

МЕТОДИКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.4.03:528.067.4(571.15)

© 2002 г. Е.П. КРУПОЧКИН, Е.И. ЛАВРОВ, В.А. ЧЕРВЯКОВ

АВТОМАТИЧЕСКОЕ СОЗДАНИЕ КАРТ КРИВИЗНЫ И ИЗВИЛИСТОСТИ ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ (на примере Алтайского края)

В наше время интенсивной автоматизации и компьютеризации научных исследований возникает новое научно-техническое направление в морфометрии, опирающееся на понятия "кривизна" и прежде всего "кривизна линий"¹.

Для характеристики отдельно взятых меандр, искривленности рукавов или конкретного участка реки в геоморфологии широко употребляется такой морфометрический показатель, как радиус кривизны [1–3]. Степень развитости излучин динамической оси потока или интенсивность меандрирования реки оценивается другим морфометрическим показателем – кривизной излучин l/L (l – длина русла реки, L – шаг излучин) [2–4].

А.М. Берлянт и др. использовали показатели кривизны линейных объектов для формализации картографической генерализации при геоинформационном картографировании [5].

К первым попыткам картографирования плановой кривизны рельефа земной поверхности можно отнести работы И.Н. Степанова и Н.А. Лошаковой [6, 7].

Благодаря бурному развитию информатики и компьютерных технологий исследования в области морфометрии² не потеряли своей актуальности, так как появилась возможность:

1. Использовать информационные системы (в частности, геоинформационные) для подготовки аэро-, космоснимков и других картографических произведений в виде оцифрованного (векторизованного) импортированного раstra. С помощью геоинформационных технологий исходные цифровые карты удобно модифицировать (преобразовывать), визуализировать на дисплее монитора, осуществлять обработку и математический анализ.
2. Разработать более точные морфометрические показатели для характеристики линейных объектов и алгоритмизировать методики их вычисления.
3. Автоматизировать процесс картографирования этих показателей в виде серий морфометрических карт кривизны линейных объектов различными способами картографического изображения.

¹ Под вторым понятием подразумевают "отклонение кривой в окрестности данной точки от прямой" [1, с. 765].

² С одной стороны, морфометрия считается разделом геоморфологии, предполагающим количественную оценку рельефа земной поверхности, а с другой – картографическим методом исследования, изучающего способы количественной характеристики по картам форм и структур географических объектов [8].

Цель настоящей работы – алгоритмизация и полная автоматизация вычисления и картографирования морфометрических характеристик линейных и объемных объектов.

Разработка способов оценки извилистости линий принадлежит к давним и до конца нерешенным задачам картометрии [5]. Нельзя не отметить, что в данном направлении плодотворно работали А.М. Берлянт, Н.М. Волков, Й. Крхо, А.П. Рождественский, Ю.Г. Симонов и др. В лаборатории картографии Алтайского госуниверситета В.А. Червяковым и Е.П. Крупочкиным [9] проведены опыты составления и использования карт извилистости рек, которые легли в основу технологии создания карт кривизны. Извилистость (γ) отражает степень искривленности линейного объекта (реки, береговой линии, дороги и т.д.) – отклонение его от спрямленной или прямой линии. Для вычисления извилистости использовалась формула

$$\gamma = \frac{l}{l_0}, \quad (1)$$

где l – реальная длина реки со всеми ее излучинами, а l_0 – длина замыкающего отрезка прямой, соединяющей точки ее истока и устья.

До настоящего времени извилистость обычно рассматривалась как морфометрический показатель, характеризующий один объект (участок реки, дороги). При изучении отдельных регионов было предложено вычислять и картографировать этот показатель как характеристику всех объектов в пределах территориальной единицы. Для этого использована формула

$$\bar{\gamma} = \frac{\sum l}{\sum l_0}, \quad (2)$$

где $\bar{\gamma}$ – средняя извилистость всей совокупности рек (дорог и т.п.) в пределах территориальной ячейки, $\sum l$ – суммарная (общая) протяженность рек в ячейке и $\sum l_0$ – сумма длин всех замыкающих прямых этих же рек.

После вычисления и картографирования показателей средней извилистости рек выяснилось, что это очень противоречивый показатель, а формула (2) некорректна для вычисления извилистости рек. Проблема заключается в том, что извилистые линии различны по своей природе и, следовательно, имеют разный характер кривизны. Поэтому при использовании формулы (2) показатель извилистости реки с одним общим изгибом (выраженным в макроформах) может быть равен показателю извилистости другой реки с более мелкими извилинами (выраженными в микроформах), но имеющей в целом прямолинейное протекание. Кроме того, для линейных элементов, у которых параметр l_0 слишком мал или равен 0 (в случае замкнутых контуров) данная формула теряет смысл. Для решения этой проблемы можно ввести понятия относительной, абсолютной и общей извилистости [10]. При их определении река разбивается на n равных участков длиной k (рис. 1). Для каждого из этих участков определяется расстояние d_i между его конечными точками. Тогда

$$i_{\text{отн}} = \frac{l}{\sum d_i}, \quad (3)$$

где $i_{\text{отн}}$ – относительная извилистость;

$$i_{\text{абс}} = \frac{\sum d_i}{d}, \quad (4)$$

где $i_{\text{абс}}$ – абсолютная извилистость;

$$i_{\text{об}} = \frac{l}{d}, \quad (5)$$

где $i_{\text{об}}$ – общая извилистость.

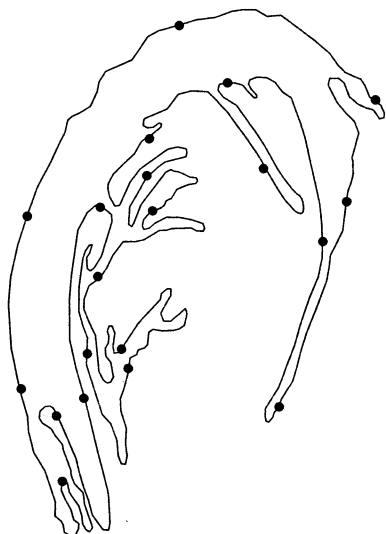


Рис. 1

Рис. 1. Разбиение контура замкнутого объекта для подсчета извилистости рек и рельефа

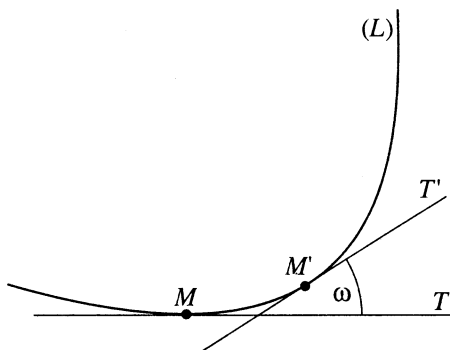


Рис. 2

Рис. 2. Кривизна в точке

Абсолютная извилистость отражает информацию о макроформах линии, общая извилистость – о ее макро- и микроформах. При этом показатель общей извилистости $i_{об}$ равен показателю извилистости γ и не обеспечивает полную передачу информации о характере кривизны элементов линии, являясь таким же парадоксальным. Наиболее удачен из всех выше перечисленных показателей – относительная извилистость $i_{отн}$, который может быть рассчитан также для замкнутых контуров. Его недостаток – отсутствие для задачи нахождения плавной огибающей кривой однозначного решения.

Другим аналогом извилистости, более правильным с математической точки зрения и удобным для вычисления и картографирования, является кривизна. Дело в том, что извилистость характеризует участок линейного объекта или полностью весь объект, а кривизна вычисляется в любой точке изучаемой линии. При оценке искривленности (отклонения от прямой) линейных географических объектов сначала вычисляется извилистость, а затем кривизна.

Приведем определение кривизны, которое дается в математике. Пусть при переходе от точки М линии L к точке М' (рис. 2) касательная, направленная в сторону движения, переходя из положения MT в положение M'T', поворачивается на угол ω .

Отношение $\frac{\omega}{MM'}$ угла ω к длине дуги MM' – характеризует искривленность линии L на участке MM' и называется средней кривизной дуги MM'. Кривизной линии L в точке М называется предел, к которому стремится средняя кривизна дуги MM', когда точка М' стремится к М:

$$k = \lim_{MM' \rightarrow 0} \frac{\omega}{MM'} \quad (6)$$

Кривизна характеризует искривленность линии в рассматриваемой точке. От точки к точке она меняется. В отдельных точках она может равняться нулю; такие точки называются точками спрямления, или точками нулевой кривизны.

Рассмотрим векторную линию $L = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ с координатами узлов $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$. Кривизной в вершине p_i называется дополнение угла $\alpha = \angle(p_{i+1}, p_i, p_{i-1})$ до π , т.е. $k(p_i) = \pi - \alpha$ или [5]:

$$k(p_i) = \arccos \frac{(x_{i+1} - x_i)(x_i - x_{i-1}) + (y_{i+1} - y_i)(y_i - y_{i-1})}{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}} \quad (7)$$

Для всей линии L вводится понятие суммарной кривизны:

$$k(L) = \sum_{i=1}^n |k(p_i)| \quad (8)$$

Для изучения морфометрических характеристик линейных объектов используется также понятие удельной кривизны:

$$k_{\text{уд}} = \frac{k(L)}{l}, \quad (9)$$

где l – длина линии L и дискретной кривизны:

$$k_{\text{диск}} = \frac{k(L)}{n}, \quad (10)$$

где n – количество точек, описывающих векторную линию L

Рассмотрим, какое значение приобретает понятие кривизны в физике и географии. В физике изучается и оценивается кривизна различных природных тел. В последнее время это понятие широко используется в теории фракталов. Фрактальные структуры обнаружены почти во всех областях физики – от квантовой теории поля и статистической механики до турбулентности и хаоса в динамических системах.

В географии кривизна – это морфометрический показатель, характеризующий линейные объекты и рельеф (объемные объекты). Здесь под кривизной обычно понимают меру изогнутости данной линии или топографической поверхности. Показатели кривизны и извилистости измеряются или вычисляются по картографическим и аэрокосмическим источникам. Это дает основание отнести процесс количественной оценки кривизны и извилистости к двум взаимосвязанным способам картографического метода исследования, получившим название картометрического и морфометрического.

Изучение кривизны рек и рельефа выполнялось нами с помощью программы "Генерализатор" [11] по технологической цепочке операций, объединенных в три этапа [12]: картометрический (снятие с исходных цифровых карт м-ба 1 : 750000 информации о протяженности рек и длине изогипс), морфометрический (компьютерное вычисление показателей извилистости и кривизны соответствующих объектов изучения) и картографический (создание электронных карт извилистости и кривизны более мелкого масштаба).

Опишем технологию автоматического построения карт извилистости и кривизны на примере рек и рельефа Алтайского края. Исходная цифровая карта была разбита на области с помощью географической сетки сфероидических трапеций размером $30' \times 20'$ (по долготе и широте). Для каждой трапеции, представляющей собой замкнутый выпуклый контур, ограниченный ломаной линией с координатами $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n), (x_{n+1}, y_{n+1})$, где $x_{n+1} = x_1, y_{n+1} = y_1$, необходимо было оценить картометрические и морфометрические показатели пересекающих ее или лежащих внутри ее линий. Полученную информацию следовало отнести геометрическому центру трапеции, координаты которого вычисляются как

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad y_c = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}. \quad (11)$$

Для определения пересечения векторной линии с трапецией вначале оценивалась возможность пересечения минимальных прямоугольников, включающих данные объекты. Если прямоугольники пересекаются, то для каждой точки векторной линии с помощью метода углов [13, 14] определялась ее принадлежность трапеции. Таким образом, создавалось множество $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ точек цифровых линий, лежащих внутри данной трапеции T , а также множество $S = \{S_1, S_2, \dots, S_q\}$ фрагментов линий, составленных из последовательно принадлежащих трапеции точек. В силу выпуклости трапеций очевидно, что эти фрагменты также полностью лежат внутри нее.

Суммарная кривизна рек и изогипс в трапециях T вычислялась как

$$k_{\text{сум}}(T) = \sum_{i=1}^m |k(P_i)|. \quad (12)$$

Для вычисления удельной кривизны этих же объектов использовалась формула

$$k_{\text{уд}} = \frac{k_{\text{сум}}(T)}{\sum_{i=1}^q l(S_i)}, \quad (13)$$

где $l(S_i)$ – длина фрагмента S_i . Средняя дискретная кривизна T рассчитывалась как

$$k_{\text{диск}} = \frac{k_{\text{сум}}(T)}{m}, \quad (14)$$

где m – число точек, входящих в множество P .

Для нахождения общей извилистости использовалась формула

$$i_{\text{об}} = \frac{\sum_{i=1}^q l(S_i)}{\sum_{i=1}^q d(S_i)}, \quad (15)$$

где $d(S_i)$ – расстояние между конечными точками фрагмента S_i .

При определении относительной извилистости T каждый фрагмент S_i был разбит на v_i приблизительно равных участков длиной $\{d_i^1, d_i^2, \dots, d_i^{v_i}\}$. Тогда

$$i_{\text{об}} = \frac{\sum_{i=1}^q l(S_i)}{\sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^{v_i} d_i^j} \quad (16)$$

является относительной извилистостью рек и изогипс в трапециях.

Как показали проведенные исследования, для решения поставленной задачи лучше всего применять показатель удельной кривизны, так как для его вычисления не требуется больших затрат времени и он учитывает длину ломаных линий, заменяющих исходные изображения линейных объектов.

На основе полученных автоматически с помощью программы "Генерализатор" морфометрических характеристик (извилистости и кривизны) рек и рельефа, с использованием программ SURFER (v. 6.04. Golden Software Inc.) и МАГ (v. 2.4) были созданы изолинейные картосхемы (рис. 3–8). Они обладают повышенной обзорностью, что позволяет изучать закономерности территориального размещения вычисленных показателей по всему краю. Их отличает повышенная наглядность, рельефная образность и сопоставимость. Последнее свойство особенно важно при сопряженном анализе карт разной тематики и временной принадлежности.

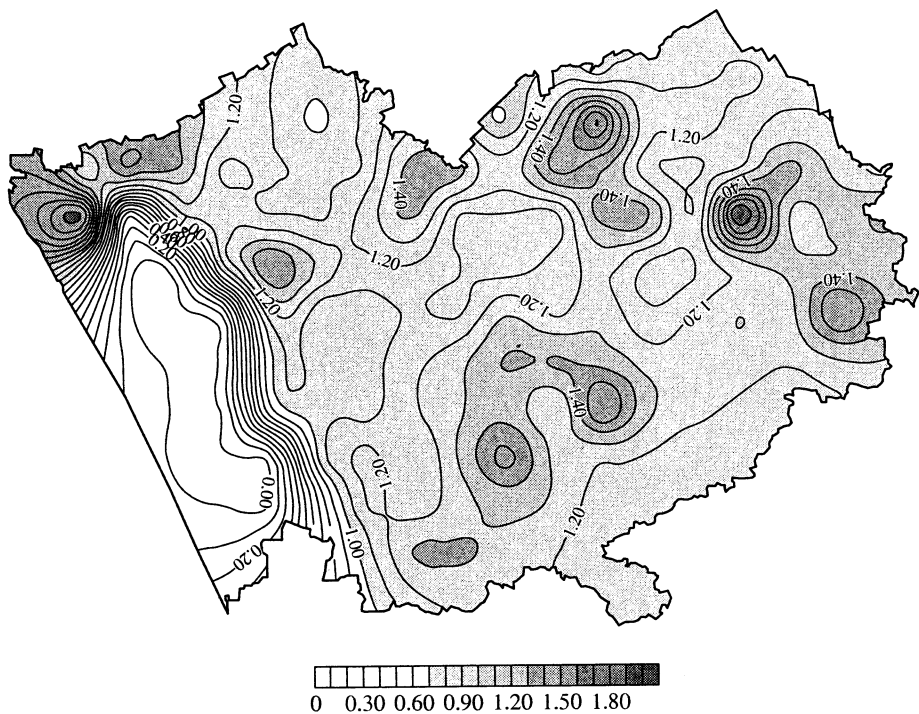


Рис. 3. Картохема общей извилистости рек Алтайского края

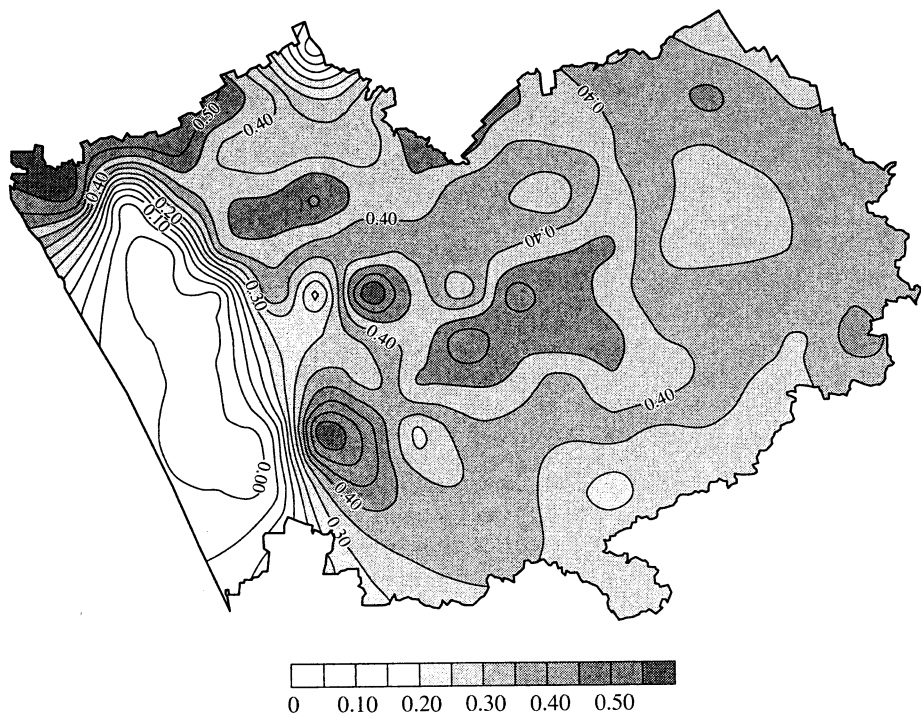


Рис. 4. Картохема средней дискретной кривизны рек Алтайского края

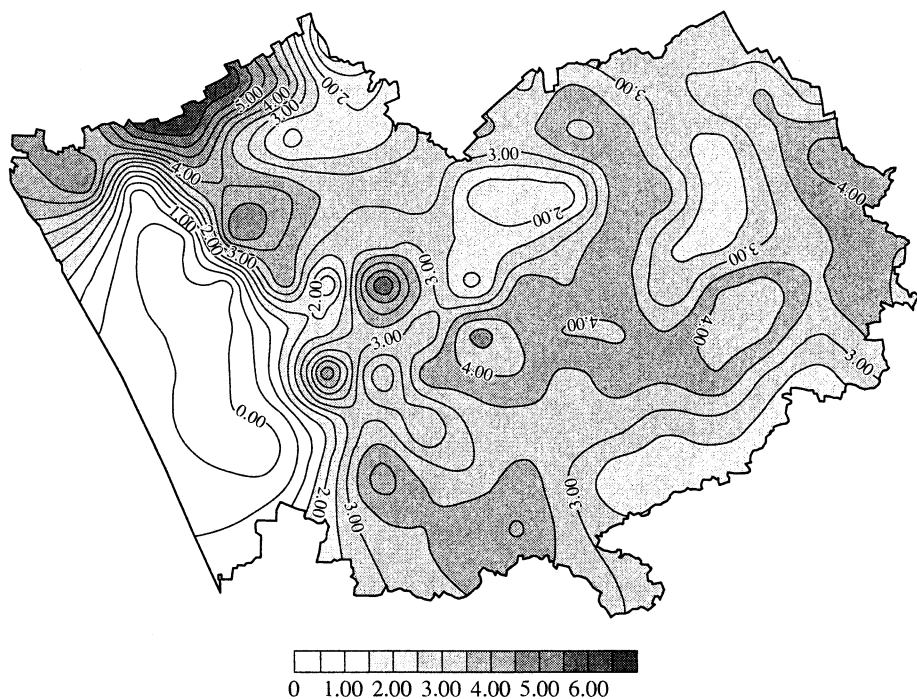


Рис. 5. Картограмма удельной кривизны рек Алтайского края

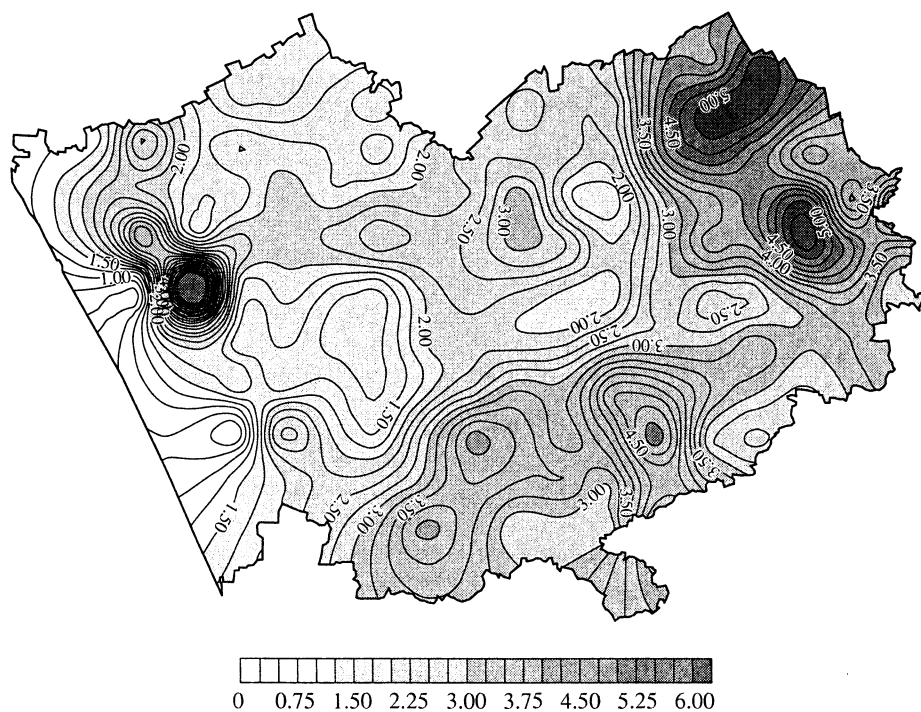


Рис. 6. Картограмма общей извилистости изогипс Алтайского края

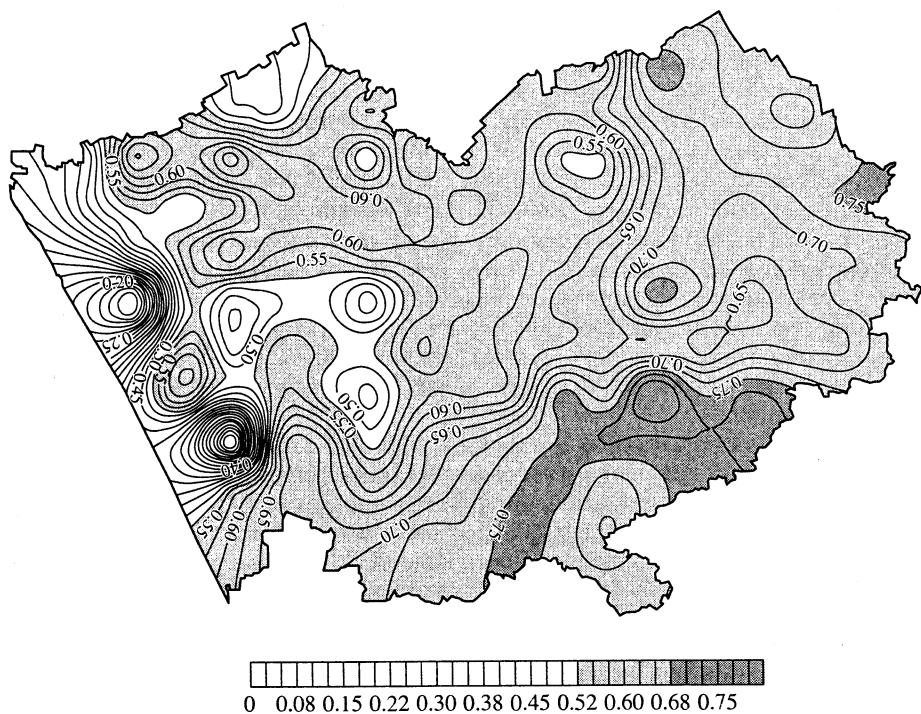


Рис. 7. Картограмма средней дискретной кривизны изогипс Алтайского края

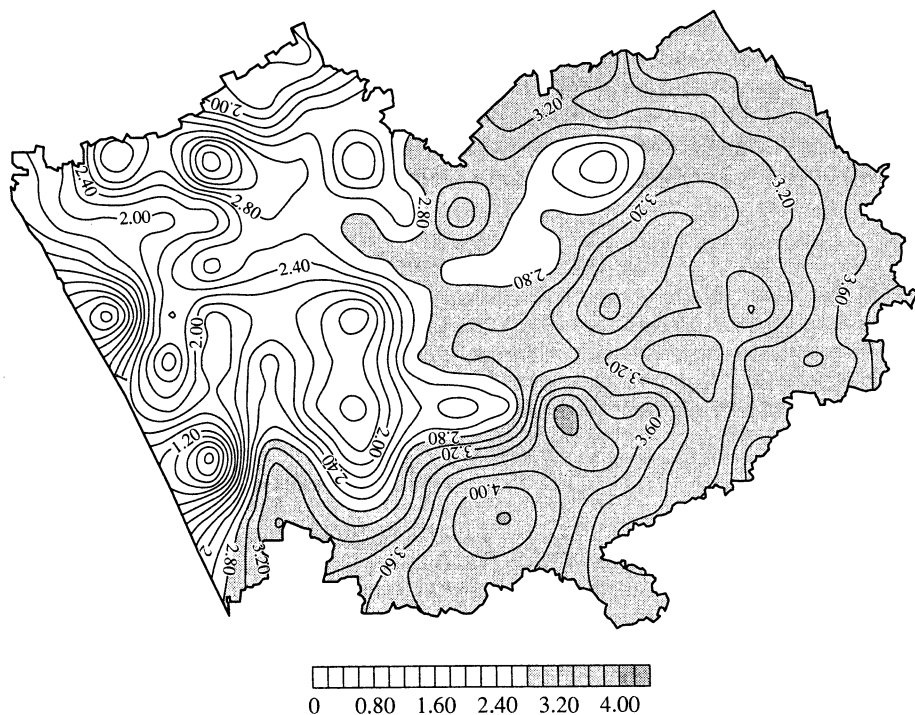


Рис. 8. Картограмма удельной кривизны изогипс Алтайского края

Такие карты необходимы для оценки степени пригодности морфометрических показателей путем сравнительно-визуального и математико-статистического анализов. На начальном этапе исследований был выполнен самый простой вид анализа представленных карт – сравнительно-визуальный.

Подобные морфометрические карты можно использовать при изучении морфологии русел, условий их формирования, закономерностей развития русел рек при различном сочетании природных факторов. Например, показатель кривизны излучин $||L$, характеризующий степень их развитости для конкретной реки, повторяет общую извилистость (5). Для объективизации и формализации рассматриваемого показателя представляется целесообразным заменить его на показатель средней дискретной кривизны (10) (если вычисления производить вручную) или на удельную кривизну (при условии, что все операции обработки и вычисления автоматизированы). На их основе возможно типологизировать и классифицировать речные русла, а по изолинейным картам кривизны рек выделять морфологически однородные участки, проводить районирование.

Использование разработанной и апробированной методики вычисления средней дискретной и удельной кривизны в автоматическом режиме (с помощью программы "Генерализатор") позволит создавать морфоизографные карты рельефа в любом масштабе. Новые виды морфоизографных карт выявляют в пределах больших и малых бассейнов стока области повышенной неустойчивости, которые могут рассматриваться как наиболее опасные и в экологическом отношении. Они дают новое, более емкое отражение природных процессов и могут широко применяться в практике землепользования, мелиорации, сельского хозяйства, проектирования и строительства хозяйственных объектов, мониторинговых наблюдений, экологии и охраны природных ресурсов [6, 7, 15].

Анализ карт извилистости и кривизны рельефа возможно позволит выявить скрытые связи земной поверхности с гравитационными и магнитными полями, с геологическим и тектоническим строением, а также распространением полезных ископаемых. Так, например, уже при сравнительно-визуальном анализе карты удельной кривизны (рис. 8) видно, что полям с наибольшими значениями этого показателя (от 3,60 до 4,20) соответствуют месторождения полиметаллических руд и поделочных камней. На Салаирском кряже, где сосредоточены месторождения алюминиевых руд, мрамора и строительных материалов, удельная кривизна изменяется от 3,40 до 3,60.

Корреляционно-регрессионный анализ созданных карт позволит более глубоко и детально выявить закономерности пространственного распределения показателей кривизны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Российский энциклопедический словарь. Кн. 1. М.: Большая российская энциклопедия, 2000. 1023 с.
2. Русловые процессы на реках Алтайского региона. М.: Изд-во МГУ, 1996. 244 с.
3. Лю Шугуан, Чалов Р.С. Морфодинамические типы русел рек Хуанхэ и Янцзы (нижнее течение) и условия их формирования // Геоморфология. 2000. № 1. С. 106–116.
4. Лю Шугуан, Чалов Р.С. Классификация речных русел в китайской русловедческой литературе (аналитический обзор) // Геоморфология. 2000. № 3. С. 112–118.
5. Берлянт А.М., Мусин О.Р., Собчук Т.В. Картографическая генерализация и теория фракталов. М.: Наука, 1998. 136 с.
6. Степанов И.Н. Истинные и ложные линии на почвенных картах // Почвоведение. 1990. № 3. С. 124–136.
7. Лошакова Н.А. Анализ сопряженного отображения почв и рельефа в двуплановой контурности карт: Автореф. дис. ...докт. геогр. наук. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1998. 29 с.
8. Географический энциклопедический словарь. Понятия и термины. М.: Сов. энциклопедия, 1988. 432 с.
9. Червяков В.А., Крупочкин К.Е. Карта извилистости рек: технология ее создания и возможности использования // Современные проблемы географии и природопользования. 2000. № 3. С. 42–45.
10. Хоффман Ф. Исследование и разработка методов анализа и генерализации линий рек на картах: Дис. ...канд. техн. наук. М.: МГУ, 1972.

11. *Лавров Е.И.* Методы автоматизированной генерализации линейных элементов гидрографии // Препринт № 14. Барнаул: Изд-во Алт. госуниверситета, 2000. 15 с.
12. *Червяков В.А.* Роль современной картографии в становлении и развитии общегеографической морфометрии // Географии и природные ресурсы. 1990. № 2. С. 120–126.
13. *Ласло М.* Вычислительная геометрия и компьютерная графика на C++. (Пер. с англ.). М.: БИНОМ, 1997. 120 с.
14. *Препарата Ф., Шеймос М.* Вычислительная геометрия: Введение (Пер. с англ.). М.: Мир, 1989. 478 с.
15. *Степанов И.Н., Лошакова Н.А.* О трех типах контурности на почвенных картах // Почвоведение. 1998. № 3. С. 359–369.

Алтайский госуниверситет, Барнаул

Поступила в редакцию
29.12.2000

AUTOMATIC COMPILING OF TORTUOSITY AND LINEAR OBJECTS CURVATURE MAPS (ALTAI REGION AS AN EXAMPLE)

E.P. KRUPCHIKIN, E.I. LAVROV, V.A. CHERVYAKOV

S u m m a r y

The concepts of tortuosity and curvature and their relation to geomorphology, morphometry, and cartography are described. The technique of automatic tortuosity and curvature map compiling is worked out, with the Altai region as an example. New morphometric maps are visually compared and analyzed. The curvature maps have appeared to be more informative and reliable. The main fields of their theoretical and applied usage are pointed out.

УДК 551.4.013:551.435.32(268.45+268.52)

© 2002 г. И.О. ЛЕОНТЬЕВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ АККУМУЛЯТИВНЫХ БЕРЕГОВ БАРЕНЦЕВА И КАРСКОГО МОРЕЙ

Введение

Аккумулятивные берега, сложенные рыхлыми подвижными наносами, встречаются в той или иной мере во всех морях Российской Арктики и нередко служат отправной точкой для хозяйственного освоения прилегающих территорий. В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция к размыву арктических берегов, в том числе и аккумулятивных, что представляет угрозу как уже существующим сооружениям, так и планируемым объектам, связанным с разработкой месторождений углеводородных ископаемых и морскими коммуникациями. Очевидно, имеется потребность в достоверном прогнозе эволюции побережий в обозримом будущем, что позволит выработать необходимые меры для их защиты.

В настоящей работе делается попытка спрогнозировать изменения некоторых типичных аккумулятивных берегов западной Арктики на период ближайших 100 лет, исходя из результатов математического моделирования морфодинамических процессов. В качестве объектов прогноза выбраны 4 сравнительно хорошо изученных участка побережья, один из которых расположен в Баренцевом море (район Варандея, рис. 1а), а три других в Карском море (на уральском и ямальском берегах Байдарачьей губы, а также у мыса Харасавэй, рис. 1б).