, при том что вычислительные проблемы априори мы считаем решаемыми. Поэтому итогом моделирования часто остается теоретическая значимость, но математические и методические аспекты — анализ процессов формирования структур — практически отсутствуют.

2.5. Возможности описания механизмов формирования структуры почвенного покрова и ландшафтов предоставляет грамотное использование хорошо известных и доступных программных комплексов, таких как SAGA, GRASS, HYDRUS и др. Например, сравнение результатов численного моделирования процессов поверхностного стока в трех программных комплексах (в модуле TOPMODEL [50] в среде ГИС SAGA, в SIMWE [55] реализованного в виде модуля в среде GRASS, в модели кинематической волны KWOF [53]) показало возможность количественной оценки влияния водно-миграционных процессов на структуру почвенного покрова. На основе данных детальной ЦМР о структуре микрорельефа и диагностических признаков степени переувлажнения почв лесостепи [11] выявлены пределы величины натежного увлажнения, которые дифференцируют морфологические свойства почв на уровне типа—под-типа (Е. А. Омерда, данные не опубликованы).

2.6. В этом направлении наиболее перспективны модели *эволюции ландшафтов*, рассматривающие *динамические геоморфологические системы* и моделирующие в ближних геологических временах динамику структуры ландшафтов при взаимодействии между гидрологическими процессами, речной эрозией, склоновыми процессами, тектоническим поднятием, климатом и литологией. В работе [51] приведен краткий анализ таких программных комплексов; в настоящее время их насчитываются десятки. Модели построены на подобных концепциях, но имеют разные способы моделирования эволюции ландшафтов, и могут применяться в широком диапазоне временных и пространственных масштабов. Некоторые из них (например, CASCADE и GOLEM) лучше подходят для больших временных масштабов, тогда как другие (SIBERIA, CAESAR и CHILD) лучше применимы для более коротких периодов. Представление процессов также не однородное: программные комплексы CHILD, CAESAR включают моделирование речных процессов, включая гранулометрию переносимых отложений и стратиграфию долин. Более того, CAESAR также моделирует топографию каналов с разветвлением потоков, а CHILD включает модель меандрирования русел рек. И наоборот, SIBERIA и GOLEM содержат лучшие представления процессов на склонах, включая выветривание горных пород и тектонические эффекты. Различия в масштабах и детализации процессов определяют лучшую область применения конкретных моделей для имитации процессов. Например, CAESAR был разработан для водосборов умеренных широт. Для имитации процессов на сложных водосборах, с устойчивыми меандрами, комплексы CASCADE и CHILD с их нерегулярной сеткой могут оказаться более подходящими. В этой подсистеме должна осуществляться связь с общей теорией геодинамики, а также с нелинейной геомеханикой, включающей физические основы устойчивости пород и грунтов в различных природно-климатических условиях.

Верификацию моделей эволюции ландшафта проводят методом палеогеографической реконструкции, включающей комплекс литологического, палеопедологического, палеогеоморфологического, палинологического, диатомово-



го, радиоизотопного и других видов анализа на основе методов абсолютного датирования отложений.

2.7. Еще один оригинальный подход к пространственно-временной интеграции процессов — попытка моделирования динамики природно-территориальных комплексов регионального уровня «сверху» [24, 42]. В этих работах на основе обобщения и формализации эмпирических закономерностей, накопленных в географии, почвоведении, экологии, многочисленные параметры и факторы специальным образом сворачиваются до немногочисленных эмпирических интегральных показателей и функций.

Более обоснованным является *синергетический подход*, при котором строятся простейшие модели процесса на ключевых величинах, которые с течением времени начинают определять изменение остальных характеристик системы. Такие модели позволяют получить аналитический вид решений и исследовать их поведение в разных областях параметрического пространства. Синергетический подход принципиально отличается от традиционного имитационного моделирования. В имитационные модели стараются включить все, что известно о природных процессах: наряду с физическими законами с рядом предположений и упрощений, дополнительно еще и эмпирические зависимости. В этом случае не всегда понятно, что делать с проблемой возможности расчленения сложной системы (как водосбор или геосистема в целом) на совокупность простых подсистем без потери эмерджентных свойств целого. Сущность синергетического подхода как раз и состоит «в описании макроскопических эмерджентных свойств систем, т. е. таких свойств, которые не выводимы из уровня ее элементов, являясь результатом их кооперативного взаимодействия» [10]. В соответствии с этим при исследовании сложной системы необходимо выявить ключевые величины — *параметры порядка*, которые с течением времени начинают определять изменение остальных характеристик системы. Таким образом строится целостная модель, в которой раздельно учитываются регулярные крупномасштабные и случайные мелкомасштабные процессы. Результаты, полученные, например, для гидрологических систем [6], вселяют надежду на прогресс в этом направлении.

Выделение *полимасштабных структур* и границ между ними — одна из центральных проблем в ландшафтоведении. Однако задача формализации иерархии геосистем и их эмерджентных свойств не тривиальна и не решена в большинстве случаев. Предпринимаемые попытки описания полимасштабной организации географического ландшафта на основе статистического анализа покомпонентных связей не выявили четких алгоритмов описания иерархической структуры ландшафтов и свойств эмерджентности [12, 43].

2.8. Все рассмотренные выше детерминированные модели реализованы на основе эйлерова подхода. Необходимо отметить возможности реализации также лагранжева подхода к моделированию природных процессов — в настоящее время это наиболее перспективный подход для моделирования процессов снегонакопления и схода лавин на склонах [33]. Модель снежной лавины использует метод сглаженных частиц (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) — бессеточный лагранжев численный метод для расчетов процессов высокоскоростного соударения частиц, когда имеет место существенное изменение топологии моделируемых объектов (разлет вещества). Весь объем снежной массы разбивается на отдельные элементы, которые могут быть либо связанными друг с другом определенными силами, либо двигаться независимо друг от друга в зависимости от предыстории. Взаимодействие элемен-

тов снежной массы между собой принято считать вязкоупругим. Если элементы снежной массы прочно связаны друг с другом при определенных погодных условиях (мокрый снег, обледенение), то такие элементы будут связанными элементами. Вязкоупругое взаимодействие элементов снежной массы позволяет учитывать в модели способность к расслоению снежной массы. В модели прослеживается эволюция снежной массы, для чего рассчитывается траектория движения каждого из тысяч элементов снега. Для этого необходимо решить систему уравнений движения отдельных элементов, каждое из которых записывают в соответствии со вторым законом Ньютона. Осаждающаяся на склон масса снега представляется совокупностью большого числа отдельных круглых элементов [33]. По-видимому, этот метод весьма перспективен и для описания эрозии склонов и речных русел.

2.9. В связи с дуализмом, присущим природным процессам (с одной стороны их динамика хаотична, а с другой — подчиняется детерминированно сформулированным физическим законам), необходим их стохастический анализ. Наряду с различными статистическими методами представляется перспективным применение теории броуновского движения. Этот подход дает возможность единого анализа детерминированных и стохастических характеристик природных процессов на основе определения параметров моделей случайных процессов, исходя из «первых принципов» — детерминированных законов (законов сохранения массы, энергии и импульса, и т. п.). Возможность разделения флуктуаций динамики систем на «быстрые» и «медленные», когда воздействие быстрых переменных на медленные трактуется как воздействие «белого шума» (случайного процесса с исчезающе малым временем корреляции), позволяет применять к расчету статистических характеристик исследуемых переменных аппарат стохастических дифференциальных уравнений [5].

Броуновское блуждание описывается классическим стохастическим дифференциальным уравнением Ланжевена. Последовательное «огрубление» микроскопических уравнений, описывающих баллистическое осаждение частиц на двумерной плоскости, приводит в непрерывном пределе к уравнению Кардара—Паризи—Занга (KPZ). На основе стохастического уравнения KPZ с различными допущениями неоднократно предпринимались попытки моделировать разнообразные растущие или размывающиеся поверхности рельефа [52, 56]. Теоретические возможности описания скейлинга в неравновесной системе эрозии ландшафта под влиянием турбулентного перемешивания на подвижной граничной поверхности методами квантовой ренормгруппы исследуются в работе [1].

2.10. Множественность подходов к описанию структуры и функционирования обусловлена реальной сложностью геосистем, а с другой стороны — множественностью аппаратов выведения, которыми являются строго дедуктивизированные направления математики. Создание замкнутой теории, описывающей все стороны формирования иерархии полиструктурных геосистем и их функционирования в любых природных (природно-антропогенных) условиях, в настоящее время находится на начальной стадии — геофизическая парадигма только начинает развиваться. Вместе с тем подчеркнем — эмпирические концепции физической географии, активное использование измерений геофизических величин, накопленный опыт работы в ГИС-среде, резко возрастающее количество программных продуктов, моделирующих природные процессы и структуры, позволяют использовать физические законы для

описания структуры и функционирования ландшафтов. *Формирование и функционирование геосистем*, выделяемых классическим ландшафтным анализом, естественным образом описывается с помощью *параметров силовых геофизических полей*.

### 3. Некоторые примеры реализации концепций теории геосистем.

3.1. Дифференциация поверхности рельефа. Приведем очень кратко методу и результаты наших исследований южно-таежных ландшафтов краевой зоны Валдайского оледенения — конечно-моренных гряд на территории Национального парка «Валдайский» (Новгородская область), и перигляциальной равнины на территории Центрально-лесного заповедника (Тверская область) [34, 36]. Этапы алгоритма определения однородной территории по параметрам представим следующим образом [35]:

1. Создание пространства координат — выбор масштаба, создание ЦМР с заданным разрешением:  $X = \{x_i\}$ ,  $1 \leq i \leq 3$ .

2. Создание метрического пространства параметров состояния — выбор методов и получение параметров структурообразующих процессов:  $P = \{p_i\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n_p$ .

3. Отображение пространства параметров на пространство координат — создание матрицы, где столбцы — параметры состояния, а строки — координаты пикселя:  $x'(p)$ .

4. Задание метрики пространства и создание матрицы дистанций:  $d(x', x'') \geq 0$ ,  $D = |d_{ij}|$ ,  $i, j = 1, \dots, k$ .

5. Задание меры (признака) однородности:  $\varepsilon \geq 0$ :  $d(x', x'') \leq \varepsilon$ .

6. Формально определение однородной территории по пространству параметров можно записать следующим образом:  $F = \{X : \forall x', x'' : d(x', x'') \leq \varepsilon\}$ .

Демонстрация этого подхода приведена на примере типологической и функциональной дифференциации геосистем.

*Пространство координат* задается построением цифровой модели рельефа (ЦМР) по горизонталям детальной топографической карты масштаба 1:10 000 методом регулярной сетки с размером пикселя  $28 \times 28$  м, привязанной к съемке Landsat-7. Такой размер пикселя позволяет выделять ПТК ранга урочищ на исследованных территориях размерами примерно  $10 \times 10$  км. По значениям абсолютной высоты и размеров пикселей (шагов по вертикали и горизонтали) рассчитываются основные геоморфометрические параметры. Морфометрическая формализация земной поверхности в поле силы тяжести систематизирована в работе [58]. Закономерно содержательное выделение трех основных групп параметров [34]: а) описывающие распределение солнечной (и тепловой) энергии — *доза прямой солнечной радиации; экспозиция и освещенность склонов*; уклон; б) описывающие распределение и аккумуляцию воды под действием силы тяжести — *удельная площадь сбора и дисперсионная площадь*; глубина В-депрессий и высота В-холмов; уклон; в) описывающие механизмы перераспределения твердого вещества под действием гравитации: — *горизонтальная, вертикальная и средняя кривизна*, уклон; *высота*. Выделенные курсивом (не повторяющиеся) величины рассматривались как *параметры состояния* материальных объектов от пикселей до геосистем.

Далее строится матрица (база) данных, строки которой соответствуют элементам поверхности рельефа (пикселям ЦМР), а столбцы — параметрам (МП), описывающим состояние элемента (высота и геоморфометрические параметры, описывающие градиенты полей силы тяжести и инсоляции, а так-

же цифровые значения яркостей каналов ДДЗ и значения индексов NDVI, NDSI, NDWI и др.). Параметры, описывающие один и тот же элемент поверхности, имеют разный физический смысл и не сопоставимы по размерности и величине. Поэтому параметры нормируются, приводятся к стандартному виду. На полученной матрице возможны любые алгебраические операции.

Итак, 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. В работах для классификации рельефа по матрице МП использовано программное обеспечение FractDim [26]. В качестве меры близости между векторами-объектами применялось евклидово расстояние.

Адекватными понятию дифференциации являются методы разделительной численной классификации. Идея этих методов основана на поиске наиболее различающихся объектов (по максимуму дистанции), принимаемых за базовые, по расстоянию от которых классифицируются все остальные. Моделирование структуры ПТК методом дихотомической группировки элементов поверхности рельефа по параметрам — нетривиальная операция. Численные эксперименты выявили некоторые ее особенности.

А) Типологическая модель структуры ландшафта. Выбор параметров проводится в соответствии с классическими определениями [7], и предварительно проведенными численными экспериментами [34]. Результаты классификаций существенно зависят от числа *параметров состояния* и их весовых значений, изменяя которые можно оптимизировать классификацию элементов рельефа по известной (предполагаемой) ландшафтной структуре. Так например, при одинаковом весовом коэффициенте параметров градиента поля инсоляции первоначально полученная группировка не удовлетворяла ландшафтной структуре, выявленной при полевых исследованиях территории Центрально-лесного заповедника: происходит выделение элементов рельефа, прежде всего, по экспозициям склонов (что не справедливо для столь плоской местности), а с другой стороны — не учитывались охлаждающие свойства переувлажненных ПТК, не выделились даже огромные массивы верховых болот. В дальнейшем для получения более корректной классификации был увеличен весовой коэффициент уклона — это одновременно серьезно улучшило и классификацию элементов поверхности рельефа по параметрам распределения водного стока. На каждом этапе проверка достоверности классификации элементов рельефа с выбранными значениями весовых коэффициентов контролировалась методом дискриминантного анализа: по значениям *F*-критерия на всех уровнях выделенные классы различаются статистически достоверно. Таким образом, очевидная для ландшафтоведов ведущая роль переувлажнения территории, стала численно выражаться величиной весовых коэффициентов параметров стока — уклона (параметра градиента поля силы тяжести).

Необходимость численного объективного обоснования значимости параметров состояния подчеркивает решающую роль ландшафтного подхода, позволяющего выделить роль отдельных факторов дифференциации ПТК в конкретных физико-географических условиях. С другой стороны, изменение численного значения и набора параметров, позволяет моделировать изменение структуры ландшафтов под влиянием, например, изменения климата, неотектонических процессов и др.

Методы численной классификации позволяют проводить не только дифференциацию, но и интеграцию ПТК по геофизическим параметрам любым из агрегационных методов классификации. Синтез местностей и ландшафтов по геофизическим параметрам может быть проведен, например, методом К-средних, но для этого надо изначально задать число кластеров, т. е. единиц структуры ландшафта (фаций, урочищ).

Б) Функциональная модель структуры ландшафта. Структура и функционирование геосистем низкого ранга определяются главным образом процессами водного стока. Следовательно, задача функциональной классификации — отображение иерархии водосборных геосистем малого порядка на морфометрических величинах, описывающих перераспределение воды рельефом в поле гравитации (высота, уклоны, удельная площадь водосбора, горизонтальная, вертикальная кривизна). Эта классификация позволяет выделять контуры водосборных геосистем различных порядков в соответствии со схемой Хортона—Стралера—Токунаги (Философова).

Формальный математический аппарат (алгоритм) выделения наименьших и иерархических единиц поверхности рельефа на основе параметров состояния приобретает фундаментальный геофизический смысл. Физически обоснованным становится понятие полиструктурности ландшафта: выбирая те или иные параметры и структурообразующие процессы, можно реализовать разные классификации ландшафтов. Например, реализации типологического подхода позволяют получать иерархию классических природно-территориальных комплексов (фация—урочище—местность—ландшафт); реализации подхода гидрологического функционирования ландшафта — иерархию водосборных геосистем; реализация подхода классификации параметров и нормализованных коэффициентов ДДЗ — структуру растительного покрова [37]. Таким образом, обоснованы эмпирические представления о трех механизмах ландшафтной структуризации — геостационарном, геоциркуляционном и биоциркуляционном [31, 32].

3.2. *Верификация теоретических моделей структуры* проводится на основе эмпирических методов классификации и картирования геосистем, которые в результате обогащаются новыми подходами и методами. Полевые методы выделения и идентификации структуры ПТК на основе анализа топографических карт и данных дистанционного зондирования активно развиваются [7, 13]. В то же время мало работ, посвященных методам непосредственного *геофизического определения подповерхностных литолого-гидрогеологических границ* природных объектов различного ранга. В этом плане неоспоримо преимущество геоэлектромагнитных методов, при использовании которых путем модификации датчиков и их положения относительно измеряемых полей можно одним и тем же прибором измерять аномалии от разномасштабных природных объектов. Например, выбор расстояния между измерительными электродами в 2—3 раза меньше горизонтальной протяженности исследуемых структур, позволил провести методом электрического профилирования (ЭП) площадную съемку погребенного мерзлотного реликтового полигонально-блочного микрорельефа [3]. Перспективными для выявления структур разного порядка являются методы радиолокационного подповерхностного зондирования (ground penetrating radar, GPR). Это обусловлено оперативностью получения *пространственно непрерывной трехмерной структуры среды* и физических параметров зондируемых слоев. Замечательная способность исследования разномасштабных структурных элементов при зондировании с разными частотами излу-чаю-

щей антенны. Например, площадная GPR-съемка с частотой 250 ГГц выявила погребенную под покровными суглинками линзу флювиогляциальных песков, граница которой является границей урочища ложбины стока ледниковых вод в ландшафте вторично-моренной равнины, а с частотой 750 ГГц — мезо- и макроструктурные элементы почв в ландшафте вторично-моренной равнины [38]. Необходимо отметить весьма продуктивное применение GPR при зондировании мерзлотных явлений, ледниковых покровов и ледников [8, 18].

3.3. Нелинейность природных процессов, скачкообразный характер их динамики приводят к *фрактальной геометрии динамических геосистем*. Ландшафтный покров в конкретном масштабе может быть продуктом множества процессов с разными минимальными размерами элементов. Каждый из них порождает фракталообразную структуру, но с разной фрактальной размерностью. На основе метода определения характеристик самоподобия по распределению (функции спектральной плотности) поля высот по ЦМР Центрально-лесного заповедника были получены фрактальные размерности и выявлены по крайней мере два иерархических уровня организации рельефа: структурные блоки дочетвертичного фундамента, и уровни, соответствующие ледниковым отложениям разного возраста [27]. Наиболее продуктивно исследованы фрактальные свойства речных систем. Существенным теоретическим достижением является объединение эмпирических законов строения речной сети Хортон—Стралера—Токунаги (Horton—Strahler—Tokunaga) и закона функционирования водосборов Хака (Hack's law) и вывода на их основе законов скейлинга топологии бассейново-русловых систем [52]. В этой работе отмечается возможность корректного применения законов скейлинга только для определенных частей бассейнов крупных рек. Таким образом, по-видимому, стоит говорить скорее о мультифрактальности природных систем, чем об универсальном законе скейлинга для геосистем.

Перспективность стохастического моделирования генетической структуры («рисунков») ландшафта продемонстрирована также на основе использования логнормального и пуассоновского распределений вероятностей [4].

3.4. *Функционирование геосистем* определяется главным образом процессами водного стока, в более общем смысле — процессами влагооборота. Реальное движение воды описывается в терминах *механики сплошной среды*. Уравнения математической физики (Навье—Стокса, Рейнольдса, Фурье и др.) приводятся к моделям природных процессов (уравнениям «мелкой воды», Сен-Венана, кинематической волны, конвективно-диффузионных моделей переноса влаги и растворенных веществ в почвах и т. д.). Физико-математические модели с распределенными параметрами миграции вещества обеспечивают соблюдение условий идентичности параметров моделей и измеряемых в природе величин, использования априорной и накопленной эмпирической информации, включения моделей частных процессов в общие модели. В гидрологии накоплен большой опыт решения подобных задач [15], однако процессы на водосборах часто описываются схематично и остро стоят проблемы определения численных значений пространственно распределенных параметров моделей. Геофизическая дифференциация структуры геосистем и цифровые модели рельефа являются граничными условиями, обеспечивающими однозначность и единственность решения уравнений переноса. Поэтому стал развиваться ряд программных комплексов, описывающих гидрологические процессы на водосборах с использованием подробных ЦМР и полуэмпирических либо эмпирических моделей стока [59].

*Верификация моделей гидрологического функционирования* ландшафтов проводится при полевых исследованиях и целенаправленных экспериментах. Методы определения расходов рек, ручьев и временных водотоков обеспечены обширным приборным парком: от водосливов, переносных гидрометрических лотков, вертушек и различных уровнемеров, до акустических доплеровских измерителей трехмерного вектора скорости потока. Водобалансовые исследования и исследования гидрофизических параметров почв и грунтов водосборов также хорошо обеспечены приборно-методической базой, в том числе для непосредственного измерения потенциалов влаги. Современные приборы имеют цифровой формат и автоматический режим работы. Нельзя забывать и о колоссальной информации, накопленной в сети Гидрометеослужбы.

3.5. Важнейшие для саморазвития ландшафтов *биогеофизические процессы трансформации вещества и энергии*, включающие продукционные процессы в растительном покрове и процессы детрификации органического вещества, рассматриваются на основе физических моделей переноса излучения, тепла, влаги и элементов питания в среде обитания и внутри растений и моделей фотосинтеза, дыхания и перераспределения ассимилятов. 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 разновозрастных многопородных древостоев, и воздействие природопользования [19, 22, 36].

Для определения параметров моделей *продукционных процессов*, процессов энерго-,  $H_2O$ - и  $CO_2$ -обмена растительных сообществ в полевых условиях, существует ряд подходов. Наиболее распространено использование методов турбулентных пульсаций, экспозиционных камер и потока пасоки. Поскольку каждый из этих методов имеет ограничения в применении и существенные погрешности, их используют, как правило, в комплексе с усредненными моделями потоков или полуэмпирическими зависимостями [22]. Эти методы необходимы для параметризации моделей процессов формирования нетто первичной продукции (определяемой разностью между валовой фотосинтетической продукцией и суммарным расходом на дыхание всех органов) по величине поглощенной растительным покровом фотосинтетически активной радиации (ФАР). Методы определения ФАР хорошо известны и стандартизированы, приборы измерения радиационного баланса постоянно совершенствуются и в настоящее время являются автономными и цифровыми.

Для верификации и определения параметров продуктивности лесных ландшафтов также используются современные лесотаксационные методы. Отметим наличие огромного массива цифровых баз данных лесоустроительной информации, имеющихся для ряда регионов РФ в виде поведельных баз данных, совмещенных с ГИС. В связи с необходимостью выдавать результаты прогнозирования в лесохозяйственном формате, разрабатываемые модели должны учитывать структуру лесотаксационной информации.

#### **4. Оптимизация процессов природопользования.**

Описание ландшафта как динамической системы предполагает возможность постановки и решения задачи *оптимального управления*. Оптимальное управление включает систему дифференциальных уравнений, моделирующих функционирование объекта во времени, и критерий оптимальности (функционал), который следует минимизировать, выбирая управляющие переменные.

Решением задачи оптимального управления является оптимальный процесс, т. е. соответствующая ему оптимальная траектория системы во времени. Некоторые типичные задачи оптимизации и оптимального управления лесопользованием рассмотрены в работе [39].

После выбора объектов и процессов пользования необходимо поставить конкретные функции цели — максимум продукции, максимум прибыли, улучшение состояния окружающей среды, отсутствие конфликтов с социально-экономической системой и т. д. Кроме того, надо вводить реальные ограничения: количество и скорость изъятия используемых ресурсов, их пространственное распределение может оказаться весьма ограниченными. Использование теории оптимизации открывает новые перспективы развития и применения методов ландшафтного планирования и устойчивого природопользования [36], способствует *синтезу физической и социально-экономической географии*.

### **Заключение.**

1. Последние десятилетия характеризуются широким внедрением в ландшафтоведение ГИС-технологий обработки цифровых моделей рельефа и данных дистанционного зондирования, геофизических методов исследования приземных слоев атмосферы, почв, грунтов, природных вод, полога растительности и др. В значительной мере независимо развивается физико-математическое моделирование природных процессов разной степени детальности и разного пространственно-временного масштаба.

Современный уровень развития и перспективы ландшафтоведения связаны с синтезом этих направлений. Этот новый уровень характеризуется как геофизическая парадигма ландшафтоведения.

2. Особенности развития парадигмы является новое осмысление фундаментальных физических основ физической географии и ландшафтоведения. Стала очевидна необходимость рассмотрения ландшафтов с точки зрения динамических систем с привлечением соответствующего математического аппарата моделирования. Различные пространственно-временные масштабы и степени детализации, а также сильная нелинейность природных процессов требуют применения разных математических методов.

3. Традиционные эмпирические концепции физической географии позволяют содержательно использовать физические законы для описания структуры и функционирования ландшафтов. Формирование ландшафтных структур естественным образом описывается с помощью морфометрических параметров силовых геофизических полей — поля силы тяжести и поля инсоляции. Становится определенным понятие полиструктурности ландшафта: выбирая определяющие структурообразующие процессы и их содержательные параметры можно реализовать разные классификации ландшафтов. Моделирование процессов функционирования ландшафтов в терминах механики сплошной среды теснейшим образом связано со структурой ландшафтов через граничные условия и распределенные геофизические параметры процессов переноса.

4. Исследования структуры ландшафтов и дренажных сетей методами фрактальной геометрии и на основе синергетического подхода, «рисунков» ландшафта с использованием логнормального и пуассоновского распределений, применение теории броуновского движения для описания динамики природных объектов, и т. п., демонстрируют перспективы направления стохастического анализа природных процессов.



5. Верификация и развитие теоретических моделей требует применения адекватных методов измерения параметров ландшафтных процессов и структур: возрастает роль комплекса полевых геофизических методов.

6. Создание моделей в соответствии с принципами частичного термодинамического равновесия, линейной феноменологической термодинамики необратимых процессов, а также нелинейной неравновесной термодинамики венчает представление о генезисе геосистем и поэтому необходимо.

7. Важнейшее прикладное значение парадигмы — оптимизация процессов природопользования — открывает новые перспективы развития и применения методов ландшафтного планирования и устойчивого природопользования, способствует синтезу физической и социально-экономической географии.

Краткое рассмотрение основных направлений показывает, что создание теории геосистем находится в начале пути: более или менее завершенными можно считать пока лишь отдельные эпизоды геосистемной парадигмы.

Работа выполнялась при поддержке грантов РФФИ № 02-05-65174, 05-05-64648, 09-05-00541, 11-05-90754.

### Список литературы

- [1] Антонов Н. В., Какинь П. И. Скейлинг в эрозии ландшафтов: ренормгрупповой анализ бесконечнозарядной модели // Теоретическая и математическая физика. Т. 190. № 2, 2017. С. 226—238.
- [2] Арманд Д. Л. Наука о ландшафте. М.: Наука, 1975. 204 с.
- [3] Бердников В. В. Палеокриогенный микрорельеф центра Русской равнины. М.: Наука, 1976. 126 с.
- [4] Викторов А. С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006. 252 с.
- [5] Демченко П. Ф., Кислов А. В. Стохастическая динамика природных объектов. М.: ГЕОС, 2010. 190 с.
- [6] Долгоносов Б. М. Нелинейная динамика экологических и гидрологических процессов. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 440 с.
- [7] Дьяконов К. Н. Базовые концепции и понятия ландшафтоведения // Географические научные школы Московского университета. М.: Городец, 2008. С. 348—381.
- [8] Ермаков А. П., Старовойтов А. В. Применение метода георадиолокации при инженерно-геологических исследованиях для оценки геокриологической обстановки // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2010. № 6. С. 91—97.
- [9] Исаченко А. Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. М.: Высшая школа, 1991. 366 с.
- [10] Князева Е. Н., Курдюмов С. П. Синергетика: Нелинейность времени и ландшафты коэволюции. М.: КомКнига/URSS, 2007. 272 с.
- [11] Козлов Д. Н., Лозбенев Н. И., Левченко Е. А. Структурно-функциональная организация водно-миграционных и эрозионно-аккумулятивных комплексов лесостепи Среднерусской возвышенности // Ландшафтоведение: теория, методы, ландшафтно-экологическое обеспечение природопользования и устойчивого развития. Материалы XII Межд. ландшафтной конференции, Тюмень-Тобольск, 22—25 августа 2017 г. Т. 1. Тюмень: ТГУ, 2017. С. 71—76.

- [12] *Коломыц Э. Г.* Локальные механизмы глобальных изменений природных экосистем. М.: Наука, 2008. 427 с.
- [13] *Коновалова Т. И.* Геосистемное картографирование. Новосибирск: Гео, 2010. 186 с.
- [14] *Кун Т.* Структура научных революций. М.: Мир, 1977. 145 с.
- [15] *Кучмент Л. С.* Речной сток (генезис, моделирование, предвычисление). М.: РАН ИВП, 2008. 394 с.
- [16] Леса Европейской территории России в условиях меняющегося климата. М.: Товарищество научных изданий КМК. 2017. 276 с.
- [17] *Малинецкий Г. Г.* Теория самоорганизации. На пороге IV парадигмы. // Компьютерные исследования и моделирование. 2013. Т. 5. № 3. С. 315—366.
- [18] *Мачарет Ю. Я.* Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 392 с.
- [19] *Левашова Н. Т., Мухартова Ю. В., Ольчев А. В.* Трехмерная модель переноса солнечной радиации в неоднородном растительном покрове // Математическое моделирование в экологии. Материалы Пятой Национальной научной конференции 16—20 октября 2017 г. Пущино, 2017. С. 116—118.
- [20] *Неймарк О. Б.* О некоторых закономерностях скейлинга в пластичности, разрушении, турбулентности // Физическая мезомеханика. 2015. Вып. 18. № 3. С. 71—83.
- [21] *Николаев В. А.* Ландшафтоведение. М.: Географический факультет МГУ. 2006. 209 с.
- [22] *Ольчев А. В.* Модельный подход к определению валовой и нетто первичной продукции лесных экосистем по величине поглощенной фотосинтетически активной радиации // Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т. 8. № 2. С. 345—353.
- [23] *Палагин Э. Г.* Математическое моделирование агрометеорологических условий перезимовки озимых культур. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 191 с.
- [24] *Пегов С. А., Хомяков П. М.* Моделирование развития экологических систем. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 222 с.
- [25] *Петлин В. Н.* Современное состояние, проблемы и перспективы развития ландшафтоведения // Ландшафтоведение: теория, методы, региональные исследования, практика. М.: Географический ф-т МГУ, 2006. С. 23—25.
- [26] *Пузаченко Ю. Г., Онуфреня И. А., Алещенко Г. М.* Количественные методы классификации форм рельефа // Известия АН. Серия географическая, 2002. № 6. С. 17—25.
- [27] *Пузаченко Ю. Г.* Организация ландшафта // Горизонты ландшафтоведения. Вопросы географии. Вып. 138. М.: Кодекс, 2014. С. 35—64.
- [28] *Пузаченко Ю. Г.* Ранговые распределения в экологии и неэкстенсивная статистическая механика // Сборник трудов Зоологического музея МГУ. 2016. Т. 54. С. 42—71.
- [29] *Сербенюк С. Н., Кошель С. М., Мусин О. Р.* Методы моделирования геополей по данным в нерегулярно расположенных точках // Геодезия и картография. 1990. № 11. С. 31—35.
- [30] *Соболевский П. К.* Современная горная геометрия // Соц. реконструкция и наука. 1932. Вып. 7. С. 42—78.
- [31] *Солнцев В. Н.* Системная организация ландшафтов. М.: Мысль, 1981. 239 с.
- [32] *Солнцев В. Н., Рыжков О. В., Трегубов О. В. и др.* Использование GPS- и ГИС-технологий для изучения особо охраняемых территорий. Тула: Гриф и К, 2006. 216 с.
- [33] *Соловьёв А. С., Калач А. В.* Современное состояние вопроса изучения снежных лавин. Воронеж, 2013. 137 с.

- [34] Сысуев В. В. Морфометрический анализ геофизической дифференциации ландшафтов // Известия РАН. Сер. геогр. 2003. № 4. С. 36—50.
- [35] Сысуев В. В., Алещенко Г. М. К проблеме разработки обобщенной модели ландшафта // Научные чтения, посвященные 100-летию со дня рождения академика В. Б. Сочавы. Мат. Международной конференции, ИГ СО РАН, Иркутск, 2005. С. 54—58.
- [36] Сысуев В. В., Бондарь Ю. Н., Чумаченко С. И. Моделирование структуры ландшафтов и динамики древостоев для планирования устойчивого лесопользования // Вестник Моск. университета. Сер. 5: геогр. 2010. № 5. С. 39—49.
- [37] Сысуев В. В. Основные концепции физико-математической теории геосистем // Горизонты ландшафтоведения. Вопросы географии. Вып. 138. М.: Кодекс, 2014. С. 65—100.
- [38] Сысуев В. В. Георадарные исследования полимасштабных структур в ландшафтах центра Восточно-Европейской равнины // Вестник Моск. университета. Сер. 5: Геогр. 2014. № 4. С. 26—33.
- [39] Сысуев В. В. Об «оптимизации» ландшафтов // Вестник Моск. университета. Сер. 5: Геогр. 2015. № 4. С. 34—40.
- [40] Сысуев В. В. Термодинамические модели в геохимии ландшафтов // Геохимия ландшафтов. К 100-летию А. И. Перельмана. М.: АПР, 2017. С. 19—50.
- [41] Трофимов А. М., Московкин В. М. Математическое моделирование в геоморфологии склонов. Казань: Изд-во КГУ, 1983. 218 с.
- [42] Хомяков П. М., Иванов В. Д., Искандарян Р. А., Конищев В. Н., Кривобок И. Г., Пегов С. А., Смолин В. С., Смолина С. Г., Терентьев Г. Ю. Геоэкологическое моделирование для целей управления природопользованием в условиях изменения природной среды и климата. М.: Эдиториал УРСС, 2002. 400 с.
- [43] Хорошев А. В. Полимасштабная организация географического ландшафта. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. 416 с.
- [44] Черкашин А. К. Полисистемный анализ и синтез. Приложение в географии. Новосибирск: Наука, 1997. 502 с.
- [45] Черкашин А. К. Полисистемное моделирование. Новосибирск: Наука, 2005. 280 с.
- [46] Шайдеггер А. Е. Теоретическая геоморфология. М.: Недра, 1964. 452 с.
- [47] Шарый П. А. Топографический метод вторых производных // Геометрия структур земной поверхности. Пушино: ПНЦ, 1991. С. 28—58.
- [48] Шейн Е. В. Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с.
- [49] Шоба В. Н., Карпов И. К. Физико-химическое моделирование в почвоведении. Новосибирск: Наука, 2004. 180 с.
- [50] Beven K. J. Rainfall-runoff modelling: the primer. 2nd ed. Chichester; Hoboken: Wiley-Blackwell, 2012. 457 p.
- [51] Coulthard T. J. Landscape evolution models: a software review // Hydrol. Processes. 2001. Vol. 15. P. 165—173.
- [52] Dodds P. S., Rothman D. H. Scaling, universality, and geomorphology. // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2000. 28. P. 571—610.
- [53] Johnson D. L., Miller A. C. A Spatially Distributed Hydrologic Model Utilizing Raster Data Structures // Computers and Geosciences. 1997. Vol. 23. No. 3. P. 267—272.
- [54] Kleidon A. Life, hierarchy, and the thermodynamic machinery of planet Earth // Physics of Life Reviews. 2010. Vol. 7 (4). P. 424—460.
- [55] Mitas L., Mitasova H. Distributed soil erosion simulation for effective erosion/deposition modeling and enhanced dynamic visualization // Water Resources Res. 1998. 34. P. 505—516.
- [56] Pastor-Satorras R., Rothman D. H. Scaling of a Slope: The Erosion of Tilted Landscapes // Journal of Statistical Physics. 1998. Vol. 93, 3/4. P. 477—500.

- [57] *Rinaldo A., Rodriguez-Iturbe I., Rigon R., Bras R. L., Ijjasz-Vasquez E., Marani A.* Minimum energy and fractal structures of drainage networks. // *Water Resour Res.* 1992. 28. P. 2183—2195.
- [58] *Shary P. A.* Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures // *Mathematical Geology.* 1995. Vol. 27. No. 3. P. 373—390.
- [59] *Tarboton D. G.* Rainfall-runoff processes. A workbook to accompany the Rainfall-Runoff Processes Web module. 2003. <http://www.engineering.usu.edu/dtarb/rrp.html>.

---

## Geophysical paradigm of landscape: postulates and concepts

© *V. V. Sysuev*

Lomonosov Moscow State University, Moscow

E-mail: [v.v.sysss@mail.ru](mailto:v.v.sysss@mail.ru)

Potential of advance in landscape science is associated with the synthesis of physical-mathematical, geophysical and empirical scientific directions on the basis of GIS technology. This stage is characterized as a geophysical paradigm of landscape science, a feature of which is a new understanding of the physical fundamentals, the need to consider landscapes as dynamic systems. Empirical theoretical concepts of physical geography enable us to apply physical laws to describe landscape structure and functioning. Land structures are described using independent morphometric parameters of geophysical force fields (gravity and insolation), which can be viewed as state parameters of geosystems. The modeling of landscape functioning in terms of continuum mechanics is closely related to the structure of landscapes through boundary conditions and distributed parameters of transfer processes. Verification and development of models requires the use of a complex of geophysical methods. Creating models in accordance with the principles of the irreversible thermodynamics is complete representation of the genesis of natural processes. The dualism and strong non-linearity necessitates the stochastic analysis of geosystems, including using the fractal methods.

**Key words:** landscape geophysics, mathematical modeling, landscape paradigms, the theory of geosystems.

## References

- [1] *Antonov N. V., Kakin' P. I.* Skejling v e'rozii landshaftov: renormgruppovoj analiz beskonechnozaryadnoj modeli. // *Teoreticheskaya i matematicheskaya fizika.* T. 190. № 2, 2017. S. 226—238.
- [2] *Armand D. L.* Nauka o landshafte. M.: Nauka, 1975. 204 s.
- [3] *Berdnikov V. V.* Paleokriogennyj mikrorel'ef centra Russkoj ravniny. M.: Nauka, 1976. 126 s.
- [4] *Viktorov A. S.* Osnovnye problemy matematicheskoy morfologii landshafta. M.: Nauka, 2006. 252 s.
- [5] *Demchenko P. F., Kislov A. V.* Stohasticheskaya dinamika prirodnyh ob'ektov. M.: GEOS, 2010. 190 s.
- [6] *Dolgonosov B. M.* Nelinejnaya dinamika e'kologicheskikh i gidrologicheskikh processov. M.: Knizhnyj dom «LIBROKOM», 2009. 440 s.
- [7] *D'yakonov K. N.* Bazovye koncepcii i ponyatiya landshaftovedeniya // *Geograficheskie nauchnye shkoly Moskovskogo universiteta.* M.: Gorodec, 2008. S. 348—381.
- [8] *Ermakov A. P., Starovojtov A. V.* Primenenie metoda georadiolokacii pri inzhenerno-geologicheskikh issledovaniyah dlya ocenki geokriologicheskoy obstanovki // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4. Geologiya.* 2010. № 6. S. 91—97.

- [9] *Isachenko A. G.* Landshaftovedenie i fiziko-geograficheskoe rajonirovanie. M.: Vysshaya shkola, 1991. 366 s.
- [10] *Knyazeva E. N., Kurdyumov S. P.* Sinergetika: Nelinejnost' vremeni i landshafty koe'volyucii. M.: KomKniga/URSS, 2007. 272 s.
- [11] *Kozlov D. N., Lozbenev N. I., Levchenko E. A.* Strukturno-funkcional'naya organizaciya vodno-migracionnyh i e'rozionno-akkumulyativnyh kompleksov lesostepi Srednerusskoj vozvyshehnosti // Landshaftovedenie: teoriya, metody, landshaftno-e'kologicheskoe obespechenie prirodopol'zovaniya i ustojchivogo razvitiya. Materialy XII Mezhd. landshaftnoj konferencii, Tyumen'-Tobol'sk, 22—25 avgusta 2017 g. T. 1. Tyumen': TGU, 2017. S. 71—76.
- [12] *Kolomyc E'. G.* Lokal'nye mehanizmy global'nyh izmenenij prirodnyh e'kosistem. M.: Nauka, 2008. 427 s.
- [13] *Konovalova T. I.* Geosistemnoe kartografirovanie. Novosibirsk: Geo, 2010. 186 s.
- [14] *Kun T.* Struktura nauchnyh revolyucij. M.: Mir. 1977. 145 s.
- [15] *Kuchment L. S.* Rečnoj stok (genesis, modelirovanie, predvychislenie). M.: RAN IVP, 2008. 394 s.
- [16] *Lesya Evropejskoj territorii Rossii v usloviyah menyayushhegosya klimata.* M.: Tovarišhestvo nauchnyh izdanij KMK. 2017. 276 s.
- [17] *Malineckij G. G.* Teoriya samoorganizacii. Na poroge IV paradigmy. // Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie. 2013. T. 5. № 3. S. 315—366.
- [18] *Macharet Yu. Ya.* Radiozondirovanie lednikov. M.: Nauchnyj mir, 2006. 392 s.
- [19] *Levashova N. T., Muhartova Yu. V., Ol'chev A. V.* Trehmernaya model' perenosa solnečnoj radiacii v neodnorodnom rastitel'nom pokrove// Matematicheskoe modelirovanie v e'kologii. Materialy Pyatoj Nacional'noj nauchnoj konferencii 16—20 oktyabrya 2017, g. Pushhino, 2017. S. 116—118.
- [20] *Nejmark O. B.* O nekotoryh zakonornostyah skejlinga v plastichnosti, razrushenii, turbulentnosti // Fizicheskaya mezomehanika. 2015. Vyp. 18. № 3. S. 71—83.
- [21] *Nikolaev V. A.* Landshaftovedenie. M.: Geograficheskij fakul'tet MGU. 2006. 209 s.
- [22] *Ol'chev A. V.* Model'nyj podhod k opredeleniyu valovoj i netto pervičnoj produkcii lesnyh e'kosistem po velichine pogloshhennoj fotosinteticheski aktivnoj radiacii // Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie. 2016. T. 8. № 2. S. 345—353.
- [23] *Palagin E'. G.* Matematicheskoe modelirovanie agrometeorologicheskikh uslovij perezirovki ozimyh kul'tur. L.: Gidrometeoizdat, 1981. 191 s.
- [24] *Pegov S. A., Homyakov P. M.* Modelirovanie razvitiya e'kologicheskikh sistem. L.: Gidrometeoizdat, 1991. 222 s.
- [25] *Petlin V. N.* Sovremennoe sostoyanie, problemy i perspektivy razvitiya landshaftovedeniya // Landshaftovedenie: teoriya, metody, regional'nye issledovaniya, praktika. M.: Geograficheskij f-t MGU, 2006. S. 23—25.
- [26] *Puzachenko Yu. G., Onufrenya I. A., Aleshhenko G. M.* Kolichestvennye metody klassifikacii form rel'efa // Izvestiya AN. Seriya geograficheskaya, 2002. № 6. S. 17—25.
- [27] *Puzachenko Yu. G.* Organizaciya landshafta // Gorizonty landshaftovedeniya. Voprosy geografii. Vyp. 138. M.: Kodeks, 2014. S. 35—64.
- [28] *Puzachenko Yu. G.* Rangovye raspredeleniya v e'kologii i nee'kstensivnaya statisticheskaya mehanika // Sbornik trudov Zoologicheskogo muzeya MGU. 2016. T. 54. S. 42—71.
- [29] *Serbenyuk S. N., Koshel' S. M., Musin O. R.* Metody modelirovaniya geopolej po danym v neregulyarno raspolozhennyh tochkah // Geodeziya i kartografiya. 1990. № 11. S. 31—35.
- [30] *Sobolevskij P. K.* Sovremennaya gornaya geometriya // Soc. rekonstrukciya i nauka. 1932. Vyp. 7. S. 42—78.
- [31] *Solncev V. N.* Sistemnaya organizaciya landshaftov. M.: Mysl', 1981. 239 s.

- [32] *Solncev V. N., Ryzhkov O. V., Tregubov O. V. i dr.* Ispol'zovanie GPS- i GIS-tehnologij dlya izucheniya osobo ohranyaemyh territorij. Tula: Grif i K, 2006. 216 s.
- [33] *Solov'yov A. S., Kalach A. V.* Sovremennoe sostoyanie voprosa izucheniya snezhnyh lavin. Voronezh, 2013. 137 s.
- [34] *Sysuev V. V.* Morfometricheskij analiz geofizicheskoj differenciacii landshaftov // Izvestiya RAN. Ser. geogr. 2003. № 4. S. 36—50.
- [35] *Sysuev V. V., Aleshhenko G. M.* K probleme razrabotki obobshhennoj modeli landshafta // Nauchnye chteniya, posvyashhennye 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika V. B. Sochavy. Mat. mezhdunarodnoj konferencii, IG SO RAN, Irkutsk, 2005. S. 54—58.
- [36] *Sysuev V. V., Bondar' Yu. N., Chumachenko S. I.* Modelirovanie struktury landshaftov i dinamiki drevostoev dlya planirovaniya ustojchivogo lesopol'zovaniya // Vestnik Mosk. universiteta. Ser. 5: Geogr. 2010. № 5. S. 39—49.
- [37] *Sysuev V. V.* Osnovnye koncepcii fiziko-matematicheskoy teorii geosistem // Gorizonty landshaftovedeniya. Voprosy geografii. Vyp. 138. M.: Kodeks, 2014. S. 65—100.
- [38] *Sysuev V. V.* Georadarnye issledovaniya polimasshtabnyh struktur v landshaftah centra Vostochno-Evropejskoj ravniny // Vestnik Mosk. universiteta. Ser. 5: Geogr. 2014. № 4. S. 26—33.
- [39] *Sysuev V. V.* Ob «optimizacii» landshaftov // Vestnik Mosk. universiteta. Ser. 5: Geogr. 2015. № 4. S. 34—40.
- [40] *Sysuev V. V.* Termodinamicheskie modeli v geohimii landshaftov // Geohimiya landshaftov. K 100-letiyu A. I. Perel'mana. M.: APR, 2017. S. 19—50.
- [41] *Trofimov A. M., Moskovkin V. M.* Matematicheskoe modelirovanie v geomorfologii sklonov. Kazan': Izd-vo KGU, 1983. 218 s.
- [42] *Homyakov P. M., Ivanov V. D., Iskandaryan R. A., Konishhev V. N., Krivobok I. G., Pegov S. A., Smolin V. S., Smolina S. G., Terent'ev G. Yu.* Geo'kologicheskoe modelirovanie dlya celej upravleniya prirodopol'zovaniem v usloviyah izmeneniya prirodnoj sredy i klimata. M.: E'ditorial URSS, 2002. 400 s.
- [43] *Horoshev A. V.* Polimasshtabnaya organizaciya geograficheskogo landshafta. M.: Tovarihshestvo nauchnyh izdanij KMK, 2016. 416 s.
- [44] *Cherkashin A. K.* Polisistemnyj analiz i sintez. Prilozhenie v geografii. Novosibirsk: Nauka, 1997. 502 s.
- [45] *Cherkashin A. K.* Polisistemnoe modelirovanie. Novosibirsk: Nauka, 2005. 280 s.
- [46] *Shajdegger A. E.* Teoreticheskaya geomorfologiya. M.: Nedra, 1964. 452 s.
- [47] *Sharyj P. A.* Topograficheskij metod vtoryh proizvodnyh // Geometriya struktur zemnoj poverhnosti. Pushhino: PNC, 1991. S. 28—58.
- [48] *Shein E. V.* Kurs fiziki pochv. M.: Izd-vo MGU, 2005. 432 s.
- [49] *Shoba V. N., Karpov I. K.* Fiziko-himicheskoe modelirovanie v pochvovedenii. Novosibirsk: Nauka, 2004. 180 s.
- [50] *Beven K. J.* Rainfallrunoff modelling: the primer. 2nd ed. Chichester; Hoboken: Wiley-Blackwell, 2012. 457 p.
- [51] *Coulthard T. J.* Landscape evolution models: a software review // Hydrol. Processes. 2001. Vol. 15. P. 165—173.
- [52] *Dodds P. S., Rothman D. H.* Scaling, universality, and geomorphology. // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2000, 28. P. 571—610.
- [53] *Johnson D. L., Miller A. C.* A Spatially Distributed Hydrologic Model Utilizing Raster Data Structures // Computers and Geosciences. 1997. Vol. 23. No. 3. P. 267—272.
- [54] *Kleidon A.* Life, hierarchy, and the thermodynamic machinery of planet Earth // Physics of Life Reviews. 2010. Vol. 7 (4). P. 424—460.
- [55] *Mitas L., Mitasova H.* Distributed soil erosion simulation for effective erosion/deposition modeling and enhanced dynamic visualization // Water Resources Res. 1998. 34. P. 505—516.

- [56] *Pastor-Satorras R., Rothman D. H.* Scaling of a Slope: The Erosion of Tilted Landscapes // *Journal of Statistical Physics*. 1998. Vol. 93, 3/4. P. 477—500.
- [57] *Rinaldo A., Rodriguez-Iturbe I., Rigon R., Bras R. L., Ijjasz-Vasquez E., Marani A.* Minimum energy and fractal structures of drainage networks. // *Water Resour Res*. 1992. 28. P. 2183—2195.
- [58] *Shary P. A.* Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures // *Mathematical Geology*. 1995. Vol. 27. No. 3. P. 373—390.
- [59] *Tarboton D. G.* Rainfall-runoff processes. A workbook to accompany the Rainfall-Runoff Processes Web module. 2003. <http://www.engineering.usu.edu/dtarb/rrp.html>.

Поступила в редакцию 06.03.2019 г.  
После доработки 25.07.2019 г.  
Принята к публикации 29.07.2019 г.

---