

Эволюционное геоинформационное моделирование и картографирование

А.А.Фролов, А.К.Черкашин

Происходящее изменение климата определяет преобразование облика ландшафтов, которое необходимо представить на оценочных и прогнозных картах. Создание подобных карт – одно из важных направлений системного тематического картографирования. Системное картографирование в соответствии с «формулой Салищева» [1] отображает географическую систему системными методами в системе карт (карты). Реализация этого алгоритма подразумевает использование моделей и методов системного анализа, включающего процедуры формирования информационного образа (базы данных ГИС) территории, формулировкой проблемы, определением цели и оценочных критериев, формулировкой задачи, созданием, идентификацией и анализом математической модели с выбором оптимального решения под заданный критерий, прогнозом и подготовкой рекомендаций [2]. В соответствии с этим должны различаться целевые установки картографических исследований, методические подходы при картографировании и содержание системных карт.

По особенностям решения задач различаются соответственно объектно-ориентированные, проблемно-, целе-, предметно-ориентированные и т.д. подходы, что сближает процесс картографирования, например, с объектно-ориентированным программированием и моделированием [3,4]. Аналогично в рамках системного картографирования выделяются методические направления объектного, проблемного, оценочного, предметного, оптимизационного, прогнозного и рекомендательного картографирования. Наконец, сами карты и атласные системы карт в условных обозначениях, структуре легенды и анимационных средствах должны содержать в себе возможности реализации соответствующего этапа системного анализа, т.е. информировать, помогать решать проблему, давать оценки, обеспечивать прогноз, принятие решений по ситуации и т.д.

Одним из практически и теоретически значимых видов является прогнозно-ориентированное картографирование, которое также можно назвать эволюционным картографированием, понимая под этим, по формуле Салищева, отображение эволюционной изменчивости географических систем (ландшафтов, территорий) средствами эволюционного моделирования в форме эволюционирующих карт. В этом смысле карта понимается как виртуальная саморазвивающаяся активная среда, имитирующая с помощью математических моделей динамических процессов закономерную смену состояний участков территории в результате проявления климатических трендов и антропогенных воздействий. Методическая основа такого подхода традиционна для картографии, в современном понимании связана с термином «клеточная география» [5] и с формированием и картографическим анализом регулярных и иррегулярных grid-структур с использованием моделей клеточных автоматов, искусственных нейронных сетей и геоинформационных технологий, обеспечивающих визуальное компьютерное моделирование процессов. Реализуемый при этом активный вычислительный эксперимент предусматривает возможность [4] визуализации результатов моделирования в течение всего эксперимента, интерактивного вмешательства пользователя в ход эксперимента, использование 2D и 3D-анимации, в том числе в интерактивном режиме. Т. Кохенен [6], создавая методы нейросетевого анализа, рассматривал связи явлений как саморазвивающиеся карты, имея при этом в виду модели сетей нейронов мозга. Этот метод нашел широкое приложение при автоматизации тематического дешифрирования космических снимков [7,8].

В эволюционном картографировании ландшафтов выделяется два основных способа изменения карт, когда: 1) преобразуется лишь типологическое содержание каждого контура без искажения его границ; 2) варьируют границы геосистем в результате эндо- и экзогенной трансформации рельефа, видоизменения коренных пород и почв, появления или исчезновения барьеров и др. Изменения первого рода осуществляются на установившейся (устойчивой) сетке ландшафтных границ и проявляются, в частности, в результате колебаний характеристик зонального и глобального фона. Второго рода изменения обу-

словлены факторами геологической эволюции и катастрофических смен естественного и антропогенного происхождения. В обоих случаях обычно проходит трансформация типологического, а, следовательно, и классификационного содержания ландшафтных выделов, т.е. образ объекта перемещается в системе классификации геосистем и в легенде карты на одну или несколько позиций. Знание закономерностей этого процесса позволяет строить прогнозы эволюции ландшафтов, когда учитывается изменение сущности каждой геосистемы на территории.

Эволюция картографического изображения построена на пространственно распределенных математических моделях, учитывающих различные формы связности географических систем. Обычно эти модели создаются в виде систем дифференциальных уравнений пространственно-временной динамики геосистемных характеристик или во многом аналогичных им сети клеточных автоматов или нейросетевых моделей. Клеточный автомат (КА) является дискретной динамической системой, поведение которой полностью определяется в терминах закономерностей локальных взаимодействий ячеек сети [9]. Преимущества моделей сетей КА для эволюционного картографирования состоят в учете пространственно-временной дискретности геоизображения территории, пространственного взаимодействия выделов, изменения их индивидуальных характеристик и пороговых эффектов смены состояний.

КА задается геометрической и топологической структурой дискретного пространства, элементами которого являются клетки, а связи определяются межклеточными взаимодействиями. Задаются пространственные координаты клеток и метрики межклеточного расстояния. Каждая клетка кодируется переменным значением, определяющим ее состояние. Совокупность состояний всех клеток структуры называется состоянием решетки и визуализируется картографически. Изменение состояния клеток задается правилами, реализуемыми с дискретным шагом по времени в форме итераций. Правила определяют новое состояние клетки в зависимости от ее текущего состояния и/или состояний клеток ее окружения.

ГИС-вариант фрагмента ландшафтной карты для горной территории южного Прибайкалья (рис. 1а) [10] представлен дискретными элементами-контурами групп фаций разной серийности (коренные, мнимокоренные и серийные), что характеризует состояния клеток геоизображения. Соответствующие участки ландшафта на местности взаимодействуют по горизонтали, вертикали и по иерархии соподчинения. В модели КА совокупность картографируемых клеток формирует иррегулярную сеть соседства (рис. 1б). Граф соседства отражает топологию ландшафтного пространства взаимодействия: контуры соответствуют вершинам, связи – ребрам графа. Здесь два контура связаны ребром, если имеют общую границу. Каждое ребро интерпретируется как пара обратно направленных стрелок воздействия. Вес ребра характеризуется протяженностью общих границ пары соседних контуров, вес стрелки – доля этой протяженности в общей длине границы контура, куда направлена стрелка.

Помимо типологической принадлежности на уровне группы фаций каждый контур характеризуется длиной границ, общей площадью и переменными физико-географическими показателями, например высотой положения над ур.м., комплексно отражающей влияние разнообразных факторов.

Соседние контуры (ландшафтные выделы) взаимодействуют между собой латерально и в системе иерархического подчинения. Изменение состояния каждого контура, например, в условиях антропогенного воздействия, по цепи причинных связей сказывается на изменении состояний соседних контуров. Климатические колебания на уровне глобальных систем влияют на характеристики региональных и локальных подразделений географической среды. Подобные влияния реализуются поэтапно и проявляются индивидуально в зависимости от особенностей латерально-иерархического окружения. На каждом шаге формируются новое состояние решетки и адекватная ей прогнозная карта.

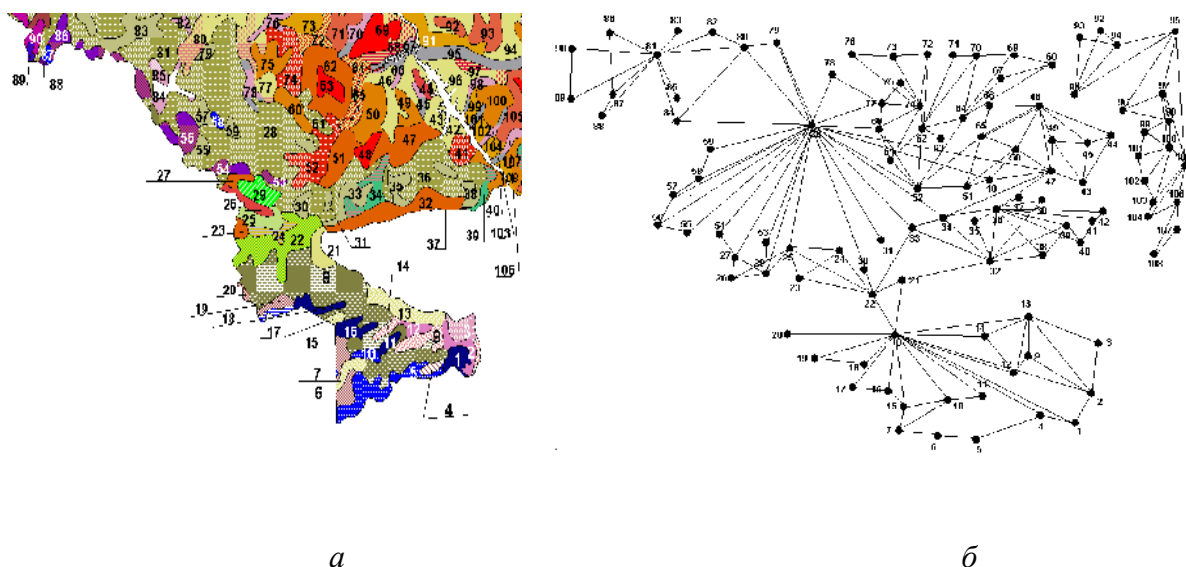


Рис. 1. Фрагмент электронной карты ландшафтов Юга Восточной Сибири [10] (а) и граф смежности картографических контуров (б). Цифрами указаны порядковые номера контуров групп фаций.

Такая картографическая модель обладает всеми свойствами КА: 1) она представлена нерегулярной решёткой картографических контуров; 2) на решётке определена окрестность каждого контура из примыкающих к нему контуров; 3) определено множество состояний каждого контура; 4) описаны правила пространственной и иерархической связности, обладающие свойством локальности, когда на каждую клетку влияют только клетки окрестности; 5) автомат работает итерационно, и результат каждой итерации выводится в виде новой карты состояния.

Требования локальности взаимодействия делает необходимым задание граничных условий на границе решетки контуров. Лучше, если внешние влияния будут минимальны (равны 0). Это достигается путем деления пространства территории на несколько несвязанных (автономных) районов, разграниченных естественными рубежами (водоразделами и руслами рек). Тогда граф соседства распадается не несколько подграфов, не связанных ребрами. Участок южного Прибайкалья (см. рис.1) разграничивается хребтами гор Хамар-Дабана и Восточных Саян (северные макросклоны), озером Байкал, руслами рек Ангары и ее притоков. Здесь выделяется три относительно автономных района: 1) восточно-саянский; 2) хамар-дабанский; 3) верхнеангарский правобережный. Далее подробно исследуется второй из них.

Формализованная по критериям КА картографическое изображение представляет собой систему, развивающуюся по принципам эволюции географической среды, и чем более точно эти принципы отображены в правилах КА, тем корректнее имитирует реальные процессы такое геоизображение.

Клеточный конечный автомат – математический объект, заданный пятеркой множеств $KA=(X,Y,Z,F,G)$, где X – конечное множество входных сигналов $x_i \in X$ (i – номер клетки (картографического контура), $i=1, \dots, n$); Y – конечное множество выходных сигналов $y_i \in Y$; Z – конечное множество состояний контуров карты $z_i \in Z$; $F: X \times Z \rightarrow Z$ – функция перехода контуров карты ($f_i \in F$), сопоставляющая каждому текущему сочетанию (x_i, z_i) контура новое значение z_i ; $G: X \times Z \rightarrow Y$ – функция выходов карты ($g_i \in G$), преломляющая вход x_i каждого контура через ее состояние z_i в выход y_i .

Все элементы множеств конечного автомата, а именно x_i, y_i, z_i, f_i, g_i , могут являться наборами (векторами) нескольких переменных, например, $x_i = \{x_{ij}\}$, где x_{ij} – вход в i -й картографический контур из j -х контуров окрестности. Далее рассматривается упрощен-

ный вариант модели с одной переменной состояния, одной переменной выходного сигнала, одинаковой для конкретной клетки по всем направлениям воздействия.

Необходимы три вида переменных высоты $Z : z(\xi)$ – абсолютная высота местоположения ξ геосистем в горном ландшафте, $z_i(t, \xi)$ – текущее состояние геосистем i -й группы фаций в разных местоположениях ξ ; z_{0i} – характеристика фаций i -й группы. На участке территории $z(\xi)$ в зависимости от особенностей климатического фона могут размещаться разные фации i с индексом z_{0i} , однозначно выделяющие группу фаций по условиям местоположения из множества других фаций. Это может быть, например, высота местоположения, характерная для группы фации в эпоху, предшествующую трансформации климата, – оптимуму ее существования в этот период, своеобразный эталон для сравнения, модальная величина распределения этой группы фаций на территории. Текущее состояние геосистемы $z_i(t, \xi)$ этого положения изменяется в результате изменения климатического фона и взаимодействия с соседними участками ландшафта. В интервале значений $z_i = z_{0i} \pm \Delta z_{0i}$ геосистема сохраняет природные режимы, свойственные фации группы i ; за их пределами она переходит в фацию другой группы. Ширина природной ниши группы фации $z_i(t, \xi) \in [z_{ni}, z_{vi}]$, где $z_{ni} = z_{0i} - \Delta z_{0i}$ – нижняя граница, $z_{vi} = z_{0i} + \Delta z_{0i}$ – верхняя граница существования.

Конкретная геосистема имеет фиксированное положение $z(\xi)$, а в ходе эволюции перемещаются фации, занимая новые позиции в пространстве z , вытесняя другие фации. В результате происходит смена фациального состояния конкретных геосистем. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока фация определенного типа не достигнет вершин горной системы, а затем исчезнет из процесса, потеряв материальный носитель своего продвижения (геосистему). Иными словами, эволюционный процесс ограничен сверху некоторым значением высоты местоположения $z_i(t, \xi) \leq z = z_m$.

Текущее изменение состояния геосистемы $z_i(t)$ итеративно определяется функцией действия f_i :

$$\Delta z_i(t) = z_i(t+1) - z_i(t) = f_i[z_i(t), x_i(t)] \quad (1)$$

Действие $f_i(\cdot)$ задается в форме:

$$f_i(z_i, x_i) = \sum_j a_{ji} \langle z_j - z_{0j} \rangle + \sum_j b_{ji} \langle x_j - x_{0j} \rangle + f_{0i}. \quad (2)$$

Коэффициенты a_{ij} и b_{ij} соответствуют весам воздействия окружающих геосистем (j) на данную i -ю геосистему. Значение f_{0i} учитывает влияние внешнего фона. Операция вида $\langle \cdot \rangle$ моделирует пороговое воздействие, например, $\langle z_i - z_{0i} \rangle$ равно $(z_i - z_{0i})$ в области существования $z_{ni} < z_i < z_{vi}$ геосистемы в состоянии i -типа; при выходе за указанные границы она существует и воздействует как геосистема другого типа. Здесь реализуется ситуация, как при десятичном счете, когда в i -м разряде числа, прибавляя к 9 единицу получаем 10, т.е. увеличиваем следующий $(i+1)$ разряд на 1, а, отнимая от 0 единицу, уменьшаем $(i+1)$ разряд на 1; в интервале значений $z_i \in (0, 9)$ между -1 и 10 скачкообразных изменений нет. В случае геосистемной динамики процесс осложняется тем, что области существования различных типов геосистем накладываются друг на друга и переплетаются в пространственных взаимодействиях, что заставляет различать движение «вправо» и «влево» и приводит к гистерезисному эффекту – неэквивалентности пути изменений системы в разных направлениях.

При извлечении конкретных правил работы КА из пространственной информации используются топографические, палеогеографические и ландшафтные данные и геоинформационные технологии. В уравнении (2) свяжем функции входа-выхода только с состоянием взаимодействующих геосистем z_i , когда можно условно принять $b_{ij}=0$. Высотные характеристики выделов определяются в ГИС при совмещении контуров ландшафтной карты и цифровой карты рельефа. Значение $z_i(t, \xi)$ рассчитывается как средняя высота каждого контура ξ . Величина z_{0i} находится как модальное значение распределения площади геосистем i -й группы фаций в регионе (Прибайкалье) по высоте местоположения z [11]. Упорядоченная последовательность значений z_{0i} фаций одного типа серийности дает пред-

ставление об допустимых интервалах изменчивости (z_{ni}, z_{vi}) каждой группы фаций. Коэффициент взаимодействия a_{ji} находится по формуле $a_{ji} = a_i P_{ji} (S_j / S_i)$, где S_j, S_i – площади взаимодействующих картографируемых выделов j и i , P_{ji} – доля длины общей границы j и i относительно общей протяженности границы выдела i ($P_{ii}=1$).

Значение коэффициента влияния $a_{ii} = a_i = 1/\tau_i$ отражает процесс саморегуляции геосистемы i -го типа и связан с характерным временем τ_i самовосстановления. Его значение определяется по скорости смещения высоты положения снеговой линии $\Delta h/\Delta t$ относительно ее современного уровня для хр. Хамар-Дабан – $h=1630$ м (примерно $\Delta h = 650$ м за $\Delta t = 1,5$ тыс. лет) [12]. Расчеты дают $\tau = h\Delta t/\Delta h = 3761$ лет. При этом скорость смещения границ по высоте равна $f_{0i} = \Delta h/\Delta t = 0,43$ м/год – оценка изменения регионального фона. При региональном температурном высотном градиенте $\Delta T = 0,6^\circ\text{C}/100$ м это соответствует потеплению на $0,26^\circ\text{C}$ за сто лет. Эти значения определяют фоновое воздействие f_{0i} , сила которого возрастает при увеличении темпов потепления.

В итоге оцениваются все коэффициенты соотношения (2), рассчитываются значения изменений состояния геосистем Δz_i для каждого контура и создаются прогнозные карты тенденций возможных изменений ландшафтной структуры при разной скорости роста регионального и глобального температурного фона (рис.2). Прогноз строился на предположении, что в предшествующий началу потепления период ландшафты находились в

равновесном состоянии $\sum_i f_i = \sum_i \frac{\Delta z_i}{\Delta t} = 0$. Реализация этой гипотезы достигается путем

введения поправок k_i на значения нормы $k_i z_{0i}$. Провинциальный коэффициент для хр. Хамар-Дабан $k_i = 1,055$, т.е. высотные границы для этой территории вследствие ее более южного положения находятся выше по склону гор, чем в среднем по Прибайкалью.

Расчеты показывают (см. рис.2), что каждый ландшафтный выдел индивидуально реагирует на окружение и фоновое влияние. Гольцовые и подгольцовые геосистемы уступают место таежным. Последние способны продвинуться в горы только при положительном изменении климатического фона на величину не меньше $0,1^\circ\text{C}$ за сто лет. Различие скорости изменений от местоположения наглядно прослеживается на выделах ареала склоновых альпинотипных геосистем (контурные 1, 11, 16, 18). Отмечается существенное отрицательное влияние на результаты расчета площади этих выделов ($\Delta z_i = -0,0028S_i + 1,026$, $R = -0,99$). Отсюда следует существование критической площади $S_{i\text{кр}} = 364$ км², при которой наблюдается динамическое равновесие $\Delta z_i = 0$. Влияние текущего состояния геосистем на изменение состояния менее значимо ($\Delta z_i = -0,00044z_i + 1,487$, $R = -0,73$, $z_{i\text{кр}} = 3380$ м). Для всего многообразия контуров ландшафтной карты такие линейные зависимости не выполняются в силу многоаспектности влияния географического окружения на эти изменения.

Клеточный автомат как математико-картографическая модель эволюции ландшафтов методически оправдывает себя, отображая пространственное распределение и связи контуров друг с другом и с изменениями климатического фона. Это инструмент для анализа локальных особенностей взаимодействия геосистем, корректировки параметров модели с учетом провинциальных особенностей. Такой подход позволяет перейти к эволюционному картографированию, когда карта-геоизображение заменяется клеточным автоматом, моделирующим природные взаимосвязи. Клеточная модель позволяет формализовать дискретное геоизображение, рассматривая его как объект математических преобразований при переходе от карты к карте не только в аспекте прогнозирования, но и в более широкой интерпретации ландшафтной карты в карты нового тематического содержания, например, при операционном картографировании, когда учитываются не только свойства геосистем каждого контура, но и взаимодействие контуров (географическое положение).

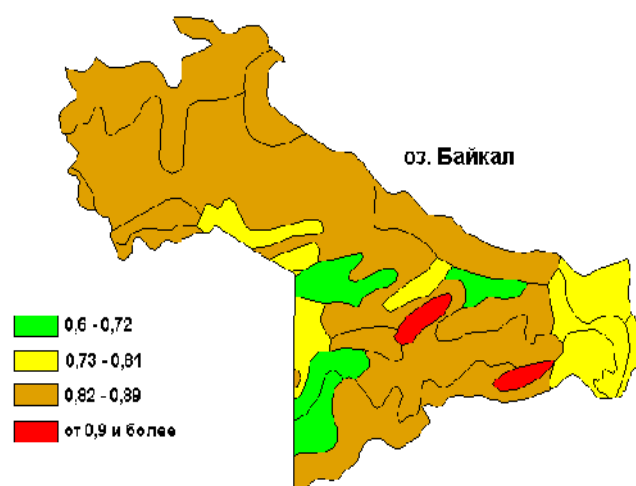


Рис. 2. Эволюционная карта тенденций изменения состояния контуров (Δz_i , м/год) групп фаций участка северного макросклона хр. Хамар-Дабан при потеплении климата на $0,5^{\circ}\text{C}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Салищев К.А. Принципы и задачи системного картографирования // Системное картографирование природных и социально-экономических систем. – М.: МГУ, 1978. – С. 5-23.
2. Мясникова С.И., Черкашин А.К. Оптимизационное геоинформационное картографирование // Геодезия и картография. – 2007. - №4. – С. 38-42.
3. Буч Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на C++. – М.: Бинوم, СПб: Невский диалект, 1998. - 560 с.
4. Колесов Ю.Б. Объектно-ориентированное моделирование сложных динамических систем. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. - 239 с.
5. Tobler W. R. Cellular geography // Philosophy in Geography, S. Gale and G. Olsson (eds.). – Dordrecht: D. Reidel Publishing Company – p. 379-386.
6. Kohonen T. Self-organizing maps. – Springer Series in Information Sciences, Vol. 30, Springer, Berlin, Heidelberg, New York: 2001. - 501 p.
7. Campbell J. B. Introduction to Remote Sensing. – New York: Guildford Press, 2006. - 626 p.
8. Ландшафтно-интерпретационное картографирование. – Новосибирск: Наука, 2005. – 424 с.
9. Тоффоли Т., Марголюс Н. Машины клеточных автоматов. – М.: Мир, 1991. - 280 с.
10. Ландшафты юга Восточной Сибири (карта). М 1:1 500 000 / Авторы В.С. Михеев, В.А. Ряшин. – М.: ГУГК, 1977. – 4 л.
11. Фролов А.А., Черкашин А.К. Эволюционное картографирование изменчивости геосистем Предбайкалья // Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт, Т. II. – Ханты-Мансийск, 2007.- с. 177-184.
12. Плюснин В.М. Ландшафтный анализ горных территорий. – Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2003. – 257 с.