

# Полиструктурная организация ландшафта: геофизический анализ синергетики геосистем

СЫСУЕВ В.В.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Москва  
v.v.syss@mail.ru

**Аннотация.** Эмпирические концепции ландшафтоведения в рамках геофизической парадигмы позволяют ассимилировать физические законы для описания структуры и функционирования геосистем. Исследованы южно-таежные ландшафты конечно-моренной зоны Валдайского оледенения на территории Национального парка «Валдайский». Геоструктуры описываются с помощью параметров силовых геофизических полей – поля силы тяжести и поля инсоляции, которые можно получить на основе морфометрии цифровых моделей рельефа и цифровых данных космической съемки. Выбор небольшого числа главных параметров с ясным физическим смыслом проводится в соответствии с классическими определениями. Обоснование числа и значимости параметров состояния элементарных пикселей и геосистем осуществляется при анализе результатов численного моделирования структуры ландшафтов. Методом дихотомической группировки элементов поверхности рельефа по параметрам состояния (высота, уклон, горизонтальная и вертикальная кривизна, доза прямой солнечной радиации, NDVI) реализован типологический подход к классификации природно-территориальных комплексов (по принципу однородности) и получена структура ландшафтов на уровне урочищ. С другой стороны, функциональный подход позволил построить иерархию водосборных геосистем по морфометрическим параметрам, описывающим перераспределение воды в поле гравитации – уклонам, удельной площади водосбора, горизонтальной и вертикальной кривизне. Все классификации строятся на единой базе данных и могут использоваться для разных прикладных задач. Приводится пример расчета скоростей стока поверхностных вод и на их основе – зонирование водосборных геосистем по времени добегаания до контрольных створов. Таким образом, формальный алгоритм выделения наименьших и иерархических единиц поверхности рельефа на основе параметров состояния приобретает фундаментальный геофизический смысл. Понятие полиструктурности ландшафта в этом случае является абсолютно логичным: выбирая те или иные физически содержательные структурообразующие процессы и их параметры, можно реализовать разные классификации ландшафтов, необходимые в прикладных задачах.

**Ключевые слова:** физико-математическое моделирование, структура ландшафта.

## Polystructural organization of a landscape: geophysical analysis of geosystems synergy

SYSSUEV V.V.

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia  
v.v.syss@mail.ru

**Abstract.** Empirical concepts of physical geography enable us to apply the physical laws to describe the landscape structure and functioning. The finitely morainic landscapes of the Valdai Glaciation on the National Park “Valdaisky” territory were investigated. A development of geostructures identified by classical landscape analysis can be described by the parameters of power geophysical fields, mainly gravitation and insolation fields. Selection of a small number of main parameters with extremely clear physical meaning is carried out in accordance with the classical definitions of

landscape science. Justification of the number and importance of parameters of elementary pixels and geosystems is carried out when analyzing the results of numerical simulation of the structure of landscapes. Using the method of dichotomic grouping of the relief surface elements by the state parameters (height, slope, horizontal and vertical curvature, dose of direct solar radiation, NDVI), the typological approach to the classification of the natural-territorial complexes (according to homogeneity principle) was realized and the structure of landscapes at a level of natural boundaries was obtained. On the other hand, the functional approach allowed to construct the hierarchy of the water-collecting geosystems by morphometric parameters describing the water redistribution in the gravitation field – slopes, drainage factor, horizontal and vertical curvature. All the classifications are constructed on the single base of data and can be used for different applied tasks. An example of calculating the surface water flow rate is presented and, on their basis, a zoning of the water-collecting geosystems, using the flow time to the control sections. If one uses these parameters the formal mathematical algorithm for identification of elementary and hierarchical units of landforms acquires fundamental geophysical interpretation. In this case the concept of landscape patterns multiplicity is quite relevant. By choosing these or other physical parameters and structure-forming processes we have the opportunity to perform various landscape classifications needed in the applied tasks.

**Keywords:** physico-mathematical modeling, landscape structure

## Введение

Объективное выделение единиц ландшафтного покрова является одной из фундаментальных задач физической географии и имеет существенное значение для планирования устойчивого управления природопользованием. Широкое использование данных дистанционного зондирования (ДДЗ), ГИС-технологий и методов измерений привело к накоплению огромного количества данных о состоянии земной поверхности и способствовало применению математических методов их обработки и построению моделей ландшафтного покрова. Современная ландшафтная экология основывается на парадигме мозаики патчей – любая опубликованная за рубежом литература по ландшафтной экологии единообразна в принятии этого подхода [1–4]. Популярность модели мозаики патчей обязана ее концептуальной простоте и соответствию хорошо развитым и понятным количественным методам, разработанным для дискретных данных. Эти формальные модели с дискретными плоскими патчами лишь констатируют и ничего не сообщают о причинах возникновения структур. Часто более достоверными являются модели структуры ландшафтов с постепенными градиентными сопряжениями в поле какой-либо величины. Например, в работе [3] проанализировано 264 образца ландшафтов в западной Турции с использованием 28 метрик поверхности – patch density, largest patch index, edge density, mean patch area, coefficient of variation in patch area и др., рассчитываемых в FRAGSTATS. Анализ 9 градиентных поверхностей (полей), полученных по цифровым моделям рельефа (ЦМР) и изображениям LandsatETM+, (таких как Digital elevation model – DEM, Slope, Topographic wetness – TWI, Topographic position index – TPI500, Normalized difference vegetation index – NDVI и др.) показал, что ряд свойств ландшафтных градиентных структур не имеют аналогов в патч-мозаиках. Только градиентные модели ландшафтов пригодны для выявления понимания отношений модель – процесс [3]. Однако, очень важно выбрать значимые градиентные поля (параметры).

Термодинамика необратимых процессов показывает общие принципы, на которых должны строиться физико-математические модели структурообразующих процессов и основываться классификации природно-территориальных комплексов (ПТК). В соответствие с билинейным уравнением Онзагера классификации могут осуществляться по: 1) системообразующим потокам; 2) силовым полям и их градиентам; 3) феноменологическим коэффициентам (обобщенным проводимостям) [5].

Если выделять и классифицировать геосистемы по определяющим полям и их градиентам (наиболее общим для любых геосистем является поле силы тяжести), то приходим к выделению геосистем по потокам в поле геопотенциала. Это и есть так называемый функциональный подход к выделению и исследованию геосистем, который последовательно развивается в работах Д.Л. Арманда, К.Н. Дьяконова, А.Ю. Ретеюма и др. При этом, если будем рассматривать поведение элементарных объемов воды в поле геопотен-

циала, то получим иерархию геосистем водосборов (речных бассейнов), которая будет соответствовать формализованным схемам Хортона, Стралера, Философова. Выделение геосистем по принципу резкого изменения феноменологических коэффициентов приводит к классификации природно-территориальных комплексов (ПТК) по принципу однородности (в смысле учения Н.А. Солнцева). Если рассматривать динамику растений и животных одновременно в поле геопотенциала и других физических полях (радиационных, химических, термодинамических и т.д.), то получим иерархию экосистем или биогеоценологических систем и их распределение в пространстве. Очевидно, что эти подходы к выделению геосистем взаимно дополнительные и их противопоставление бессмысленно. Например, по В.Н. Солнцеву [6] необходимо рассматривать три механизма ландшафтной структуризации – геостационарный, геоциркуляционный и биоциркуляционный. Эмпирическая реализация этого подхода до практического использования привела к созданию трех отдельных карт структуры ландшафтов Воронежского заповедника [7].

В нашей работе априори приняты классические концепции отечественного ландшафтоведения: трехмерный континуальный ландшафтный покров формируется под воздействием структурообразующих процессов, имеющих геофизический и биогеофизический смысл [8, 9]. Пространственная неоднородность ландшафта возникает закономерно под действием разных геофизических процессов. Сделано предположение, что структура ландшафта может быть описана с помощью морфометрических параметров, характеризующих перераспределение рельефом главных геофизических полей (силы тяжести и инсоляции). Для выбора параметров использован синергетический подход, при котором строятся простейшие модели процесса на ключевых величинах. Сущность подхода состоит в описании макроскопических эмерджентных свойств систем, которые не выводимы из уровня ее элементов, являясь результатом их кооперативного взаимодействия. Таким образом, при исследовании сложной системы необходимо выявить ключевые величины – параметры порядка, которые с течением времени начинают определять изменение остальных характеристик системы.

В связи с этим намеренно отбрасывается множество геоморфометрических величин на основе ЦМР и показателей ДДЗ. Из всего многообразия геоморфометрии используются только независимые параметры, описывающие фундаментальные геофизические силовые поля (гравитации, инсоляции) и состояния геосистем. В связи с этим одна из задач статьи в рамках новой геофизической парадигмы [10] состоит в том, чтобы продемонстрировать возможность выделения ландшафтных структур на основе небольшого числа «главных» геофизических параметров дифференциации и синтеза природных ландшафтов. В широком смысле – это ориентация на поиск «параметров порядка», т.е. задача синергетики ландшафта.

## **Материалы и методы**

Исследованы ПТК Национального парка (НП) «Валдайский» в Новгородской области. Сложное сочетание генетических форм конечно-моренного, камового, зандрового и озового рельефа в пределах НП «Валдайский» обусловило пестроту структуры ландшафтов и растительного покрова. Дренажная речная сеть на исследованной территории развита слабо. На вершинах и склонах моренных и камовых холмов формируются наиболее продуктивные ельники с примесью сосен. Мелколиственно-сосновые и сосновые древостой характерны для болотных местообитаний.

Для описания геосистем необходимо обосновать параметры силовых геофизических полей, определяющих процессы структурообразования, и формализовать описание элементарных и иерархических инвариантов геосистем. Количественные значения пространственно распределенных физических параметров состояния ландшафтов можно получить: 1) по цифровым моделям местности (ЦМР) – морфометрические параметры,

описывающие градиенты индуцирующих полей силы тяжести и инсоляции; 2) по цифровым данным дистанционного зондирования – параметры состояния земной поверхности; 3) по измерениям в натуре и в лабораторных условиях – параметры процессов переноса; 4) в специальных экспериментах. Естественно, имеется опасность субъективизма – какие процессы и соответствующие им параметры вы посчитаете ведущими, такие структуры и получите, поэтому здесь необходим именно ландшафтный подход.

Верификация теоретических классификаций была проведена на основе детальных полевых исследований ландшафтных трансект с регулярным шагом при нивелировании 5 м и интервалом между точками комплексных описаний 20 м, общей длиной около 5 км. Вдоль трансект проведена сплошная ленточная таксация древостоя и геоботаническая съемка, в совокупности по 239 площадкам размером  $20 \times 20$  м [11]. Кроме того, на основе классических методов опорных площадок, профилей и маршрутных изысканий была независимо составлена ландшафтная карта исследуемой территории [5].

Формализация морфометрических параметров в поле гравитации систематизирована в работе [12]. ЦМР построены по топографической карте М 1 : 10 000 методом регулярной сетки (grid) с размером пикселя  $30 \times 30$  м, привязанным к разрешению съемки Landsat-7. Такое разрешение позволяет выделять для равнинных условий ПТК не детальнее ранга урочищ.

Рассчитываемые в ЦМР морфометрические параметры (МП), раскрывающие механизмы перераспределения рельефом геофизических полей, содержательно объединены в три группы [5]: 1) МП, описывающие распределение солнечной энергии: доза прямой солнечной радиации, экспозиция и освещенность склонов, уклон, высота; 2) МП, описывающие факторы распределения и аккумуляции воды под действием силы тяжести: удельная площадь сбора и дисперсивная площадь, глубина В-депрессий и высота В-холмов, уклон; 3) МП, описывающие перераспределение вещества под действием гравитации: горизонтальная, вертикальная и средняя кривизна, уклон.

Выделенные курсивом МП, напрямую описывающие градиенты полей силы тяжести и инсоляции, будем считать параметрами состояния материальных объектов от пикселей до 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 вхождением 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.

Рассчитанные и приведенные к стандартному виду параметры преобразуются в матрицу данных, строки которой соответствуют пикселям ЦМР, а столбцы – параметрам, описывающим состояние элемента. Таким образом, векторы-строки матрицы данных характеризуют множество элементов (пикселей) поверхности рельефа. Геометрически два таких вектора в пространстве параметров тем ближе, чем меньше различаются между собой значения каждого из параметров для обоих объектов. Для классификации рельефа по матрице параметров в качестве меры близости принято евклидово расстояние между соответствующими векторами-объектами.

Адекватными понятию дифференциации являются методы разделительной численной классификации. Моделирование структуры ПТК проводится методом дихотомической группировки элементов поверхности рельефа по параметрам в программном обеспечении FractDim [13].

## Обсуждение результатов

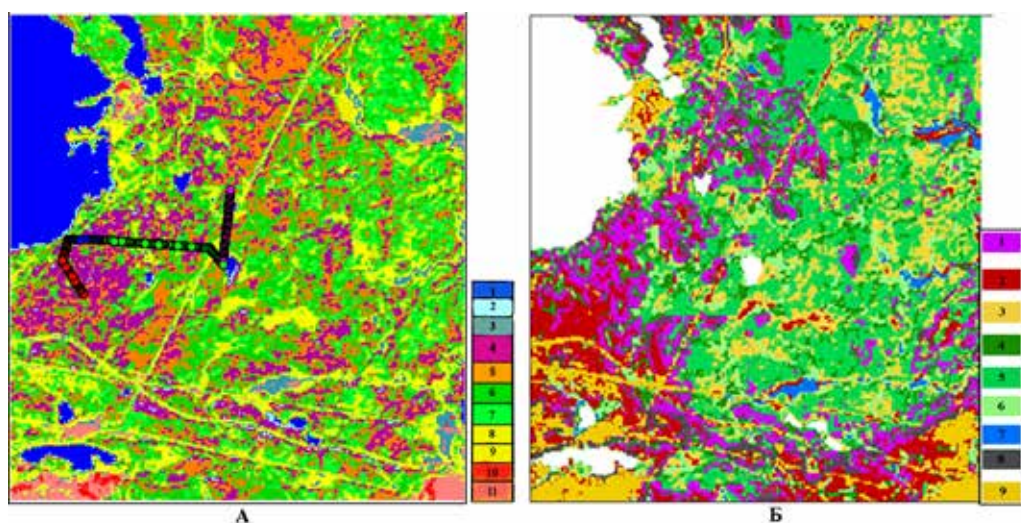
Типологический подход, основанный на выделении структур с близкими значениями основных параметров структурообразующих процессов, приводит к классификации природно-территориальных комплексов (ПТК) по принципу однородности (в смысле учения Н.А. Солнцева) и позволяет получить иерархию классических ПТК: (фация) – урочище – местность – ландшафт.

Выбор параметров проводится в соответствии с классическими определениями [8]. Поскольку результаты формальных классификаций существенно зависят от числа параметров состояния и весовых коэффициентов для их обоснования, предварительно проводится ряд численных экспериментов [5]. Подчеркнем решающую роль ландшафтного анализа, позволяющего выделить роль факторов дифференциации ПТК в конкретных физико-географических условиях. Моделирование структуры ПТК методом последовательной дихотомической группировки элементов поверхности рельефа по параметрам – не тривиальный процесс, который выявил ряд особенностей.

При последовательных шагах вначале происходит выделение двух наиболее общих группировок. Например, для параметров, описывающих перераспределение солнечной энергии, происходит выделение ПТК прежде всего по преобладающим экспозициям склонов. На следующих шагах происходит последовательное разбиение обоих классов: сначала выделяются участки повышенной освещенности, затем различия уклонов поверхности. Вследствие этого первоначально полученный ряд группировки иногда приходится корректировать в соответствии с ландшафтной структурой территории, выявленной в полевых исследованиях. Например, для плоского рельефа местности Центрально-лесного государственного заповедника (ЦЛГЗ), с одной стороны, оказался довлеющим показатель экспозиции склонов (что не справедливо), с другой – сильно ослаблены охлаждающие свойства переувлажненных ПТК: не выделились даже огромные массивы верховых болот. Поэтому в последующих численных экспериментах увеличивались весовые коэффициенты параметра уклонов поверхности как показателя интенсивности дренирования территории. В результате классификации изменялись, т.е. результаты моделирования существенно зависят от весовых значений и количества параметров и требуют идентификации и верификации физического содержания выделенных классов. Проверка достоверности классификации ПТК с оптимальными значениями весовых коэффициентов методом дискриминантного анализа показала, что на всех уровнях выделенные классы различаются статистически достоверно. По значениям F-критерия на первых шагах дихотомии ведущими переменными, различающими классы, являются уклоны, а на последующих шагах увеличивается роль экспозиции склонов и освещенности. На всех уровнях классификационные матрицы имеют характер, близкий к диагональному.

Характеристики лесного полога получены при дешифрировании снимка Landsat-7 ETM+. Дешифрирование по индексу NDVI и априорной физической информации спектронального снимка было верифицировано по данным сплошной ленточной лесотаксационной съемки. Дискриминантный анализ показал, что выделенные классы достоверно распознаются полевыми данными, причем еловые сомкнутые леса как доминантный тип растительных сообществ имеют самый высокий процент распознавания. На основе этого определено физическое содержание классов и составлена карта растительного покрова исследованной территории Национального парка «Валдайский» (рис. 1 А).

Для выявления связи между классами структуры древостоев (биоценозами) и классами рельефа (экотопами) между соответствующим образом ранжированными матрицами была рассчитана корреляционная связь по Спирмену. Высокая корреляционная связь приурочена к вершинам и склонам моренных и камовых холмов, а также к крутым приозерным берегам и долинам рек. В этих экотопах доминируют разные типы ельников, что убедительно показал корреляционный анализ. То есть можно сделать вывод о довольно строгом соответствии классов растительности условиям местообитания. В переходных



**Рис. 1.** Идентификация содержания выделенных классов по полевым данным. Точками показан трансект. А – растительный покров по параметрам снимка Landsat-7. 1 – водные объекты; 2 – прибрежная растительность; 3 – пойменные луга; 4 – сомкнутые высокобонитетные ельники; 5 – елово-сосновые и сосновые древостои; 6 – смешанные мелколиственно-хвойные древостои; 7 – разреженные хвойно-мелколиственные древостои; 8 – разреженные заболоченные древостои и верховые болота; 9 – антропогенные земли, зарастающие кустарником и мелколесьем; 10, 11 – антропогенные земли разной степени нарушенности, карьеры

Б – структуры ПТК на основе классификации рельефа по параметрам градиентов геофизических полей и данным съемки Landsat-7. 1 – моренные гряды и камовые холмы с суглинистыми дерново-подзолистыми почвами под разнотравно-кисличными ельниками; 2 – вершины камовых холмов и гряд с песчаными дерново-подзолами под сосняками зеленомошными, беломошными и разнотравными; 3 – подножия холмов и плоские вогнутые ложбины с дерново-глеевыми и дерново-подзолистыми контактно отбеленными почвами под смешанными лесами; 4 – речные и озерные террасы с дерново- и торфяно-глеевыми почвами под ельниками и смешанными лесами; 5 – донные гряды и песчаные холмы с дерново-подзолистыми почвами под сосняками; 6 – плоские и выпуклые верховые болота с мощными торфами с редкостойными сосняками сфагновыми; 7 – речные поймы с дерново-глеевыми почвами под заливными лугами; 8 – крутые склоны холмов разного генезиса с дерновыми почвами под хвойными лесами; 9 – антропогенно измененные и антропогенные ландшафты (дороги, просеки ЛЭП, карьеры, сельхозугодья, лесопитомники и селитебные)

**Fig. 1.** Identification of the content of selected classes by field data: А – vegetation cover obtained by Landsat-7 image parameters. The transect is shown at points. В – PTC structures on the basis of relief classification by the gradient parameters of geophysical fields and Landsat-7 survey data

позициях на покатых и крутых склонах коэффициент корреляции меньше. В этих местообитаниях к ельникам примешиваются сосняки и мелколиственные породы, которые недостоверно различаются на осенних снимках ввиду изменения отражательной способности крон. Болотные и заболоченные местообитания и антропогенно-нарушенные земли характеризуются слабой корреляционной связью. Низкая связь обусловлена как высоким варьированием растительного покрова в зависимости от изменения увлажнения (фактора – экстремума) на болотах и заболоченных местообитаниях, так и сильным изменением отражательной способности крон преобладающих в данных экотопах мелколиственных и сосновых сообществ.

Карта ландшафтного покрова получена на основе синтеза классов рельефа и растительности. Для описания структуры ландшафтов уровня урочищ (простых и сложных) достаточным оказался 4-й уровень дихотомии, на котором процент достоверности выделения отдельных классов в среднем составляет более 90 %. Причем из 16 классов отдельные оказались пустыми (с малым количеством пикселей), а некоторые из них, в соответствии с близостью значений параметров, слились в цветовой шкале – в результате содержательных классов осталось меньше (рис. 1 Б). Необходимо подчеркнуть, что при таком численном моделировании необходим ландшафтный подход, позволяющий

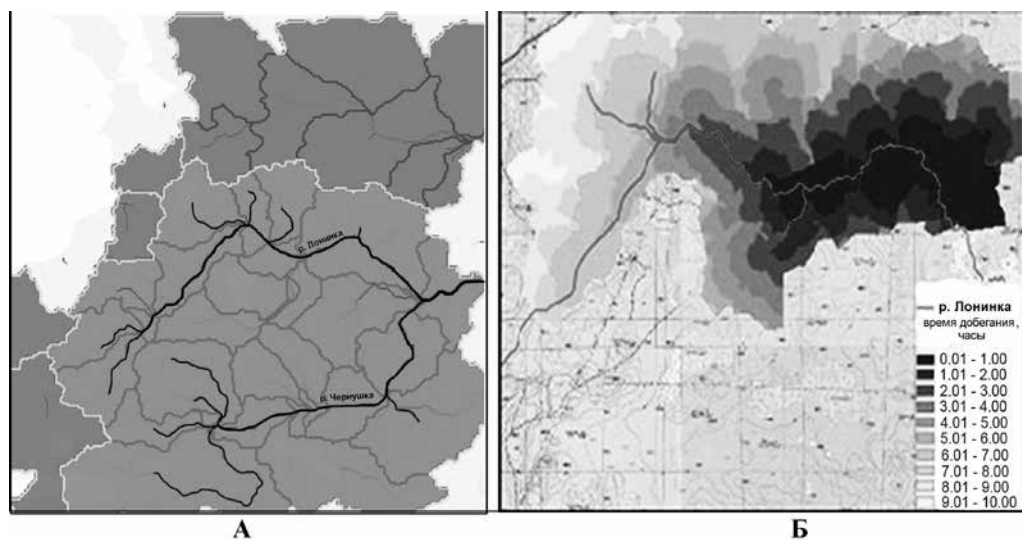
выявить главные факторы дифференциации ПТК и отсечь второстепенные или зависящие параметры.

Полученная карта использована для решения задач ландшафтного планирования в соответствии с методами и нормативной базой лесоустройства [14]. Адаптация видов лесопользования к пространственной структуре ландшафта решается однозначной привязкой лесохозяйственных выделов к ландшафтно-морфологическим единицам. Прогнозирование состояния лесного ландшафта при математическом моделировании динамики разновозрастного древостоя позволяет оптимизировать сценарии управления лесопользованием на выделенных участках.

**Функциональный подход.** Если рассматривать поведение элементарных объемов воды в поле геопотенциала, получим иерархию водосборных геосистем (речных бассейнов), которая будет соответствовать формализованным схемам Хортон – Стралера – Философова. Задача классификации состоит в построении иерархии водосборных геосистем по МП, описывающим перераспределение воды в поле гравитации – уклонам, удельной площади водосбора, горизонтальной и вертикальной кривизне. При последовательной классификации элементов поверхности рельефа по параметрам распределения водного стока также выявилась неравнозначность МП. Наиболее значимой оказалась величина удельной площади водосбора (SCA – specific catchment area). Однако в ряде ГИС используется критическая длина водотока, которая и была использована для построения автоматических классификаций (рис. 2 А).

Водосборная геосистема р. Лонинка перед слиянием с р. Чернушкой имеет всего 2-й порядок, т.к., несмотря на площадь бассейна порядка 5 км<sup>2</sup> и длины водотока 10 км, не имеет притоков 2-го порядка. Это обусловлено неразвитостью дренажной системы в условиях плоской поверхности заболоченной зандровой равнины.

Тесная связь структуры водосборов и гидрологического функционирования геосистем позволяет рассчитывать скорости водотоков только на основе информации о структуре



**Рис. 2.** Функциональная классификация водосборных геосистем НП «Валдайский» и ее прикладное использование для эколого-гидрологических задач. А – выделение водосборных бассейнов рек Лонинка и Чернушка в MapWindow GIS с блоком TauDem (D. Tarboton) при процедуре отсекаания водотоков короче некоторой критической величины. Б – расчет времени добегаания по скоростям стекания поверхностных вод, рассчитанным в ГИС SAGA

**Fig. 2.** Functional classification of drainage geosystems of NP «Valdaysky» and its applied use for ecological and hydrological tasks. A – Allocation of catchment areas of the rivers Loninka and Chernushka in MapWindow GIS with the block TauDem (D. Tarboton) in the procedure of cutting off watercourses shorter than some critical value of the area of catchments. B – Calculation of runoff time by surface water flow rates calculated in the SAGA GIS

геосистем и данных об осадках. Расчет гидрологических характеристик производился в ГИС SAGA. Наряду с обязательными параметрами (высота, уклон, SCA и др.) для численного моделирования процессов стока нужно задавать параметры структуры водосборов и водотоков. Карта структуры ПТК позволяет задать распределенные параметры, характеризующие процессы гидрологического стока в бассейне р. Лонинка. Прежде всего это коэффициент шероховатости поверхности («Manning's n» – MN) и коэффициент влияния почв на интенсивность поверхностного стока («Curve number» – CN). При моделировании времени добегания и скорости стока средняя интенсивность осадков задавалась 0.0, 0.66, 10.0 и 100.0 мм/ч. В численных экспериментах изменялись также параметры русла реки, характеристики типа стока и др. Численное моделирование показало, что даже табличные не адаптированные значения параметров позволяют выявить существенные особенности в распределении скоростей стекания поверхностных вод в различных геосистемах. Так, на большей части бассейна наблюдаются крайне низкие значения скорости стекания (порядка 0.01 м/с). Более высокие скорости наблюдаются исключительно в руслах ручьев и речек (0.025–0.2 м/с), и только на отдельных участках р. Лонинка скорости возрастают до 2 м/с. Это достаточно реально для плоской заболоченной кочковатой задровой равнины, прорезанной редкими руслами, в которых, собственно, и наблюдается сток [5]. Расчет изохрон добегания поверхностного стока к выбранному замыкающему створу русла в ГИС SAGA позволяет использовать их, например, для прогноза времени попадания загрязняющих веществ с латеральным поверхностным стоком по поверхности водосбора до русла (рис. 2 Б). Это важно для принятия мер локализации загрязнений до попадания в речку. Наиболее эффективны эти подходы при изучении строения бассейнов до 4–5 порядков.

## Выводы

Формальный аппарат выделения единиц поверхности рельефа на основе морфометрических параметров, описывающих перераспределение рельефом главных геофизических полей – поля силы тяжести и поля инсоляции (в том числе ДДЗ), приобретает фундаментальный геофизический смысл.

Выбор небольшого числа главных параметров с предельно ясным физическим смыслом проводится в соответствии с классическими определениями ландшафтоведения. Обоснование числа и значимости параметров состояния элементарных пикселей и геосистем осуществляется при ландшафтном анализе результатов численных экспериментов по моделированию структуры ландшафтов.

Понятие полиструктурности ландшафта становится абсолютно логичным и строгим: выбирая физически содержательные структурообразующие процессы и их параметры, можно реализовать разные классификации ландшафтов, необходимые в прикладных задачах.

## Литература

1. Хорошев А.В. Полимасштабная организация географического ландшафта. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. 416 с.
2. Forman R.T.T. Land mosaics: the ecology of landscapes and regions. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 632 p.
3. McGarigal K., Tagil S., Cushman S.A.. Surface metrics: an alternative to patch metrics for the quantification of landscape structure // *Landscape Ecol.* 2009. N 24. P. 433–450. DOI 10.1007/s10980-009-9327-y
4. Turner M., Gardner R.H. Landscape Ecology in Theory and Practice. Pattern and Process. N. Y.: Springer, 2015. 482 p.
5. Сысуев В.В. Введение в физико-математическую теорию геосистем. М.: «ЛЕНАНД»/URSS, 2020. 600 с.
6. Солнцев В.Н. Системная организация ландшафтов. М.: Мысль, 1981. 239 с.
7. 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.



8. Дьяконов К.Н. Базовые концепции и понятия ландшафтоведения // Географические научные школы Московского университета. М.: Городец, 2008. С. 348–381.
9. Пузаченко Ю.Г. Организация ландшафта // Горизонты ландшафтоведения. Вопр. географии. Вып. 138. М.: Кодекс, 2014. С. 35–64.
10. Сысуйев В.В. Геофизическая парадигма ландшафтоведения: постулаты и концепции // Изв. Русского географического общества. 2019. Вып. 4. С. 63–81. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-6071151460-82>
11. Акбари Х.Х., Бондарь Ю.Н., Сысуйев В.В. Индикационные свойства древостоя в ландшафтах краевой зоны валдайского оледенения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2006. № 6. С. 59–66.
12. Shary P.A. Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures // *Mathematical Geology*. 1995. Vol. 27. N 3. P. 373–390.
13. Пузаченко Ю.Г., Онуфреня И.А., Алешенко Г.М. Количественные методы классификации форм рельефа // Изв. АН. Серия геогр. 2002. № 6. С. 17–25.
14. Сысуйев В.В. Ландшафтное планирование и оптимизация лесопользования на основе моделирования // Теория и методология ландшафтного планирования / ред. К.Н. Дьяконов, А.В. Хорошев. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2019. С. 250–280.

### References

1. Khoroshev A.V. Multiple organization of geographical landscape. KMK Scientific Press: Moscow, Russia, 2016. 416 p. (In Russian)
2. Forman R.T.T. Land mosaics: the ecology of landscapes and regions. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 632 p.
3. McGarigal K., Tagil S., Cushman S.A. Surface metrics: an alternative to patch metrics for the quantification of landscape structure // *Landscape Ecol.* 2009. 24. P. 433–450. DOI: 10.1007/s10980-009-9327-y
4. Turner M., Gardner R.H. Landscape Ecology in Theory and Practice. Pattern and Process. N. Y.: Springer, 2015. 482 p
5. Sysuev V.V. Introduction to physico-mathematical theory of geosystems. LENAND: Moscow, Russia, 2020, 600 p. (In Russian)
6. Solntsev V.N. The system organization of landscape. Mysl: Moscow, Russia, 1981. 239 p. (In Russian)
7. Solncev V.N., Ryzhkov O.V., Tregubov O.V. et al. Using GPS and GIS technologies for studying the protected natural areas. Grifand Company Publ.: Tula, Russia, 2006. 216 p. (In Russian)
8. Dyakonov K.N. Basic concepts of landscape science. *Geographical science schools of Moscow University*. Gorodec: Moscow, Russia, 2008. P. 348–381. (In Russian)
9. Puzachenko Yu.G. Landscape organization. *Gorizonty landshaftovedeniya*. Voprosygeografii. Vol. 138. Kodeks: Moscow, Russia, 2014. P. 35–64. (In Russian)
10. Sysuev V.V. Geophysical paradigm of landscape: postulates and concepts. *Izvestiya of Russian geographical society*. 2019. 4. 62–83. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-6071151461-83>. (In Russian)
11. Akbary H.H., Bondar' Yu.N., Sysuev V.V. Indicative stand properties in the landscapes of the Walday glacier marginal zone. *Vestnik of Moscow University. Ser. «Geography»*. 2010. 5. 59–66. (In Russian)
12. Shary P.A. Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures. *Mathematical Geology*. 1995. 27(3). 373–390.
13. Puzachenko Yu.G., Onufrenya I.A., Aleshhenko G.M. Quantitative methods of terrain forms classification. *Izvestiya of Russian Academy of sciences. Ser. geographical*. 2002. 6. 17–25. (In Russian)
14. Sysuev V. V. Landscape planning and forestry management optimization based on modeling. *Theory and methodology of landscape planning* / ed. by K.N. Dyakonov, A.V. Khoroshev. Association of Scientific Publications of KMC: Moscow, Russia, 2019. P. 250–280 (In Russian)