

А. К. ЧЕРКАШИН

ГЕОГРАФИЯ И ГЕОИНФОРМАТИКА

Геоинформационная география — современная стадия развития этой науки, синтез географического знания и информационных технологий, объединение хорологического, системного и исторического подхода в географии на основе методов системного, статистического, логического и математического анализа. Геоинформационные системы (ГИС) рассматриваются в качестве моделей географических комплексов. Обсуждаются проблемы: 1) анализа информационных частей географического комплекса; 2) создания информационной базы географической науки (ГИС); 3) формирования и применения фундаментальных принципов обращения с геоинформацией (системный анализ); 4) эффективного сбора (геомониторинг); 5) рационального использования (геологистика) информации.

Geoinformation geography constitutes the present state of the art in geographical research, a synthesis of geographical knowledge and information technologies. The objective of geoinformation geography is to combine the chorological, systemic and historical approaches in geography on the basis of the systemic, statistical, logical and mathematical analysis methods. Geoinformation systems (GIS) are treated as models of geographical complexes. This paper discusses two problems: 1) analyzing the information units of a geographical complex; 2) developing the information base of geographical science (GIS); 3) generating and implementing fundamental principles of handling geoinformation (system analysis); 4) effective collection (geomonitoring), and 5) rational utilization (geologists) of information.

Конструктивность и эффективность проведения научно-исследовательских работ по географической тематике во многом связаны с умением работать с информацией, при этом выявляется размытость границ между собственно географией и ее, казалось бы, частной дисциплиной — геоинформатикой. Конечно, геоинформатика, особенно в ее прикладной части, намного выходит за рамки системы географических методов, вынося географические знания из сферы фундаментальной науки в область практики. Если ограничиваться областью научной геоинформатики, то ее проникновение, возможно еще недостаточное, в процесс географического познания определяет конкуренцию геоинформационных методов с традиционными методами географии, порождая виртуальный мир пространственно-координированных данных, способных при достаточной полноте заменить натурные наблюдения.

Безусловно, накопление географического опыта по принципу «быть и видеть» остается необходимым условием формирования научного профессионализма, особенно при сравнительном анализе ландшафтов, но наступает момент насыщения, когда описательные знания не устраивают ученого и требуется сформулировать естественные законы, смысл которых для географа в следующем: как ни разнообразен земной мир, но все в итоге одно и то же. Или иначе: все сравнимо, все подобно, перетекает одно в другое, отображается друг в друге. Там, где есть отображение, осуществляется натуральный информационный процесс, который можно заменить искусственным процессом обме-

на информации в ГИС. От этого будет большая польза для науки, если ГИС заполнена достоверными данными, например, данными дистанционного зондирования Земли, результатами инструментальных натурных наблюдений на стационарах, материалами мониторинговых исследований и др., а исследователь знает, как с ними работать.

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Геоинформационные системы широко внедряются в познавательный процесс. По мнению А. М. Берлянта [1], ГИС — это средство моделирования и познания природных и социально-экономических систем. Рассматривая ГИС как «организованную активность», Н. Крисман [2] среди прочих выделяет ее функцию оперирования данными, чтобы открывать новые отношения посредством интеграции различных информационных источников. Е. Парсонс [3] считает, что ГИС может быть образом мышления и способом принятия решений.

Исторически познавательная роль ГИС восходит к представлениям о картографическом методе познания [4], к пониманию необходимости развития картографии как познавательной науки, а не только технической дисциплины [5]. Геоинформационная сущность картографии заключается в трех методах картографического познания — это создание первичных карт, составление производных карт и исследование карт [4], которые переносятся на ГИС (первичные, производные и исследовательские ГИС). Во всех трех методах необходимо присутствие географического опыта и знания.

Рассуждая об истинном единстве географии и геоинформатики, необходимо говорить о создании *геоинформационной системы поддержки научных географических исследований* (ГИС-НГИ).

Научные информационные системы (НИС, Current Research Information Systems — CRIS) в основном рассматриваются как информационно-справочные, т. е. системы доступа к любой научной информации, включая базы данных, электронные библиотеки, сайты Интернета. Это важный класс систем, имеющих отношение к научному творчеству, но представляющих в основном вторичный и третичный потоки информации относительно исходных данных. Такой поток также должен попадать в переработку с включением результатов в подсистемы ГИС, но в целом он находится вне ГИС, составляя ее внешнее окружение, хотя с развитием Интернета такое противопоставление становится условным.

Главное, что отличает ГИС от такого окружения, — упорядоченность информации, ее дифференцированность, расслоенность, функциональная зависимость и, конечно, точная привязка к земному пространству. В потреблении и переработке информации ГИС становится похожей на живой организм с единой полифункциональной структурой и жизнеобеспечением. ГИС выборочно поглощает информацию и включает в свою структуру только ее жизненно важные элементы, т. е. имеющие научную новизну и достоверность, остальное отбрасывается за ненадобностью.

В таком представлении ГИС является моделью природных комплексов как саморегулируемых информационных систем. Эти системы возникают, если взаимодействие разнокачественных компонентов комплексов рассматривать как процессы передачи и преобразования информации в контексте кибернетического подхода [6]. При этом кибернетику следует понимать не просто как науку об управлении, а как науку об управлении сложными системами, подчеркивая комплексные свойства объекта управления, что ближе к представлениям системологов [7].

Сложные системы (комплексы) — это разнокачественные многоуровневые системы, требующие разнообразных средств и методов их изучения [8]. Для них приемлема постановка задачи многовариантного моделирования, проявляющегося в возможности параллельного использования информационных массивов, математических алгоритмов и способов отображения результатов моделирования, что стимулирует использование ГИС [9]. В последние годы в разных областях науки такой подход называется многометодным [10, 11].

В этом направлении развиваются ориентированные на решение картографических задач методы анализа для выяснения свойств пространственных явлений, их структуры, дифференциации, взаимосвязи, изменчивости во времени. В наиболее полном виде подобный анализ, по мнению К. А. Салищева [5], применяется «в комплексном системном картографировании как методе многостороннего и целостного отображения действительности картографическими средствами» (с. 7). Он считал, что для прогресса комплексного картографирования необходимо внедрение системных принципов. В контексте современных проблем такая постановка формализуется как задача «ГИС и системный анализ»: использование моделей и методов системного анализа для обработки данных ГИС с целью построения математических и картографических моделей оптимального управления.

Имеются первые опыты создания системно-аналитических ГИС поддержки научных исследований пространственно-временных процессов на основе экспертно-статистических моделей и методов с проектированием предметно-ориентированных ГИС [12].

Подобно тому, как существует техническая и географическая картография, должны различаться технические и географические ГИС. Техническая составляющая ГИС тесно связана с компьютерными технологиями и техникой картографического отображения информации. Географическое содержание ГИС базируется на географических знаниях, идеях картографирования, получающих техническую реализацию. Географические, в частности ландшафтные, ГИС организуют свою структуру на инвариантной ландшафтно-картографической основе, которая служит для построения карт производного тематического содержания. На этом базируется географическая технология ландшафтно-интерпретационного картографирования [13].

Технологию системного анализа [14–16] можно рассматривать в качестве алгоритмической основы проведения географической экспертизы [17]. ГИС создается как геоинформационный объект (модель) территории и исследуется с разных сторон экспертными или аналитическими методами. Процесс системного анализа включает несколько этапов, начиная с формирования первичного геоинформационного объекта (ГИС) через осознание проблем и задач, с ним связанных, затем формирования целей и моделей исследования, и заканчивая постановкой и решением оптимизационных задач и формулировкой рекомендаций. При этом совсем не важно, реализуется этот путь автоматически, в режиме «клиент-сервер», или ученый сам определяет, какой информационный ресурс или программное обеспечение ему использовать.

Исследовательский опыт показывает, что каждая географическая задача требует индивидуального способа решения, поэтому стандартизация процедур научного поиска необходима больше для обучения специалистов, чем для поиска нового знания. Само существование ГИС или стандартных программ поддержки научных исследований, например MATLAB, качественно меняет труд ученого-географа, причем простые и понятные алгоритмы Microsoft Excel позволяют наглядно и осознанно обработать данные или моделировать явление так, что результат оказывается ближе к истине, чем неосознанное использование сложных программных систем.

В процессе реализации процедур системного анализа не столько важно освоить общую схему работы, сколько иметь опыт формализации задачи на соответствующем системном языке, приводящей к решению проблемы. В качестве конструктивной основы исследования предлагается использовать методологию полисистемного анализа и моделирования [8, 11], которая, с одной стороны, является формой системного анализа, а с другой — содержит указания, как исследователю поступать в конкретной познавательной ситуации. Такой подход можно назвать проективным исследованием (моделированием), поскольку любые объекты и проблемы проецируются в разные системные плоскости, где анализируются на адекватной теоретической основе.

Таким образом, объект превращается в набор соответствующих математических моделей, проблема формулируется как задача, в соответствии с которой из множества моделей выбирается та, что приводит к решению проблемы. При решении сложных проблем возможно несколько постановок задач и моделей их решения, в результате чего появляется необходимость в *многометодных технологиях многовариантного моделирования*.

ГИС как геоинформационный объект инвариантна средствам и способам решения поставленных задач, т. е. потенциально должна содержать всю полноту информации для построения любой системной модели, решения каждой задачи.

Существуют явные преимущества использования ГИС: 1) контурная определенность каждого выдела; 2) массовость данных, содержащихся в базе данных ГИС; 3) связь данных с местоположением; 4) связь между собой данных одного местоположения; 3) типизация данных по условиям среды; 5) «оконтуренность» данных — связь с определенным контуром; 6) разновременность данных; 7) размещение объектов в разных пространственных ситуациях. В этом перечислении объединяются свойства типичности и индивидуальности данных ГИС, их пространственное и функциональное единство.

Разновременность данных, например различия стадий развития в сходных местоположениях, позволяет воспользоваться косвенными методами исследования динамики лесов, упорядочив восстановительные стадии по сукцессионному возрасту [18]. ГИС дает возможность автоматизировать процедуру составления матрицы соседства разнокачественных выделов. Граф степени смежности выделов может служить подсказкой для классификации типологических единиц [19]. Статистический анализ регрессионных связей различных свойств ландшафтных выделов [20] продолжает работы по картографированию связей явлений [21] для решения практических задач.

Количество исследовательских задач, качественно отличающихся от известных методов картометрии, продолжает увеличиваться благодаря внедрению в практику анализа данных ГИС и цифровой космической информации, новых математических методов, позволяющих создавать оригинальные алгоритмы обработки данных. На их основе формируются математические технологии безмодельной обработки данных.

Уникальные данные ГИС требуют и уникальных решений поставленных задач: получается так, что ни одна географическая задача не имеет стандартного решения, тип решения не повторяется, и всегда реализуется оригинальный ход мысли. Поэтому так важно хранение протоколов опытов решения конкретных задач, необходима публикация их в статьях как истории успеха, на примерах которой могут обучаться многие поколения географов.

ПОЛИСИСТЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для повышения достоверности решения исследовательских задач необходима методология упорядочения данных, знаний, моделей и теорий. Такая методология создается как аппарат полисистемного анализа и синтеза [8, 11]. Его основная идея заключается в том, что всегда можно ввести систему независимых координат, в пространстве которой любая информация может быть расслоена, т. е. спроецирована на любую координатную ось. В этом смысле всякая стоящая идея может быть оценена с разных независимых позиций, а множество «векторов» разнонаправленных идей изучено с позиций каждого координатного слоя и установлена логическая или функциональная связь образов идей в этом слое. В итоге вся информация раскладывается по полочкам, составляющим структуру интегрированных ГИС. Это новый, конструктивный этап развития инженерии знаний, который пока реализуется только в исследовательских лабораториях.

Связи образов объектов в координатном слое задаются процедурой переопределения [11, 20]. Смысл ее заключается в том, что все одно и то же, с точностью до изоморфизма, гомологических и гомотопических преобразований. Теория переопределяется в теорию за счет интерпретации (замены базовых понятий), модель переходит в модель через замену значений коэффициентов. Необходимо признать, что методы математического моделирования динамики многокомпонентных геосистем в настоящее время остаются недостаточно разработанными. Причина здесь не столько в том, что отсутствует методика моделирования или мало компонентных моделей описания процессов. Вопрос в другом — не известны закономерности варьирования коэффициентов моделей от места к месту при попытке применить модели для исследования новых ситуаций. Переопределение моделей через их гомотопическую эквивалентность, т. е. когда все коэффициенты модели зависят от некоторого одного числа (индекса), — путь совершенствования использования ГИС для решения прогнозных задач.

Рассмотрим в кратком изложении цикл решения геоинформационных задач методами полисистемного анализа на конкретном примере. Каждый природопользователь оценивает территорию с собственной точки зрения полезности, так что любой ландшафтный выдел, а следовательно — контур электронной карты ГИС, может иметь разные оценки, например (x_1, x_2) — оценка таежной территории с позиций нефтегазового и охотничьего промысла. Претендуя на один и тот же участок территории, пользователи вступают в конфликт интересов, что обычно бывает между руководителями предприятий и местным населением. Острота этих конфликтов задается некоторой симметричной по переменным функцией $x_3 = F(x_1, x_2)$. Необходимо выяснить вид этой функции и на основе электронных карт оценок $x_1(\xi), x_2(\xi)$ (ξ — координаты выделов) построить в ГИС карту конфликтных ситуаций $x_3(\xi) = F[x_1(\xi), x_2(\xi)]$.

Любая теория в полисистемной методологии [11, 20] индуцируется по образу и подобию понятий и аксиом общей теории систем. Различаются системы S_i , их изменения ΔS_i и действия D_i , порождающие эти изменения. Среди всего множества систем $\{S_i\}$ выделяются универсальные системы S , их изменения ΔS и действия D . Универсальные системы S — это всеобъемлющие (максимальные), открыто-замкнутые, саморазвивающиеся системы с инвариантом существования C . Общесистемные аксиомы задаются соотношениями (\forall — квантор всеобщности, читается «для всех»):

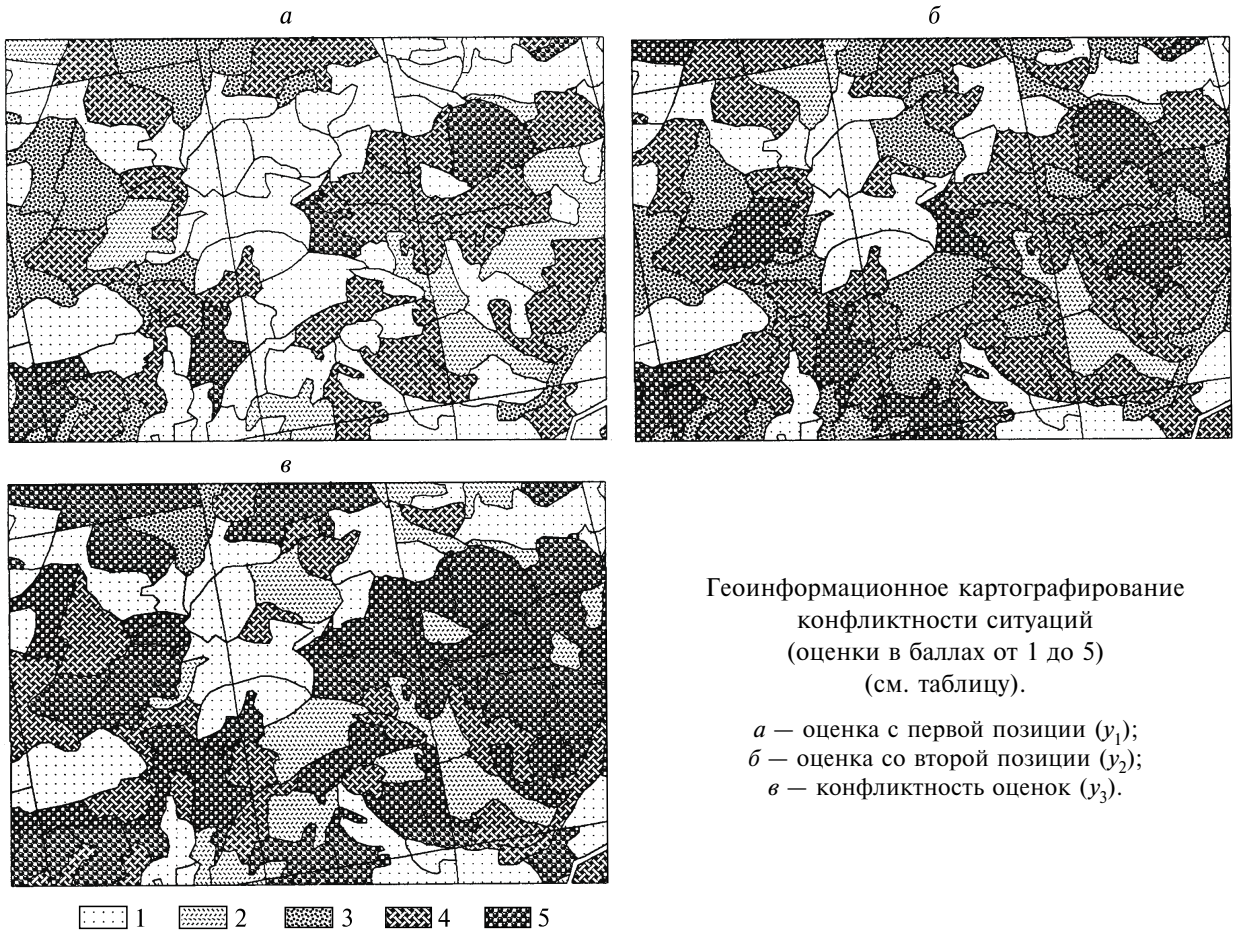
$$\forall S_i \forall \Delta S_i \forall D_i : 1) S = C, 2) \Delta S = C, 3) \Delta S_i = D_i. \quad (1)$$

Аксиомы 1 и 2 постулируют существование и изменение универсальной системы, аксиома 3 — закон, что всякое изменение есть результат действия.

Проинтерпретируем соотношения (1) в терминах оценки угодий. В качестве систем S_i рассмотрим оценки $x_i \in X_k$ и функции от них $x_k = F(X_k)$ ($X_k \subset X$). Множество всех оценок $X = \{x_i\}$ линейно упорядочено и имеет верхнюю x и нижнюю x_0 грани. Положим, что универсальными характеристиками обладают лучшие угодья, для которых наивысшая оценка $x = 1$, т. е. инвариант $C \rightarrow 1$. Изменение задается разностью $\Delta x_{ij} = x_i - x_j$. Отличие x_i от универсальной оценки $\Delta x_i = 1 - x_i$ называется дополнением x_i ($\bar{x}_i = \Delta x_i$). Действие в конфликте интересов определяется произведениями $d_{ij} = x_i \bar{x}_j$, $d_{ji} = x_j \bar{x}_i$, причем в общем случае $d_{ij} \neq d_{ji}$.

Такая интерпретация понятий порождает на основе (1) новую систему аксиом:

$$\forall x_i \forall \Delta x_{ij} \forall d_i : 1) x = 1, \quad 2) \Delta x = 1, \quad 3) \Delta x_{ik} = d_{ij}. \quad (2)$$



Геоинформационное картографирование
 конфликтности ситуаций
 (оценки в баллах от 1 до 5)
 (см. таблицу).

а — оценка с первой позиции (y_1);
б — оценка со второй позиции (y_2);
в — конфликтность оценок (y_3).

Аксиома 1 задает универсальное (максимальное) значение оценки $x = 1$, аксиома 2 — амплитуду изменения оценок, так что $x_0 = x - 1 = 1 - x = \bar{x} = 0$ — минимальное значение оценки равно дополнению x , т. е. равно 0. Действия сравнения минимальной и максимальной оценки (универсальное действие) $d = x\bar{x}_0 = 1$. Его дополнение $d_0 = 1 - d = x_0\bar{x} = 0$.

Аксиома 3 увязывает в единую систему изменения x_p, x_j, x_k . Согласно аксиоме 3 и данным определениям получаем $x_k - x_i = x_i\bar{x}_j$, откуда

$$x_k = x_i + x_j - x_i x_j. \quad (3)$$

Это уравнение позволяет рассчитать новое значение x_k по двум известным x_i, x_j , т. е. $x_k = F(x_i, x_j)$ — искомая функция. По этому же алгоритму можно рассчитать оценочную функцию любого количества переменных, например, для трех переменных: $x_k = x_i + x_j + x_r - x_i x_j - x_r x_i - x_r x_j + x_i x_j x_r$.

Это соотношение напоминает формулу расчета вероятности совместных событий, поэтому итоговое значение всегда изменяется в пределах $[0, 1]$. Однако такое ограничение в данном случае необязательно, поскольку реальная оценка y_i может изменяться в любых пределах $[y_{\max}, y_{\min}]$ и иметь разную размерность. Перевод в доли x_i осуществляется по простому уравнению $x_i = \frac{y_i - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}}$ [22], а обратно $y_i = x_i(y_{\max} - y_{\min}) + y_{\min}$. Расчеты лучше проводить в относительных единицах x_i , преобразуя показатели по данным формулам.

Рассмотрим случай оценки угодий по пятибалльной шкале в интервале значений $[1, 5]$ с двух позиций (y_1, y_2) (см. рисунок, *а* и *б*, таблицу). Эти значения преобразуются в относительные единицы (x_1, x_2), которые используются в формуле (3) при оценке и картографировании конфликта интересов x_3 и y_3 . В результате получаем итоговую оценочную карту (см. рисунок, *в*).

При высокой оценке угодий (5 баллов) разными участками конфликта напряженность отношений достигает

Синтез оценок y_3

Оценки y_1	Оценки y_2				
	1	2	3	4	5
1	1	2	3	4	5
2	2	2,75	3,5	4,25	5
3	3	3,5	4	4,5	5
4	4	4,25	4,5	4,75	5
5	5	5	5	5	5

максимальной величины — 5. Низкие оценки 1 соответствуют и невысокой конфликтности — 1. При средних оценках 3 итоговый результат 4,5 превышает исходные значения, т. е. целое больше каждой из частей. Условия максимизации оценок конфликта выводятся из чисто формальных соображений на основе предложенной модели: максимум x_3 достигается при $\partial x_3/\partial x_1 = \partial x_3/\partial x_2 = 0$. Отсюда и из (3) следует $1 - x_1 = 1 - x_2 = 0$, т. е. $x_1 = 1, x_2 = 1$ — максимальная конфликтность имеет место при самых высоких частных оценках.

Представленный пример сквозного решения задачи картографирования на основе общетеоретических представлений и специальных моделей достаточно прост и нагляден. В других случаях математический аппарат намного серьезней и сложнее [11]. В современном познавательном процессе используется пока ограниченное число моделей, так как о существовании других моделей, адекватных решаемым проблемам обработки информации, исследователи часто не догадываются.

Имеющиеся в географии модели являются концептуальными, не связанными с математическими формами анализа, а следовательно, не способны к саморазвитию. Причина в том, что в географии еще недостаточно используется математика, а также результаты исследования смежных наук. Следовательно, необходимо подготавливать новое поколение исследователей, сочетающих в себе аналитический дар с профессиональным знанием предмета и объекта исследования.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВЯЗИ

При использовании ГИС в исследовательском процессе возникает вопрос: каким образом пространственно-распределенные данные $x_i(\xi), x_2(\xi), x_3(\xi)$ ($\xi = (x, y, z, t)$ здесь пространственно-временные координаты) превращаются в разные системные модели $x_3(\xi) = F[x_1(\xi), x_2(\xi)]$ связи этих данных? Обычно считается, что все характеристики ландшафтных выделов функционально зависимы. Но каким образом зависимость показателей от пространственного положения превращается в функциональную связь?

Пространственно распределенная и изменяющаяся во времени характеристика $x_i = x_i(x, y, z, t)$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) территориальной системы образует непрерывное, переменное и неоднородное скалярное поле значений. Степень неоднородности определяется векторным полем градиента переменной x_i :

$$\text{grad } x_i = \frac{\partial x_i}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial x_i}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial x_i}{\partial z} \mathbf{k}, \quad (4)$$

где $x'_{xi} = \frac{\partial x_i}{\partial x}, x'_{yi} = \frac{\partial x_i}{\partial y}, x'_{zi} = \frac{\partial x_i}{\partial z}$ — частные градиенты значений скалярного поля $x_i(x, y, z, t)$ по независимым (ортогональным) направлениям, задаваемым ортами $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$. Они характеризуют неоднородность местности и являются дополнительными переменными характеристиками территории, как, впрочем, и производные более высокого порядка по координатам ($x''_{xi}, x''_{yi}, x''_{zi}$). Их легко рассчитать по карте или космическому снимку, найдя разность значений $\Delta x_i = x_i(x + \Delta x) - x_i(x)$ между ближайшими точками x и $x + \Delta x$ и деля эту разность на расстояние Δx между точками:

$$x'_{xi} \approx \frac{\Delta x_i}{\Delta x}. \quad (5)$$

Частная производная $x_i(x, y, z, t)$ по времени $x'_{ti} = \frac{\partial x_i}{\partial t}$ отражает скорость изменения x_i .

Из математического анализа известно, что факт наличия связи между характеристиками x_i и x_j в пространстве двух параметров (x, y) устанавливается с помощью определителя Якоби (якобиана) [22]:

$$J = \frac{D(x_i, x_j)}{D(x, y)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial x_i}{\partial x} & \frac{\partial x_i}{\partial y} \\ \frac{\partial x_j}{\partial x} & \frac{\partial x_j}{\partial y} \end{vmatrix} = \frac{\partial x_i}{\partial x} \frac{\partial x_j}{\partial y} - \frac{\partial x_j}{\partial x} \frac{\partial x_i}{\partial y}. \quad (6)$$

Связь имеет место, если $J = 0$, в противном случае $J \neq 0$ — связь отсутствует. Степень близости (по абсолютной величине) J к 0 может служить критерием связности x_i и x_j , т. е. существования зависимости $x_i = f(x_j)$, или

$$\varphi(x_i, x_j) = c, \quad (7)$$

где c — константа. В случае, если связи линейны

$$x_i = a_{xi}x + a_{yi}y, \quad x_j = a_{xj}x + a_{yj}y, \quad (8)$$

зависимость x_i от x_j существует не всегда, а только при наличии пропорции $a_{xi}/a_{yi} = a_{xj}/a_{yj}$.

Аналогичным способом можно проверить связность четырех переменных по критерию $J = \frac{D(x_1, x_2, x_3, x_4)}{D(x, y, z, t)}$. Особенность нашего четырехмерного пространства-времени позволяет одновременно оценивать связность по J не более четырех характеристик. Это можно гипотетически считать фундаментальным ограничением на сложность природных зависимостей: существуют только функции связи четырех (не более) переменных

$$\varphi(x_1, x_2, x_3, x_4) = c, \quad (9)$$

т. е. одна переменная является функцией (сверткой) не более трех независимых переменных. Этот результат накладывает ограничения не столько на число независимых переменных (за счет вложения, суперпозиции — функций от функций их может быть достаточно много), сколько на вид самой функции и информационную емкость этих переменных: всегда найдется три характеристики географической системы, функция которых дает четвертую характеристику, как правило, отражающую более фундаментальные свойства [13].

С математической точки зрения [22] равенство $J = 0$ для функций $x_i = x_i(x, y)$ и $x_j = x_j(x, y)$ соответствует вырожденному преобразованию некоторой области пространства (x, y) в линию на плоскости (x_i, x_j) вида $x_i = f(x_j)$, или (7). Иными словами, множеству точек на плоскости (x, y) соответствует функциональная зависимость $x_i = f(x_j)$, и в этом смысле точки плоскости (x, y) оказываются эквивалентны, т. е. относятся к одному функциональному типу. Следовательно, разные зависимости $x_i = f_k(x_j)$ одних и тех же характеристик (x_i, x_j) разбивают пространство $G = (x, y)$ на множество непересекающихся ареалов G_k . Это может служить основой для разработки методов дифференциации физико-географического пространства на функционально однородные выделы, что используется, в частности, для обработки растровых космических снимков [11].

При преобразовании пространств $(x, y) \rightarrow (x_i, x_j)$ в функциональных зависимостях $x_i = f_k(x_j)$ теряются первичные параметры x и y . Такое преобразование при $J = 0$, когда двумерное пространство переводится в систему функциональных линий, называется вырожденным. При $J \neq 0$ получается невырожденное преобразование, когда в зависимости $x_i = f_k(x_j)$ явно присутствуют пространственные координаты (x, y) . Пространство (x_i, x_j) называется пространством ординации.

Ареалы G_k являются функционально однородными, если в их границах сохраняется один k -й тип функциональных связей $x_i = f_k(x_j)$, который в соседнем ареале G_l переходит в другой тип связи $x_i = f_l(x_j)$. На границе связь отсутствует ($J \neq 0$), и граница выражается в переходе одного типа связи в другой $f_k \rightarrow f_l$. Следовательно, условие невырожденного преобразования $J \neq 0$ указывает на наличие границы функциональных выделов или любое другое нарушение функциональных связей, чем всегда можно воспользоваться при обработке данных для выделения границ и оценки нарушенности земель.

В. Б. Сочава [23], разрабатывая в 1960-е гг. методы комплексной ординации при стационарных исследованиях, ставил задачу выявления формул «главнейших взаимосвязей между компонентами геосистемы» (с. 130). Такие формулы до настоящего времени не получены в силу неоднородности выборки географических данных, связи которых меняются от места к месту и со временем. Однако сам факт существования связи мог бы быть установлен по критерию Якоби по пространственно-распределенным данным, когда наблюдения проводятся в пространстве по пикетам трансекта определенной ширины, а не по пробным площадям, обычно линейно упорядоченным по профилю трансекта. Сейчас такие возможности предоставляют многоканальные растровые космические снимки высокого разрешения, частично компенсирующие недостаток наземных данных.

Критерий Якоби эффективно может быть использован для оценки сходства и различия функционально-однородных ареалов G_k , поскольку якобиан играет важную роль в теории неявных функций вида (7). Функциональные связи $x_i = f_k(x_j)$ и $x_i = f_l(x_j)$ могут быть преобразованы в соотношения

$$\varphi_k(x_i, x_j) = c_k, \quad \varphi_l(x_i, x_j) = c_l, \quad (10)$$

где c_k, c_l — индивидуальные константы. Пусть, например, f_k, f_l — степенные функции, широко распространенные в приложениях:

$$x_i = a_k x_j^{b_k}, \quad x_i = a_l x_j^{b_l}, \quad (11)$$

где a_k, b_k, a_l, b_l — индивидуальные константы. После логарифмирования и несложных преобразований (11) приводится к виду (10):

$$\ln x_i - b_k \ln x_j = \ln a_k, \quad \ln x_i - b_l \ln x_j = \ln a_l. \quad (12)$$

Функции (10) различны, если

$$J = \frac{D(\varphi_k, \varphi_l)}{D(x_i, x_j)} \neq 0. \quad (13)$$

В противном случае функции совпадают, и соответствующие им ареалы функционально идентичны. В уравнении (12) по критерию Якоби $J = \frac{D(\varphi_k, \varphi_l)}{D(\ln x_i, \ln x_j)} \neq 0$ идентичность функций и функциональных ареалов достигается при совпадении коэффициентов $b_k = b_l$.

Всякая функциональная зависимость двух переменных вида (10) может рассматриваться как решение системы двух уравнений трех переменных

$$\Phi_1(x_i, x_j, x_1) = c_1, \Phi_2(x_i, x_j, x_1) = c_2, \quad (14)$$

т. е. функция $\varphi(x_i, x_j) = c$ есть линия пересечения двух поверхностей (14), их граница. Иначе, чтобы для функциональной зоны существовала точная зависимость двух характеристик $\varphi(x_i, x_j) = c$ необходимо существование для данной зоны двух независимых функций трех переменных (14) или, обобщая, трех независимых функций четырех переменных.

Иными словами, однородные функциональные зоны допускают полифункциональность связей в четырехмерном пространстве (x, y, z, t) , если имеют место корректные связи на плоскости (x, y) . Как показывает опыт географических исследований, парные связи действительно часто реализуются, что позволяет говорить о полифункциональности связей в общем случае. Для появления границ на плоскости должна существовать система из четырех независимых функций четырех независимых переменных — все функции пересекаются в одной точке.

Связи $x_1(\xi)$ и $x_2(\xi)$ можно выявлять не только в физическом пространстве $\xi = (x, y, z, t)$, но и в любом многомерном, например пространстве классификационных (ординационных) координат ξ_1 . Понятно, что если зависимость $x_1(\xi)$ от $x_2(\xi)$ существует, то она существует и в разных пространствах ξ и ξ_1 , т. е. инвариантна всем фундаментальным параметрическим пространствам. Это возможно, если существует однозначная зависимость $\xi = \xi(\xi_1)$, переводящая географические координаты в классификационные.

Поскольку существует функциональная сопряженность пространственных координат $\Phi(x, y, z, t) = c$, выражающаяся в формах рельефа и его изменении, то должно существовать вырожденное преобразование $J = D(\xi)/D(\xi_1) = 0$, переводящее классификационные формы в пространственные при соблюдении некоторого баланса (пропорций) изменений в каждом из пространств. В реальности это проявляется в закономерностях сопряженного пространственного размещения разнотипных фаций, например вдоль склона (катена). Географическими, классификационными и ординационными пространствами, по всей видимости, не ограничиваются параметрические представления геосистемных свойств. В каждом случае инвариантность функциональных связей данных свойств, т. е. проявление законов природы, относительно этих пространств увязывает пространства через взаимно однозначные преобразования.

Функциональная связь свойств в такой интерпретации инвариантна также содержанию системных моделей представления этих связей: существует множество моделей описания наблюдаемых связей, в чем проявляется полимодельность всех явлений, с одной стороны, а с другой — приходим к выводу, что разные модели выявления связей должны давать эквивалентные результаты, в частности, при выделении сетки границ функционально-однородных ареалов геомеров при ландшафтном картографировании.

Выявление подобных инвариантных структур и связей основано на математических технологиях, базирующихся на теоремах математики, смысл которых, очевидно, не зависит от конкретной модельной интерпретации исследуемых закономерностей. Математические технологии формируют безмодельный подход к анализу географических данных и открывают возможности объективизации такого анализа.

Сделанные выводы определяют правила работы с функциональными зависимостями в ГИС, критерии выделения однородных функциональных зон и смысл функциональных границ как точек или линий пересечения функциональных зависимостей. По А. Г. Исаченко [24], современная география базируется на трех подходах: хронологическом, системном и историко-генетическом. Существование функциональных зависимостей пространственно распределенных данных указывает на единство хронологического и системного подходов. Исторический анализ проистекает из анализа функциональных связей характеристик географических объектов и их временных изменений.

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ

Геоинформатика базируется на данных и знаниях о пространственно распределенных объектах с учетом не только геометрии и топологии географического пространства, но и сведений о связях ка-

ественных и количественных характеристик территориальных объектов. Как правило, массив данных подвергается осмыслению и практически используется при решении многих задач с помощью геоинформационных систем. Причем речь идет не только о предварительной обработке и картографическом представлении информации, а о глубоком теоретическом и математическом анализе информации с получением новых знаний и алгоритмов для ответов на самые сложные вопросы теории и практики. Подобная задача решается в рамках создания интегрированных ГИС.

Расширение и усложнение современных задач географических исследований требуют совершенствования уровня геоинформатики. В свою очередь развитие геоинформационных исследований предъявляет свои требования к географии. Эти две науки различаются лишь объектом исследования: для географии он реальный, для геоинформатики — виртуальный, геоинформационный объект как отправной пункт системного анализа. В соответствии с номенклатурой специальностей, география непосредственно изучает «законы» жизни природы и общества, а геоинформатика — «законы» работы с географической информацией. Эти законы взаимосвязаны.

Справедливо было бы считать, что геоинформатика косвенными методами изучает территориальное пространство, т. е. законы геоинформатики есть законы познания географических законов, или законы теории и технологии познания, в частности системного анализа. Следовательно, геоинформатика, по сути, есть наука о единстве геомониторинга, ГИС и системного анализа.

Таким образом, геоинформатика — это система географического познания мира, основанная на правильной (научной) работе с географической информацией, а главное, это доказательное решение географических проблем с высокой (географической) точностью.

Геоинформатика как косвенный способ изучения географической реальности развивается параллельно с собственно географическими исследованиями, опираясь на методы автоматического сбора и обработки информации. При этом используемые аналитико-расчетные схемы должны основываться, с одной стороны, на формальных, математических методах и программных средствах, а с другой — на знании естественных закономерностей, фиксируемых в моделях как концентратах географических знаний. Все это приводит к лучшему и точному пониманию законов жизни природы и общества, к открытию новых закономерностей, созданию современных моделей системного анализа.

Работа с данными натурных исследований в рамках географической науки превращается в работу с данными в рамках геоинформатики. Такое обоснованное отчуждение данных в пользу геоинформатики наводит на мысль, что различие между двумя науками заключается в том, что географы работают в поле, а специалисты по геоинформатике предпочитают решать свои задачи за компьютером. И тот, и другой варианты научной деятельности допустимы, но целью современного этапа развития географии должно стать совмещение двух подходов: необходимо знание и природы, и технологии ее изучения. Поэтому следует формировать своеобразный исследовательский комплекс: или из универсальных географов, или группы из специалистов — географов и математиков.

Такую науку с полным правом можно назвать (*гео*)информационной географией, целью исследований которой является прямое и косвенное познание законов географической среды геоинформационными средствами. При этом натурные исследования проводятся с использованием инструментальных средств, с формированием и применением геоинформационных систем, аналитических, статистических и логических методов обработки информации, с созданием баз данных, знаний, моделей и теорий. В отличие от географической информатики (геоинформатики) геоинформационная география нацелена на познание непосредственно географической реальности через глубокую переработку данных и знаний о территориальных комплексах.

Геоинформационная география становится не просто синтезом методов географии и геоинформатики, но подразумевает существование объективных основ этого синтеза, когда структура и функции ГИС отображают структуру и функцию географических комплексов, а сами геокомплексы можно трактовать как геоинформационные системы. Поэтому геоинформационная география — это также наука о передаче информации взаимодействия компонентов географической среды от локального до глобального уровня. С другой стороны, ГИС — комплекс информации, когда свидетельства из различных источников дополняют друг друга, что становится основой проверки их достоверности и решения задач индикации одних данных по другим.

Отсюда геоинформационная география имеет пять основных аспектов исследований: 1) изучение информационной связи частей географического целого; 2) создание информационной базы географической науки — ГИС; 3) формирование и использование теоретических основ работы с геоинформацией (системный анализ); 4) эффективный сбор (геомониторинг); 5) рациональное использование (геологистика) информации.

Сквозное направление геоинформационных исследований — выделение инвариантов географических процессов и явлений и поиск законов варьирования их проявлений на местности. В этом

заключается существо геоинформационного обеспечения (инвентаризация и обоснование) принятия решений в области устойчивого, сбалансированного по всем компонентам существования и развития территории.

Таким образом, теоретический фундамент геоинформационной географии формируется на основе системных и географических знаний и математических результатов. Это современный этап развития методологии географического познания, когда сохраняется преемственность с базовыми идеями географической науки, которые переосмысливаются и развиваются на фоне общенаучных знаний с использованием новейших технологий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Интеграционного междисциплинарного проекта СО РАН (№ 34).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянт А. М. Географические информационные системы в науках о Земле // Соросовский общеобразовательный журнал. — 1999. — № 5.
2. Chrisman N. Exploring geographic information systems. — New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
3. Parsons E. The Essential Guide to GIS // Геоинформатика в нефтегазовой отрасли. — М.: ГИС-Ассоциация, 1998.
4. Салищев К. А. О картографическом методе познания (анализ некоторых представлений о картографии) // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. — 1975. — № 1.
5. Салищев К. А. Картография и ее место в системе наук // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. — 1980. — № 1.
6. Арманд А. Д. Природные комплексы как саморегулируемые информационные системы // Изв. АН СССР. Сер. геогр. — 1966. — № 2.
7. Дружинин В. В., Конторов Д. С. Проблемы системологии. Проблемы теории сложных систем. — М.: Сов. радио, 1976.
8. Черкашин А. К. Полисистемный анализ и синтез. Приложение в географии. — Новосибирск: Наука, 1997.
9. Тикунов В. С. Многовариантность моделирования географических систем // Изв. АН СССР. Сер. геогр. — 1990. — № 5.
10. Тятюшкин А. И. Многометодная технология для расчета оптимального управления // Изв. РАН. Сер. Теория и системы управления. — 2003. — № 3.
11. Черкашин А. К. Полисистемное моделирование. — Новосибирск: Наука, 2005.
12. Гитис В. Г., Ермаков Б. В. Основы пространственно-временного прогнозирования в геоинформатике. — М.: Физматлит, 2004.
13. Ландшафтно-интерпретационное картографирование. — Новосибирск: Наука, 2005.
14. Квейд Э. Анализ сложных систем. — М.: Сов. радио, 1969.
15. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. — М.: Наука, 1981.
16. Клир Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач. — М.: Радио и связь, 1990.
17. Черкашин А. К. Полисистемные принципы географической экспертизы // Географическая экспертиза хозяйственного освоения территории. — Новосибирск: Наука, 1992.
18. Мясникова С. И., Черкашин А. К. Геоинформационные системы в реализации последовательности процедур системного анализа // ИнтерКарто/ИнтерГИС 10: устойчивое развитие территорий: геоинформационное обеспечение и практический опыт. — Владивосток; Чанчунь (КНР): МКА, 2004.
19. Филиппская С. В., Черкашин А. К. Классификация геосистем бассейна озера Байкал на основе принципов пространственной и системной организации // Современные проблемы географии и природопользования. — 2001. — № 7.
20. Владимиров И. Н., Истомина Е. А., Латышева А. В. и др. Интегрированные ГИС полисистемного картографирования // ГИС для устойчивого развития территории. — Новороссийск; Севастополь, 2003.
21. Берлянт А. М. Карты взаимосвязи явлений и их применение в географических исследованиях // Вестн. МГУ. Сер. геогр. — 1972. — № 1.
22. Крауклис А. А. Проблемы экспериментального ландшафтоведения. — Новосибирск: Наука, 1979.
23. Воскобойников В. В. Метод функциональной системы. — Новосибирск: Наука, 1992.
24. Сочава В. Б. Теоретическая и прикладная география. — Новосибирск: Наука, 2005.
25. Исаченко А. Г. Теория и методология географической науки. — М.: Академия, 2004.

*Институт географии СО РАН,
Иркутск*

*Поступила в редакцию
10 марта 2006 г.*