

О РАЗВИТИИ ОБРАЗОВАНИЯ В СВЯЗИ С ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ПАРАДИГМОЙ EDUCATIONAL DEVELOPMENT IN RESPONSE TO GEOPHYSICAL PARADIGM

Сысуев В.В.
Sysuev V.V.

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

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова.

Аннотация. На кафедре физической географии и ландшафтоведения в рамках новой геофизической парадигмы введен цикл дисциплин, посвященных основам физико-математического моделирования эмпирических концепций ландшафтоведения. Приводятся некоторые аспекты и опыт преподавания.

Abstract. The Department of Physical Geography and Landscape Science, as part of the new geophysical paradigm, introduced a series of disciplines devoted to the basics of physical and mathematical modeling of empirical concepts. Aspects and teaching experiences are given.

Ключевые слова: методы преподавания, физико-математические модели, геосистемы

Keywords: teaching methods, physical and mathematical models, geosystems

Введение. «Математизация» географии начиналась в 60-70 гг. прошлого века и проходила с трудностями – например, один из классиков геоморфологии И.С. Щукин твердо высказался «Природа сложнее математики» [3]. Образованная тогда на географическом факультете МГУ Математическая лаборатория под руководством Ю.Г. Симонова наряду с учебно-методической деятельностью выявляла и типовые географические задачи, которые можно и нужно решать математическими методами. По объективным причинам деятельность лаборатории не привела тогда к ощутимому прогрессу географии, однако заметные результаты проявились. На кафедрах факультета возникли группы освоивших математическую статистику для обработки массивов данных – применять эти методы в статьях стало «хорошим тоном». Кроме того, выдвинулись свои «математизаторы», освоившие методы прикладной математики самостоятельно, или на мехмате и факультете ВМК, при которых были отделения для лиц с высшим образованием. Из первой группы географов известны А.С. Викторов, Ю.Г. Пузаченко, А.К. Черкашин и др., из второй группы – Н.Е. Кошелева, В.Г. Линник, А.Ю. Сидорчук, автор данной статьи, и др.

Работа в научно-исследовательских институтах Рослесхоза, Минприроды, Росатома и Академии наук выявила необходимость владения методами математического моделирования для решения прикладных задач. Широкое использование измерительных процедур и ГИС-технологий привело к накоплению огромного массива данных о состоянии земной поверхности, что неизбежно вызвало применение математики для их обработки. Причем обзоры того же времени показывали большое число независимо разработанных моделей частных природных процессов [4]. Развитие ГИС повлекло резкое увеличение моделирования пространственно распределенных систем и появления все новых пакетов прикладных программ. Таким образом, к концу XX в. утвердилось представление о необходимости развития физико-математических методов исследования функционирования и структуры ландшафтов. Это направление приобрело среди отечественных и зарубежных исследователей большое число сторонников, развивавших направления геофизики и биогеофизики ландшафта, моделирования природных процессов, ландшафтов, и экосистем. Стало возможным говорить не просто о «математизации», а о возникновении качественно новой геофизической парадигмы ландшафтоведения, которая может стать базисом физической географии [6]. Особенностями парадигмы является новое осмысление фундаментальных основ физической географии и ландшафтоведения. Соотнесение физических постулатов с анализом геосистем оказалось не тривиальным. Возникла необходимость рассмотрения ландшафтов с точки зрения динамических систем с привлечением соответствующего математического аппарата. Для моделирования можно использовать общие уравнения и их аналитические решения – однако такой подход позволяет лишь в самых общих чертах описать процессы в геосистемах. Для адекватного описания необходимы детальные модели, разработка которых невозможна без физико-географов и ландшафтоведов. Поэтому остро стоит задача привлечения внимания нового поколения исследователей к проблемам разработки теории геосистем. Вместе с тем, участие в научных конференциях и работа на географическом факультете показали, что физико-математическая подготовка географов традиционно оставляет желать лучшего. Проблемы качества обучения математики и её прикладного использования, в том числе на естественно-научных факультетах, остро стоят и в ведущих университетах других стран. Обсуждению этих вопросов был посвящен ряд Международных конференций по математическому образованию, например ICME-13, по результатам которой выпущена в Springer специальная серия отдельных публикаций [7,8], а также статьи в специализированном международном журнале [9], в которых огромный список литературы, свидетельствующий об остроте проблем.

Такое положение в образовании может привести к отставанию нашей науки от развития её направлений за рубежом, где количество публикаций по моделированию природных процессов в последние десятилетия растет экспоненциально. Таким образом, задача совершенствования преподава-

ния географам актуальна как никогда.

В связи с этим в статье рассматриваются опыт и некоторые аспекты преподавания дисциплин физико-математического направления на кафедре физической географии и ландшафтоведения. Это направление является продолжением на новом уровне курса К.Н. Дьяконова «Геофизика ландшафтов» [1], и может быть названо «Основы геофизической парадигмы ландшафтоведения».

Дисциплины направления. На кафедре физической географии и ландшафтоведения с 2000-ых годов существенно усилено преподавание дисциплин физико-математического направления: «Методы анализа пространственных данных» (Ю.Г. Пузаченко); «Прикладная математика (Мат. статистика)» (А.В. Хорошев); «Геоинформационные технологии ландшафтных исследований» (Д.Н. Козлов); «Физико-математические основы ландшафтоведения» (В.В. Сысуев); «Инструментальная база ландшафтных исследований» (В.В. Сысуев); «Биогеофизика и биогеохимия ландшафтов» (К.Н. Дьяконов, И.А. Авессаломова, В.В. Сысуев), в т.ч., разделы «Популяционная динамика. Модели продуктивности экосистем и биогеоценозов» (В.В. Сысуев). В курсе «Природно-антропогенные ландшафты» (В.А. Николаев, В.В. Сысуев, В.П. Чижова и др.) добавлен раздел теории оптимизации для обоснования устойчивого управления природопользованием (В.В. Сысуев). Последовательность курсов складывалась не сразу и не всегда логично. Основные дисциплины, читались специалистами, а затем и бакалаврам на 3-ем и 4-ом курсах. Впоследствии магистрам добавлен расширенный курс «Моделирование геосистем» (В.В. Сысуев, А.С. Викторov), а также курс «Экологическое нормирование и мониторинг» (В.В. Сысуев), в котором рассматривается система интегрального нормирования. С 2020 г. магистрам 2-го года читается спецкурс «Термодинамические модели в ландшафтоведении» (В.В. Сысуев). Дисциплины оснащены электронными презентациями, учебными пособиями и монографиями [1, 4, 5, 6]. Учебные планы и программы на сайтах [http://geogr.msu.ru/student/programs/m_geography/index.php; http://geogr.msu.ru/student/uch_plan/].

Эти дисциплины обобщают знания, полученные студентами в общих курсах и при изучении компонентов ландшафтов и экосистем; показывают методы построения моделей структуры и функционирования геосистем, вплоть до методик измерения геофизических параметров и расчета экологических нормативов, организации мониторинга окружающей среды и оптимизации природопользования.

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. Поощряется в качестве тем использование направления собственных курсовых работ студентов. При обсуждении докладов выясняется степень понимания использованных материалов.

Особенности преподавания. 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. Студенты географы отчасти «напуганы» математикой еще на первых курсах. В классическом виде математика ("математика" значит - "доказательство") практически не применима к преподаванию ландшафтоведам. Фактически обучение сводится к тому, чтобы показать или **доказать, что данная задача географии может быть решена этим методом**, используя именно этот раздел математики, именно это уравнение... Немного перефразируя популяризатора математики [2, стр. 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 доказательства. Но они по природе своей любознательны, подозрительны и недоверчивы... Поэтому хорошо, если утверждения будут сопровождаться хоть какими-то доказательствами: иногда совершенно строгими, иногда – уступающими место рассуждению; в отдельных глубоких местах целью должно стать – донести до читателя хоть что-то».

В результате проб и ошибок 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 вывода (математики).

Начинается любой курс с **аксиом и важнейших понятий**, которые будут затем многократно использоваться в лекциях. Хотя предполагаются некоторые начальные знания у студентов, но ряд фундаментальных понятий необходимо вводить снова. Опыт показал, что эти понятия необходимо вводить через их физический смысл и неоднократное объяснение с разных позиций.

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 одномерного градиента высоты – это уклон в долях единицы (или как на дорожных знаках, в %), тангенс угла наклона на местности или топографической карте, и наконец – сила поля тяжести. Рассматривая далее элементарную работу dA

по перемещению материальной точки в потенциальном поле $U(x,y,z)$, которая равна сумме произведений сил F_x, F_y, F_z на расстояния dx, dy, dz , пройденные в направлении сил, получаем приращение потенциальной энергии dU :

$$dA = F_x dx + F_y dy + F_z dz = dU \rightarrow \vec{F} = -\left(\frac{\partial U}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial U}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial U}{\partial z} \vec{k}\right) = -\text{grad}U = -\nabla U$$

где ∇ - набла, оператор пространственного дифференцирования. Из этого выражения следует корректное определение: градиент - вектор, указывающий направление наибольшего возрастания величины, или дифференциальный оператор скалярной величины по пространственным координатам. Такое определение позволяет в дальнейшем правильно использовать $\text{grad}U$ и ∇U . После этого вектор градиента поля силы тяжести воспринимается студентами проще, а горизонталы воспринимаются на карте как линии сечения трехмерного рельефа изопотенциальной поверхностью.

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 приращение потока через все остальные поверхности в направления y и z , получим суммарное значение приращение потока dJ и точное выражение для определения *дивергенции* – *скалярной меры расходимости вектора*:

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

где $\text{div}A$ – 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 многих физико-математических моделей.

После ввода параметров и функций состояния геосистем (координаты, скорость, масса, сила, плотность, температура и др.), дается **методология выведения** важнейших уравнений физики. Например, усложнение закона Ньютона (ускорение выражается через производную скорости по времени, масса - 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 производится последовательное упрощение – интегрирование уравнений Рейнольдса до уравнений «мелкой воды», а затем упрощение до уравнений Сен-Венана, и, наконец, до уравнения кинематической волны. В силу своей общности уравнения математической физики стали широко применяться в таких системах, как гидродинамика - экосистема, гидрология - русло, сток - морфология склона, почва - растение - атмосфера и т.д. [6].

Для получения моделей природных процессов применяются аналоги разных законов: неразрывности – балансовые соотношения потоков субстанций в пространстве за 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 просто описывают скорость изменения количества компонента в зависимости от его содержания и баланса поступления-оттока в компартменте. Всегда уделяется внимание физическому смыслу применяемого закона, размерности независимых величин, параметров и коэффициентов. Принципиально важно знакомство студентов с построением *термодинамических моделей процессов в геосистемах*, которые являются частью познания природных процессов, венчающей представлением об их генезисе. Основой выведения моделей геосистемных процессов в многомерном поле сил должна служить неравновесная термодинамика. Разрабатывать и реализовывать такие модели не просто, поэтому большинство моделей сложных систем строятся по принципу расслоения по физическим процессам. На семинарских и практических занятиях разбираем *численную реализацию* уравнения кинематической волны, проводим моделирование процесса поверхностного стока, используем доступные программные комплексы SAGA, GRASS, HYDRUS и др. Перспективно также использование *моделей эволюции ландшафтов*, рассматривающих динамические геоморфологические системы при взаимодействии речной эрозии, склоновых процессов, тектонических поднятий, климата и литологии. Например, CASCADE, GOLEM лучше подходят для больших временных масштабов, тогда как SIBERIA, CAESAR - для более коротких периодов.

Небольшое число практических задач разбираются подробно, например:

1. Типологическая и функциональная дифференциация ландшафтов на основе данных дистанци-

онного зондирования и морфометрических величин, описывающих распределение градиентов геофизических полей гравитации и инсоляции.

2. Моделирование дождевого склонового стока и динамики фильтрации влаги в почвах с учетом эвапотранспирации и изменения влагозапасов; верификация численных результатов по данным натурных экспериментов.

3. Перенос растворенных веществ в почвах; постановка и решение математических моделей, проведение экспериментов для получения физико-химических параметров.

4. Механизмы задержания и трансформация дождевых осадков пологом леса, выбор независимых переменных, вывод системы уравнений и численное моделирование.

5. Вывод формул кривой депрессии уровня грунтовых вод на основе уравнения Дарси, их адаптация к ландшафтным исследованиям.

6. Моделирование формы поверхности и структуры ландшафтов верхового болота.

Важность этих примеров в том, что моделирование процессов и структуры геосистем известны автору от постановки задачи, численного решения уравнений и определения параметров, до деталей экспериментальных установок и измерительных приборов. *Изложение якобы незначительных подробностей попеременно с воспоминаниями часто способствует эффективности занятий.*

Верификации моделей структуры проводится при сравнении ландшафтных карт полученных полевым классическим и теоретическим методами картирования геосистем. Придается большое внимание геофизическим методам непосредственного определения границ ПТК разного ранга. Это обусловлено оперативностью получения *непрерывной структуры* почв и отложений с выявлением разномасштабных элементов одним прибором при разных частотах излучающих антенн (георадиолокация) или при разных параметрах системы электродов (электротомография). Роль полевых и лабораторных исследований важна не только для верификации результатов моделирования, но и для *определения параметров физических процессов*.

Литература

1. Дьяконов К.Н. Геофизика ландшафта. Метод балансов. М.: МГУ, 1988. 95 с.
2. Пантаев М.Ю. (2020) Матанализ с человеческим лицом. М.: ЛЕНАНД/URSS, 358 с.
3. Симонов Ю.Г. (2017) История географии в Московском университете: события и люди. Т.2. М.: ООО «АПР», 752 с.
4. Сысуев В.В. (1986) Моделирование процессов в ландшафтно-геохимических системах. М.: Наука, 302 с.
5. Сысуев В.В. (2003) Физико-математические основы ландшафтоведения. М.: Географический ф-т МГУ, 245 с.
6. Сысуев В.В. (2020) Введение в физико-математическую теорию геосистем. М.: URSS, 600 с.
7. Biza I., Giraldo V., Hochmuth R. (2016) Research on Teaching and Learning Mathematics at the Tertiary Level. Hamburg: Springer Nature, 32 p. DOI 10.1007/978-3-319-41814-8
8. Cai J., Mok I.A.C. (2016) Comparative Studies in Mathematics. Lessons for Improving Students' Learning. Hamburg: Springer Nature, 36 p. DOI 10.1007/978-3-319-42414-9
9. 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(19), P. 599–618. doi.org/10.1007/s10763-020-10072-y.
10. http://geogr.msu.ru/student/programs/m_geography/index.php
11. http://geogr.msu.ru/student/uch_plan/