

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ГЕОМЕТРИЯ
СТРУКТУР ЗЕМНОЙ
ПОВЕРХНОСТИ

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

ПУЩИНО - 1991

**АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ПУЩИНСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
ИНСТИТУТ ПОЧВОВЕДЕНИЯ И ФОТОСИНТЕЗА**

**ГЕОМЕТРИЯ СТРУКТУР ЗЕМНОЙ
ПОВЕРХНОСТИ**

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

ПУЩИНО · 1991

УДК 528.912; 528.92; 528(038); 551.4; 631.4(018)

Исследование структурной организации ландшафтов, почвенного покрова, приповерхностных геологических слоев требует строгой научной методологии. Статьи раскрывают возможные физико-математические и иные подходы, способствующие развитию знаний о Земле.

Сборник предназначен для географов, картографов, почвоведов, геологов, геодезистов, мелиораторов, специалистов смежных профессий.

Редакционная коллегия: И.Н.СТЕПАНОВ (отв. редактор),
П.А.ШАРЫЙ (отв. за выпуск), Н.А.ЛОШАКОВА, И.В.ФЛОРИНСКИЙ,
З.Ф.ПОВЕТУХИНА, А.Е.КОВАЛЕВА, Т.П.КАЗАНЦЕВА.

**ACADEMY OF SCIENCES OF THE USSR
PUSHCHINO RESEARCHES CENTER
INSTITUTE OF SOIL SCIENCE AND PHOTOSYNTHESIS**

**THE GEOMETRY OF THE EARTH
SURFACE STRUCTURES**

THE BOOK OF SCIENTIFIC PROCEEDINGS

PUSHCHINO • 1991

ОТ РЕДКОЛЛЕГИИ

Настоящий сборник посвящен в основном аспектам теории и практики процесс-ориентированной (физической) топографии. В сборник включены статьи сотрудников лаборатории картографии почв Института почвоведения и фотосинтеза АН СССР и взаимодействующих с ними исследователей из других организаций. Кроме того здесь воспроизведена ставшая библиографической редкостью статья Петра Константиновича Соболевского.

Именно этим замечательным ученым были впервые осознаны связи теории поля и геометрии поверхности, полезность проведения математических операций над топографической поверхностью, введена граница между долинами и приводораздельными областями (называемая здесь горизонтальной морфоизографой нулевого значения), мысленно разделены топографическая поверхность и вещественный состав, что позволило уже в 30-е годы интенсивно использовать строгие количественные подходы на практике. Развитию идей П.К.Соболевского посвящена значительная часть статей настоящего сборника.

Вопросы методологии ландшафтных исследований на базе топографических методов рассматриваются в статье И.Н.Степанова, И.В.Флоринского и П.А.Шарого. Вниманию читателей предлагается первый в отечественной литературе обзор приложений современных количественных методов топографии в ландшафтведении, выполненный П.А.Шарым, Г.А.Куряковой и И.В.Флоринским. Развитию топографии на базе теории поля и дифференциальной геометрии посвящена статья П.А.Шарого. В статье И.В.Флоринского обсуждаются некоторые вопросы картографического выявления природных границ и генерализации структур земной поверхности. Интересной является гипотеза о роли связности — новой в топографии нелокальной величины, — выдвинутая в статье П.А.Шарого, Г.А.Куряковой и И.В.Флоринского, к которой тесно примыкает статья А.С.Викторова, посвященная количественному моделированию ландшафтных рисунков.

Метод пластики рельефа (топографический метод вторых производных), его возможности применительно к проблемам почвоведения — тема статей З.Ф.Поветухиной, А.Е.Ковалевой, Г.Ш.Мамедова

и Г.М.Гаджиева. Опыт использования метода пластики в решении мелиоративных проблем на примере большого региона (Арал) и малого участка (совхоз в Дагестане) рассмотрен в статьях И.Н.Степанова и Н.А.Шкильевой. Попытке применения метода пластики в геохимии посвящена статья В.Н.Орешкина, Н.А.Лошаковой и И.Г.Хайтова.

Авторы полагают, что развитие представленных в сборнике подходов еще далеко не закончено и достаточно перспективно.

EDITORIAL

This book is on the whole devoted to aspects of theory and practice of the process-oriented (physical) topography. Articles of researchers of the Soil Mapping Laboratory of the Institute of Soil Science and Photosynthesis of the Academy of Sciences of the USSR and other organizations are included in the book. Moreover, the article of Petr Konstantinovich Sobolevsky is reprinted here, which is now the bibliographical rarity.

The association between the theory of gravity field and the surface geometry, the importance to carry out mathematical operations over topographical surfaces, the definition of the border between divergence and convergence areas (which is named here zero horizontal morphoizograph), the mental separation of the topographic surface and the substance have first time been realized by this splendid scientist. That circumstance allowed the intensive usage of quantitative techniques in practice since 1930 year. The major part of articles of this book is devoted to development of ideas of P.K.Sobolevsky.

Questions of the landscape research methodology on the basis of topographic methods are considered in the article of I.N.Stepanov, I.V.Florinsky and P.A.Shary. We call readers' attention to the first domestic review of application of modern quantitative topographic methods to landscape researches by P.A.Shary, G.A.Kurjaka and I.V.Florinsky. The article of P.A.Shary is devoted to development of topography on the basis of the gravity field theory and the differential geometry. Some questions of the cartographic recognition of natural borders and generalization of the Earth surface structures are discussed in the article of I.V.Florinsky. The interesting hypothesis about the role of the new

global topographic value named percolation is introduced in the article of P.A.Shary, G.A.Kurjakova and I.V.Florinsky.

The article of A.S.Victorov is devoted to quantitative simulation of landscape pictures.

The flow structures' method (the second derivative topographic method), its possibilities in soil science problems are subject of articles of Z.F.Povetukhina, A.J.Kovaleva, H.Sh.Mamedov and H.M.Hagiev. The experience of using of the flow structures' method in solution of reclamation problems is discussed in the articles of I.N.Stepanov (as an example of large territory - Aral region) and N.A.Shkileva (as an example of small territory - the Dagestanian farm). The article of V.N.Oreshkin, N.A.Loshakova and I.G.Haitov is devoted to the attempt of using of the flow structures' method in the geochemistry.

Authors believe that the development of represented techniques is not finished yet and has good long-term.

О КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ СХЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ЛАНДШАФТА

И.Н.Степанов, И.В.Флоринский, П.А.Шарый

Развитие ландшафта происходит под действием ряда физико-химических (в широком понимании, включая тектонику, геохимию, метеорологию и т.п.) и биологических факторов, создающих в данный момент времени, вообще говоря, различные условия для протекания формирующих ландшафт процессов в разных участках Земли. Среди этих факторов есть такие, о которых информации больше, и другие, о которых ее меньше или просто недостаточно.

Можно сравнить в этом плане данные о топографической поверхности и о тектонике одного и того же региона: в отношении последних дела обстоят обычно значительно хуже из-за сравнительной скучности информации о происходящем глубоко под землей. Например, длительное время вопрос об изостатическом механизме поднятия Фенноскандии оставался предметом дискуссий, тогда как факт поднятия топографической поверхности для этого региона не вызывал ни малейших сомнений / Sharma, 1984/.

Сведения геологии и геофизики глубинных слоев Земли на сегодня весьма и весьма труднодоступны и неполны /Шарма, 1989/, что приводит к мысли учитывать тектонические процессы в ландшафтоведении скорее как "неизвестные", нежели как моделируемые или измеримые. W.Penck /1924/ предлагал пытаться восстанавливать эти неизвестные движения земной коры, исходя из доступных наблюдению (и, значит, моделируемых) процессов разрушения (денудации) и "существующего геоморфологического строения" ("morphologischer Tatsachenschatz").

Моделирование роли ветра (за исключением песчаных образований барханов и др.) и подводных течений (для раздела сред "вода-дно океана") можно отнести к второму этапу исследований ландшафта, ограничившись на первом ситуациями, где эта роль относительно мала.

Вернемся к природным факторам, создающим отмеченную выше гетерогенность условий ландшафтообразования. Важным обстоятельством здесь является то, что в отличие от "неизвестных" тектоники, ветра и подводных течений, значительная часть факторов,

определяющих изменение ландшафта, сравнительно легкодоступна наблюдению и измерению: земная поверхность и поле притяжения, инсоляция, климатические факторы, характер растительного покрова, влажность, характеристики состава и свойств почв и подстилающих пород, свойства денудационных и водных потоков и др.

Попробуем уточнить возникающее уже в этом кратком рассмотрении представление о факторах-предпосылках и факторах-результатах, отнюдь не имея в виду взаимную независимость этих двух групп факторов. Например, земная поверхность в поле притяжения дает подсистему факторов-предпосылок для денудации. В свою очередь, денудация, изменяя поверхность, осуществляет обратную связь факторов-результатов с факторами-предпосылками. Следствием может быть, скажем, определенная характерная форма вершин холмов для рассматриваемой местности. В этом частном примере ясно просматривается возможная неполнота основных предпосылок, связанная с неучетом осадков, состава, структуры, возраста холмов и т.п., что отражено выражением "подсистема" (а не система) основных факторов-предпосылок. Кроме того, выбор достаточно полного (для конкретной цели) набора предпосылок – обычная проблема любого исследования. Заметим, что этот пример (как и множество иных, относящихся к ландшафтогенезу) показывает и другое: 1) принципиальную возможность выбора основных предпосылок, позволяющих моделировать процессы и предсказывать их результаты; 2) трудности чисто экспериментального (безмодельного или бессистемного) разделения факторов-предпосылок и факторов-результатов.

Отметим, в связи с последним замечанием, что бессистемный подход, то есть оторванное даже от наиболее доступных предпосылок (топографической основы) составление "карт-результатов", неоднократно критиковался в литературе /Krcho, 1986; Ласточкин, 1987; Степанов, 1990/. Процесс осознания того, что результаты (например, типы почв в почвоведении) без предпосылок, во-первых, теряют ценность, во-вторых, плохо воспроизводимы из-за произвола в том, где и насколько часто имеет смысл брать пробы (анализы), идет довольно медленно. Одна из причин этого заключается в недостаточной развитости концептуальной схемы ландшафтных исследований.

Итак, мы пришли к концепциям карт-предпосылок и карт-результатов. В связи с этим логичны вопросы: а) что есть основные предпосылки и б) каково взаимодействие предпосылок и результатов.

а. Процессы изменения ландшафта протекают вблизи поверхности и в поле притяжения Земли (наиболее сильном из геофизических полей). Кроме того неоднородность условий освещенности рельефа, климат, воздействие антропогенного фактора, а также характер и возраст подстилающих пород, несомненно, входят в число важных факторов-предпосылок. Другие факторы (движение воды, растительный покров, и т.д.) в значительной степени зависят от перечисленных и потому, как правило, являются их производными. Таким об-

разом, мы приходим к выводу о приоритетной роли 1) топографических, 2) климатических, 3) антропогенных и 4) геологических факторов—предпосылок в ландшафтоведении при "неизвестных" факто-рах тектоники, исключенных из непосредственного рассмотре-ния. В развитом виде эти факторы как раз и составляют *morphologischer Tatsachenschatz* Вальтера Пенка /1961/.

б. Обычно ландшафт формируется за геологические времена, что соответствует представлению о близости результатов к порождающим их предпосылкам. В качестве "глобального примера" можно отметить близость фигуры Земли к эллипсоиду вращения: разность полуосей (21 км) значительно больше самой высокой горы. Однако не следует забывать и о том, что наша планета представляет собой открытую неравновесную систему, о чем свидетельствуют го-рообразование, наличие тепловых потоков, вулканическая деятель-ность, геохимические процессы, тепловое воздействие Солнца и др. /Шарма, 1989/. В итоге, несбалансированность факторов—пред-посылок и факторов—результатов отражает в тенденции темпы (не-равновесность) происходящих на Земле процессов. Отметим, что прежде чем верхние слои обнажившихся горных пород смогут прийти в движение (денудация), обычно необходим период геохимичес-кой подготовки / Penck, 1924/, и что различные процессы идут, как правило, с разными скоростями.

Рассмотрим подробнее четыре выделенных выше основных вида факторов—предпосылок.

1. В традиционной топографии используется лишь 4 определяе-мых поверхностью и полем притяжения величины – высота (нулевая производная), ориентация склона, крутизна (первая производная высоты), производящая функция (третья производная /Шарый, Сте-панов, 1991/), изолинии которой есть тальвеги и водоразделы, и две географические величины: широта и долгота.

Непосредственно от высоты могут зависеть, например, темпе-ратура, давление и состав атмосферы /Окабе, 1981/, но это прояв-ляется лишь при значительной разности высот (порядка 100 м и более), что особенно заметно в горных странах.

По отношению к таким факторам—результатам, как типы почв (разумеется, зависящим не только от одной высоты, но и от дру-гих факторов—предпосылок), эта зависимость нашла отражение в представлении о вертикальной поясности (почв). Осознано, однако, что "представление о поясе предполагает наличие в нем опре-деленного сочетания условий почвообразования, в первую очередь растительности и режима тепла и влаги" /Фридланд, 1986, с. 56/. Тем не менее, рассматривая иное определение пояса, данное К.В.Станюковичем через совокупность создающих его в го-рах условий, В.М.Фридланд писал: "Мы категорически против него" возражаем" как против "превращающего пояс в абстрактное понятие" (там же). По сути, это довольно распространенный пример отказа (к тому же категоричного) от учета признанного самим же ав-

тором существования "условий почвообразования", то есть совокупности факторов-предпосылок. Изучение процесса почвообразования в отрыве от порождающих его условий – весьма сомнительный способ "абстрагирования" от анализа причинно-следственных связей в естественноисторической науке. Сходные рассуждения приводят к концепции взаимной дополнительности факторов-предпосылок и факторов-результатов: отказ от изучения какой-либо из этих двух групп факторов приводит к неоправданной односторонности ландшафтных исследований и трудностям анализа причинно-следственных связей.

Зависимость факторов-предпосылок непосредственно от высоты в регионах, где перепады высот не столь значительны, обычно преувеличено мала. Это может показаться на первый взгляд странным: условия холма могут сильно отличаться от условий впадины или седловины. Верно, но заданной высоте отвечают обычно и холмы, и впадины, и седловины; какой именно из этих трех классов – определяет гауссова кривизна поверхности, а не ее высота /Gauss, 1827/.

От крутизны зависит скорость водных, денудационных и других приповерхностных потоков. В сочетании с ориентацией склонов это дает еще и направление потоков. Добавив широту и долготу, а также космологические данные (положение Солнца), получаем принципиальную возможность определять экспозицию склонов и характеристики воздействия солнечного излучения /Krcho, 1967, 1973, 1983/. В последнем случае существенны данные и о климате региона. Кроме того, задача об излучении явно нелокальна: соседний холм может отбрасывать тень на рассматриваемый участок поверхности.

В традиционной топографии пропущена вторая производная высоты, то есть кривизна. Между тем она играет существенную роль как фактор-предпосылка по отношению к поверхностным потокам. Поверхность характеризуется двумя значениями кривизны (см. статью Шарого П.А. в данном сборнике), поле притяжения выделяет на ней два направления: вдоль касательной к поверхности компоненты вектора ускорения и перпендикулярное к нему (вдоль горизонтали). Кривизну первого мы называем вертикальной, кривизну второго – горизонтальной.

Непосредственно от горизонтальной кривизны зависит "собирающая способность" поверхности по отношению к потокам; изолиния максимальной такой способности есть тальвег, а изолиния минимальной – водораздел. Природная граница, отделяющая области сближения (конвергенции, понижения или просто долины) от областей расходления (дивергенции или повышения) потоков, названа здесь горизонтальной морфоизографой нулевого значения. Горизонтальная кривизна, таким образом, визуализирует потоковую структуру местности (а вертикальная, например – морфоструктуры центрального типа).

Специфика производящих функций, по-видимому, состоит в том,

что лишь их нулевые значения имеют смысл – для нахождения экстремума кривизны требуется приравнять нулю ее производную. Поэтому такие величины определяют только линии – тальвеги, водоразделы, бровки и подножия – известные в геоморфологии и гидро-графии как структурные линии /Ласточкин, 1987, с. 50/.

Отметим, что топография полностью построена на величинах локального характера. Между тем нечто сходное с размером бассейна водосбора, надо полагать, влияет на водный баланс региона (реки). Однако соответствующая концепция нелокальных топографических величин, насколько нам известно, не наполнена пока конкретным содержанием. Мы полагаем, что здесь необходимы специальные исследования. Подход, которому мы следуем, направлен в основном на изучение масштабно-зависимых геологических структур, по этой причине здесь не рассматриваются так называемые фрактальные топографические модели. Осознано, впрочем, что "масштабно-независимая компонента" рельефа (если такая вообще существует) составляет лишь проценты от масштабно-зависимой /Clarke, 1988/.

2. Климатические факторы-предпосылки могут быть учтены в виде ряда усредненных по времени (иногда и по региону) величин: температура, осадки, влажность, количество солнечных дней в году и т.д. Насколько нам известно, общая метеорология еще не сформировалась. С этими факторами связаны космологические (положение Солнца относительно Земли) и географические (широта и долгота, близость к океану или морю и т.д.).

3. Антропогенные факторы-предпосылки включают в себя мелиоративные или ирригационные сооружения (мероприятия), обработку земель, ряд акций по энергетике и др. Положение упрощается тем, что часть этих факторов относится к вполне определенным регионам (с которыми не обязаны в общем случае совпадать результатов – достаточно вспомнить последствия аварии в Чернобыле).

4. Геологические факторы-предпосылки, как уже отмечалось, есть характер (включая возраст) подстилающих пород. "Характер" означает состав, текстуру, глубину залегания, возраст и т.д., то есть доступные измерению свойства верхних слоев пород.

Факторы-предпосылки и факторы-результаты составляют два бесконечных ряда, из которых в конкретных ландшафтных исследованиях неизбежно отбирается лишь конечное число выбираемых в качестве наиболее существенных.

Ядром обсуждаемой концептуальной схемы является системный подход в ландшафтных исследованиях, под которым понимается изучение одновременно факторов-предпосылок и факторов-результатов, а также анализ взаимосвязи между теми и другими. Если рассматривать ландшафт чисто статически, тогда разница между предпосылками и результатами "исчезает" (то и другое есть свойства процессов), – но ведь это уже не исследование ландшафта, а в лучшем случае регистрация текущего его состояния.

В худшем случае незнание, например, в почвоведении потоковой структуры может приводить из-за редких измерений к сомнительным картам-результатам "лоскутного" типа с маловоспроизводимыми границами почв /Степанов, 1990/.

При попытке перейти к динамике выделяются два подхода: бессистемный и системный.

Бессистемный подход основан либо на одноразовой регистрации состояния ландшафта и качественных рассуждениях о возможных процессах его формирования (например: "склоны, обращенные на юг, обычно суще, чем склоны, обращенные на север... На южном склоне... нет лесов, а значит и лесных почв" /Фридланд, 1986, стр. 86/), либо на серии разновременных регистраций и их описании – с теми же качественными рассуждениями.

Системный подход основан на разделении учитываемых факторов на предпосылки и результаты (с учетом возможности обратной связи), регистрации тех и других и анализе взаимосвязи между ними. По отношению к почвоведению, учитывающему рельеф, А.Джеррард назвал этот подход "интеграция геоморфологии и почвоведения"; за рубежом видное место занимают работы, выполненные на базе такого подхода /Джеррард, 1984/.

Подчеркнем в заключение важную роль топографии в сочетании с отмеченными географическими и космологическими факторами как весьма информативной системы предпосылок формирования ландшафта.

ЛИТЕРАТУРА

Джеррард А.Дж. Почвы и формы рельефа. Комплексное геоморфолого-почвенное исследование. Л.: Недра, 1984. 208 с.

Ласточкин А.Н. Морфодинамический анализ. Л.: Недра, 1987. 256 с.

Окабе Х. Фотохимия малых молекул. М.: Мир, 1981. 502 с.

Степанов И.Н. Истинные и ложные линии на почвенных картах// Почвоведение, 1990. № 3. С. 128-146.

Фридланд В.М. Опыт почвенно-географического разделения горных систем СССР//Проблемы географии, генезиса и классификации почв. М.: Наука, 1986. С. 54-68.

Шарма П. Геофизические методы в региональной геологии. М.: Мир, 1989. 488 с.

Шарый П.А., Степанов И.Н. О методе вторых производных в геологии//ДАН СССР. 1991. Т. 219. № 2.

Clarke K.C. Scale-based simulation of topographic relief//American Cartographer. 1988. V. 15. No 2. P. 173-181.

Gauss C.F. Disquisitiones generales circa superficies curvas. 1827. Имеется перевод: Гаусс К.Ф. Общие исследования о кривых поверхностях//Об основаниях геометрии. М.: ГИТТЛ. 1956. С. 123-161.

Krcho J. Zovseobecnenie rovnice izalumklin na topografickej ploche a v jej skalarnom poli//Geograficky časopis. 1967. V. 39. No 2. P. 107-129.

Krcho J. Morphometric analysis of relief on the basis of geometric aspect of field Theory//Acta geographica Universitatis Comenianae. Geographico-physica. 1973. No 1. P. 7-233.

Krcho J. Teoreticka koncepcia a interdisciplinarme aplikacie komplexneho digitalneho modelu reliefu pri modelovaní dvojdimentionalnich poli//Geograficky časopis. 1983. V. 35. No 3. P. 265-291.

Krcho J. Geometricke formy georelietu a ich hierarhicke urovne// Geograficky časospis. 1986. V. 38. No 2-3. P. 210-235.

Penck W. Die morphologische Analyse. Stuttgart, Verlag. 1924. Имеется перевод: Пенк В. Морфологический анализ. М.: География, 1961. 360 с.

Sharma P.V. The Fennoscandian uplift and glacial isostasy//Tectonophysics. 1984. V. 105. No 1-4. P. 249-262.

О МЕЖДУНАРОДНОМ ОПЫТЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ТОПОГРАФИИ В ЛАНДШАФТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ (КРАТКИЙ ОБЗОР)

П.А.Шарый, Г.А.Курякова, И.В.Флоринский

Настоящая статья является первой в отечественной литературе попыткой обзора приложений современных количественных (отражающих свойства земной поверхности в поле притяжения) методов топографии в ландшафтovedении. В силу краткости обзора авторы не претендуют на его полноту*. Ниже приведены эквиваленты терминов, использовавшихся в статьях нашего сборника, распространенные в зарубежной литературе (см. например: Evans, 1972, 1980, 1981; Cox, Evans, 1987; Gerrard, 1981; Lanyon, Hall, 1983; Krcho, 1973, 1989; Speight, 1968, 1974, 1980; O'Loughlin, 1981; Kachanoski et al., 1985; Barsch, Liedtke, 1980; Dikau, 1988; Pennock et al., 1987; Martz, de Jong 1988, 1990). Кроме того, общепринят противоположный используемому в сборнике выбор знака кривизн, за исключением гауссовой / Papo, Gelbman, 1984/, знак которой имеет классификационный характер.

* Обзор был написан после завершения остальных статей сборника, поэтому излагаемый здесь материал не отражен в них; некоторые термины этих работ редко используются или даже не используются в международной практике.

В сборнике	В зарубежной литературе
Кривизна горизонтали *	плановая кривизна
Вертикальная кривизна *	профильная кривизна
Морфозографа	-
Понижение	область конвергенции
Повышение	область дивергентии

В традиционной топографии, получившей бурное развитие в 18 веке, используется всего три величины: высота, крутизна и ориентация склона (географические координаты мы не включаем в понятие топографических величин). В современной топографии введение новых величин обычно производится в контексте некоторых процессов или потоков, относительно которых принимается, что они реальны в ландшафте / Martz, de Jong, 1988/.

A.R.Aandahl /1948/ обычно цитируется как один из первых исследователей, осознавших влияние плановой и профильной кривизн на свойства почв. Предложенная R.V.Ruhe /1960/ качественная классификация склонов на вершины, выступы, вогнутости, подножия и низины, основанная в сущности лишь на профильной кривизне / Pennock et al., 1988/, нашла широкое применение в ландшафтovedении многих стран (США, Канада, Австралия, Великобритания и др.): в почвоведении /Wilding et al., 1983/, в геоморфологии /Dalrymple et al., 1968; Conacher, Dalrymple, 1977; Hall, 1983/, в гидрологии /Burt, 1988/ и т.д. Влияние этой неколичественной классификации трудно переоценить: прямо или косвенно она вошла в тысячи работ (см. обзоры, цитированные выше). Однако, как указал R.J.Hugget /1975/, двумерный подход к классификации склонов справедлив только, когда значимая плановая кривизна отсутствует. Плановая форма склона может сильно влиять на латеральное распределение геоморфологических, гидрологических и педологических процессов, а следовательно – на почвы, которые возникают из взаимодействия этих процессов / Pennock et al., 1988/.

Обратимся теперь к количественным подходам. П.К.Соболевский /1932/ одним из первых осознал значение плановой кривизны и ввел в рассмотрение области конвергенции и дивергентии. V.Kvietkauskas /1964/ разработал метод составления четырехцветных карт, количественно описывающих характеристики топографической поверхности: высоту, крутизну и профильную кривизну. Как П.К.Соболевский /1932/, так и V.Kvietkauskas /1964/ использовали для определения кривизн понятие радиуса кривизны без

* Эти термины также используются в зарубежной литературе.

указания процедуры его определения. F.R.Troeh /1964/ инициировал количественную оценку плановой и профильной кривизн аппроксимацией участков земной поверхности параболоидом вращения. Он нашел существенную корреляцию между этими топографическими величинами (а также крутизной) и распределением почв, что связывал с влиянием формы поверхности на гидрологический статус почв.

D.Zaslavsky, A.S.Rogowski /1969/ (Израиль, США) постулировали, что линии направления инфильтрации воды в почву дивергируют на выпуклых элементах рельефа и конвергируют на вогнутых. Эти авторы предположили, что повышенная влажность в вогнутых элементах должна приводить к ускоренному развитию в них профиля. Позднее в полевых исследованиях Sinai et al. /1981/ обнаружили сильную (0,9) линейную корреляцию влажности почвы с лапласианом высоты (отметим, что в сделанном этими авторами приближении минус лапласиан высоты равен удвоенной средней кривизне, характеризующей выпуклость поверхности); урожай пшеницы на вогнутых участках рельефа был в 4–5 раз выше, чем на выпуклых (в климатических условиях Израиля). M.G.Anderson, T.P.Burt /1978/ экспериментально подтвердили поступат, обнаружив строго конвергентную инфильтрацию просачивающейся после дождя воды в вогнутые по плановой и профильной кривизне участки (отметим, что отсюда следует также вогнутость по средней кривизне). Подобные результаты получил и E.M.O'Loughlin /1981/ для лесных бассейнов в Австралии.

Исследования по эрозии и топографии в связи с урожайностью кукурузы в США /Stone et al., 1985; Daniels et al., 1985/ показали, что благодаря разностям во влажности урожайность участка гораздо больше связана с его относительным положением в рельфе, чем с эрозионными классами.

L.E.Lanyon, G.F.Hall /1983/ рассмотрели совместное действие 4-х типов причин потенциальной неустойчивости ландшафта, выделив: а) области с отрицательными плановой и профильной кривизнами, чему отвечает повышенная влажность, а потому и неустойчивость; б) области с крутизной выше средней, чему соответствует относительно большая тангенциальная составляющая силы притяжения; в) области с интенсивностью воздействия Солнца меньше средней, то есть со сравнительно малой потерей влаги; г) области определенного состава, который известен как наиболее неустойчивый. Объединив соответствующие 4 карты методами дискриминантного анализа, авторы получили результирующую прогнозную карту, успешно предсказывавшую места обнаруженных в восточном Огайо (США) неустойчивостей ландшафта.

Отметим, что области вогнутости как в плане, так и в профиле обычно имеют характер пятен /Lanyon, Hall, 1983/ и отвечают зонам относительной аккумуляции приповерхностных потоков за счет профильного механизма (замедление потоков) и конвергенции

(сближение потоков); качественно это отметил, например, J.Krcho /1989/, количественное рассмотрение дал П.А.Шарый /1991/.

G.F.Hall /1983/ оценил движение и распределение воды на склонах как важнейший для развития почвенной катены фактор; гидрология склонов в связи с топографией посвящено довольно большое количество работ /см. например: Burt, 1988; Beven, 1987; Beven, Wood, 1983; Speight, 1980; Anderson, Burt, 1978, 1980; Moss, Walker, 1978; Govers, 1985/.

V.Klemeš /1983/ обсуждает различие ведущих гидрологических процессов для разных масштабов рассмотрения. Подобное различие в более широком контексте связи топографии с геологическими процессами рассмотрел K.C.Clarke /1988/; это различие обсуждается также в работе J.D.Phillips /1988/.

Понятие локальных и нелокальных топографических величин определено в работе И.Н.Степанова с соавт. /1991/. L.W.Martz, E.de Jong /1988/ характеризуют локальные топографические величины как описывающие геометрию (или форму) поверхности в точке *, причем для определения таких величин нужна лишь малая окрестность этой точки; нелокальные топографические величины характеризуют относительное положение участка земной поверхности в ландшафте, обеспечивая количественную меру концепций, выражаемых такими описательными терминами, как верхнее, нижнее положение склона, вершина, выступ, вогнутость, подножие и низина. Для определения этих величин требуется рассмотрение достаточно протяженных участков поверхности.

J.G.Speight /1968, 1974, 1980/ (Австралия) ввел две таких величины: удельные (на единицу длины горизонтали) водосборную и дисперсивную площасти. Удельная водосборная площадь в точке есть предел отношения площади замкнутой фигуры, образованной содержащим эту точку отрезком горизонтали и приходящими с более высоких участков склона на концы отрезка линий тока, к длине дуги этого отрезка горизонтали при стремлении последней к нулю. Аналогично определяется удельная дисперсивная площадь (для более низко лежащих участков склона).

Геометрия реальной земной поверхности достаточно сложна: длина горизонтали между двумя точками с одинаковой высотой может неограниченно возрастать при увеличении подробности топографической съемки /Mandelbrot, 1983/; выше уже

*Это не совсем так: при заданной форме поверхности локальные топографические величины зависят еще от ее ориентации в поле притяжения. Например, горизонтальный и наклонный плоские участки имеют разную крутизну.

отмечалась роль масштаба при рассмотрении тех или иных процессов. D.M.Mark /1984/ (США), L.W.Martz, E.de Jong /1988/ (Канада) предложили вычислительные методы объективного определения этих нелокальных топографических величин, впервые намеченные в работе J.G.Speight /1968/. В отличие от D.M.Mark /1984/, канадские авторы, основываясь на результатах своих полевых измерений /Martz, de Jong, 1985, 1987/ по изучению "чистой эрозии", то есть разности между расходом и приходом почвы за год, уделили особое внимание депрессиям и ввели две величины: глубину заполнения депрессии и водосборную площадь с учетом депрессий. Позже ими была показана корреляция как локальных, так и нелокальных топографических величин с концентрацией естественных радионуклидов в верхнем слое почвы /Martz, de Jong, 1990/; отметим, что значимой корреляции с крутизной не обнаружено, тогда как для плановой и профильной кривизн, водосборной площади и глубины заполнения депрессий значимая корреляция найдена. S.K.Jenson, J.Q.Domingue /1988/ считают основным процессом, связанным с водосборной площадью, аккумуляцию потоков. K.Beven, E.F.Wood /1983/, а также T.P.Burt, D.B.Butcher /1985/ полагают, что водосборная площадь имеет фундаментальное значение для исследования флювиальных и гидрологических процессов в ландшафте. В исследовании топографического контроля влажности почв T.P.Burt, D.P.Butcher /1985/ показали, что величины, связанные с водосборной площадью, коррелируют с содержанием влаги в почве сильнее, чем локальные топографические величины. Ими также показано, что измерение водосборной площади вручную по картам горизонталей более субъективно, чем выполненное на ЭВМ вычислительными методами, использующими цифровую модель рельефа.

Причина здесь глубже, чем точность ручных измерений и построений. Дело в том, что высоты измеряются в конечном числе точек местности, а проведение изолиний (горизонталей) между этими точками неизбежно вносит ошибку в значения высот. Сложный (фрактальный) характер земной поверхности и большое количество связанных с этим работ (см. Mandelbrot, 1983 и список литературы в этой работе), включая так называемые фрактальные топографические модели (см. Clarke, 1988 и его библиографию), привели многих исследователей к осознанию преимуществ использования непосредственно измеренных топографических данных (цифровая модель рельефа) по сравнению с методом изолиний, более удобным для иллюстративных целей. I.S.Evans /1972, 1981/ предложил быстрый вычислительный метод объективного определения локальных топографических величин компьютерным анализом цифровой модели рельефа (см. рис.). Эта техника была использована во многих недавних исследованиях поверхности Земли, например /Lanyon, Hall, 1983; Burt, Butcher, 1985; Martz, de Jong, 1985, 1987, 1990; Franklin, 1987; Pennock et al., 1987/. Развитию метода посвящена работа L.W.Zevenbergen,

C.R.Thorne /1987/. Вычислительные методы для нелокальных топографических величин предложили D.M.Mark /1984/ и L.W.Martz, E.de Jong /1988/; отметим, что те и другие величины определяются лишь в тех точках, где измерена высота (операционный подход). Кроме обсуждавшихся выше приложений, эти методы используются в Геологической службе США для составления красочных карт водосборных площадей /Jenson, Domingue, 1988/.

Краткий обзор четырех основных типов моделей высот (digital elevation models, DEM) дал J.R.Carter /1988/ (США). Этот автор отметил, что цифровая модель местности (digital terrain model, DTM) может включать в себя DEM, но может содержать и другие данные о ландшафте. А.В.Поздняков, И.Г.Черванев /1990/ в рассмотрении одного из этих типов DEM предложили ограничиться учетом двух видов геоморфологических структурных линий /Ласточкин, 1987/ и их порядков, для чего, по мнению авторов, необходимо составление DEM "начинать с выделения порядков долин и водоразделов"*. Более объективные подходы рассмотрены в других работах /Jenson, Domingue, 1988; Douglas, 1986; Peucker, Douglas, 1975; Mark, 1984/.

Состояние современной топографии отражается в развитии представлений о классификации участков земной поверхности. Хронологически одной из первых была фундаментальная классификация форм поверхности на эллиптические, параболические и седловые /Gauss, 1827/ по знаку полной (гауссовой) кривизны. Однако эта классификация относится к свойствам самой поверхности, не учитывая ее ориентацию в поле притяжения, от которой также зависят топографические величины (см. примечание на с. 16). В итоге возник ряд качественных классификаций (например, Ефремов, 1949), постепенно вытесняемых полуколичественными или количественными. Рассмотрим здесь только последние. Некоторые авторы, например, F.R.Troeh /1964/, J.Krcho /1983/, предложили классификацию по знакам плановой и профильной кривизн (9 типов поверхностей, из них распространены 4), то есть локальных топографических величин. Но из локальности следует, что такая классификация не отражает относительное положение участка по рельефу. Первую попытку выйти из положения предпринял J.G.Speight

* Такой подход достаточно субъективен по двум причинам. Во-первых, фрактальный характер земной поверхности делает в общем случае не единственным выбор количества тальвегов и водоразделов (а следовательно – их порядков). Во-вторых, точность использующей нерегулярную сетку модели определяется в первую очередь учетом мест резкого перепада высот /Carter, 1988/, то есть другими структурными линиями – бровками и подножиями /Ласточкин, 1987/, тогда как тальвеги и водоразделы сами могут быть найдены из DEM /Douglas, 1986; Jenson, Domingue, 1988/.

/1968/, использовавший плановую и профильную кривизны, а также введенную им в этой работе локальную топографическую величину – удельную водосборную площадь. Набор величин, однако, явно был недостаточен для целей классификации; позже автор ввел удельную дисперсионную площадь /Speight, 1974/, но к классификации более не возвращался. Попытка выхода из положения была предложена другими авторами /Pennock et al., 1987/, использующими, по существу, неколичественный подход R.V.Ruhe /1960/ в сочетании с классификацией по плановой и профильной кривизнам. П.А.Шарый /1990/ показал, что в горизонтальной и профильной кривизнах уже частично потеряна информация как о полной кривизне поверхности, так и об ориентации ее в поле притяжения, и предложил обобщение классификации Гаусса для поверхности в силовом поле, включающее как частный случай классификации по знакам плановой и профильной кривизн. Эта классификация основана, однако, только на локальных величинах и потому не отражает относительное положение участка по рельефу.

Свободная от этого недостатка количественная классификация в настоящее время отсутствует. Причина, по-видимому, заключается в недостаточной полноте хорошо определенных топографических величин и отсутствии развитой теории поверхности в поле притяжения Земли. Последнее легко заметить уже из неразвитости соответствующего направления в математике /Математическая энциклопедия, 1977–1985/, где теоремой Сарда об уровнях множествах (то есть горизонталях) практически исчерпаны фундаментальные результаты о поверхности в векторном поле со скалярным потенциалом. Подчеркнем во избежание недоразумений, что по отдельности теория поверхности (например, дифференциальная геометрия) и теория поля весьма развиты; речь идет о неразвитости математической теории системы "поверхность–поле".

А.Н.Ласточкин /1987/ систематически использовал понятие структурных линий в геоморфологии. П.А.Шарый, И.Н.Степанов /1991/ ввели производящие функции этих линий (равные нулю на них); для структурных линий "второго типа" такая функция известна (профильная кривизна). Структурную линию, имеющую производящей функцией плановую кривизну, впервые ввел П.К.Соболевский /1932/. И.Н.Степанов с соавт. /1987/ предложили для нее термин "морфоизограф"; эта структурная линия, разделяющая области конвергенции и дивергенции, использовалась им и коллегами в почвоведении, гидрологии и мелиорации /Метод пластики рельефа...1987*/. Че-

*Видимо, "пластика рельефа" – не вполне ясное название для соответствующих методов и приложений топографии; во всяком случае А.В.Поздняков, И.Г.Черванев /1990/, ссылаясь на цитированную книгу, интерпретируют это название иначе и никак не связывают материал книги с подходом П.К.Соболевского /1932/ и J.Krcho /1973/.

четыре других структурных линии А.Н.Ласточкин /1987/ разделил на два типа: 1) тальвеги, водоразделы и 2) бровки, подножия. Линии первого типа важны в гидрологии и могут быть выделены удельной дисперсивной и водосборной площадью, соответственно

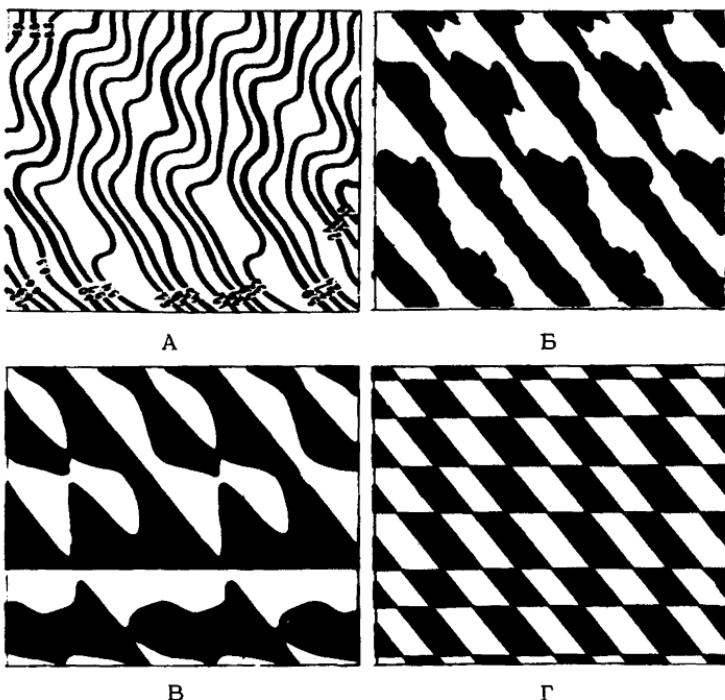


Рис. Модельная топографическая поверхность $z=4+(\sin 3(x+y)+\sin 6(x+y)+\sin 3y+\sin by)/10-x+0.3y^2$, начало координат - в центре, $-2.7 < x < 2.7$, $-1.8 < y < 1.8$. А - горизонтали, Б - профильная кривизна, В - плановая кривизна, Г - гауссова кривизна; черные области соответствуют отрицательным значениям кривизн

/ Speight, 1968; Jenson, Domingue, 1988/, но также и локальными топографическими величинами /Шарый, Степанов, 1991/; линии второго типа, существенные при составлении цифровой модели рельефа /Douglas, 1986/, не выделяются водосборной или дисперсивной площадью, но могут быть выделены локальными величинами /Шарый, Степанов, 1991/. Вычислительные алго-

ритмы для этих целей описали Т.К.Peuker, D.H.Douglas /1975/, D.H.Douglas /1986/. Отметим свойство производящих функций структурных линий характеризовать выраженность последних в рельефе /Шарый, Степанов, 1991/.

Топографические методы могут выявлять как процессы (или потоки), зависящие от гравитации, так и характерные формы, не обязательно связанные с полем притяжения. Важно уже обсуждалось использование не зависящей от поля средней кривизны поверхности. По отношению к известному в почвоведении рельефу гильгаи /Wilding et al., 1983/ или изучаемому в геологии наложению складчатых структур тектонического происхождения /Плотников и др., 1989/ полезнее может быть гауссова кривизна, также не зависящая от поля. На рисунке показана отвечающая этим примерам модельная топографическая поверхность, причем характерные формы маскируются вытянутой в направлении запад-восток депрессией и общим наклоном местности к востоку. Видно, что гауссова кривизна позволяет восстановить эти характерные формы, тогда как плановая и профильная кривизны, зависящие от поля притяжения, решают эту задачу менее эффективно.

В связи с развитием дистанционного зондирования, в том числе стереоскопической аэро- и космосъемки, топографические методы используются в следующих приложениях. Н.В.Papo, E.Gelman /1984/ предложили метод расчета гауссовой и средней кривизн по фотограмметрическим данным. T.D.Frank /1988/ использовал топографические величины в геоботанике как средство различить по космоснимкам Landsat субальпийский и альпийский растительные покровы. S.E.Franklin /1987/ нашел, что использование локальных топографических величин, включая кривизны, повышает эффективность дешифрирования космоснимков с 46% до 75%. J.D.Flash, T.R.E.Chilley /1988/ отмечают возможность использования данных стереоснимков для нахождения порядков речной сети, водосборной площади применительно к изучению водных ресурсов и эрозии. M.Poscolieri, G.Onorati /1988/ осуществили классификацию карбонатных массивов в Италии по крутизне и ориентации склонов. A.F.Moor, C.J.Simpson /1983/ и R.A.Schowengerdt, C.E.Glass /1983/ показали, что изучение региональной тектоники более целесообразно и экономически эффективно не на основе данных дистанционного зондирования (радиолокационная съемка, космоснимки Landsat), а на основе DEM. J.Chorowicz et al. /1989/ использовали DEM для составления геолого-геоморфологических карт с применением значений крутизны и профильной кривизны.

T.P.Burt /1988/ отметил, что в последнее время опубликован ряд работ, в которых делаются попытки количественного моделирования педогеоморфологических процессов с использованием локальных топографических величин. Ограничимся здесь, однако, ссылкой на обзор этого автора и общим замечанием, что одни лишь

локальные топографические величины могут быть недостаточны для описания развития рельефа.

Отметим в заключение возможную негативную роль пренебрежения международным опытом применения методов топографии в ландшафтных исследованиях*.

ЛИТЕРАТУРА

Гедымин А.В., Сорокина Н.П. О "методе пластики рельефа"// Почвоведение. 1988. № 6. С. 110-120.

Ефремов Ю.К. Опыт морфологической классификации элементов и простых форм рельефа//Вопросы географии. Картография. Вып. 11. М.: Географиздат, 1949, С. 109-136.

Ласточкин А.Н. Морфодинамический анализ. Л.: Недра. 1987. 256 с.

Математическая энциклопедия, Т. 1-5/Под. ред. Виноградова И.М. М.: Сов. энциклопедия. 1977-1985.

Метод пластики рельефа в тематическом картографировании. Сборник научных трудов. Пущино: ОНТИ НЦБИ АН СССР. 1987. 160 с.

Плотников Л.М., Македон И.Д., Васильев В.М. Математическое моделирование пересечений разновергентных складчатых структур// ДАН СССР. 1989. Т. 39. № 2. С. 412-415.

Поздняков А.В., Черванев И.Г. Самоорганизация в развитии форм рельефа. М.: Наука. 1990. 205 с.

Симакова М.С. О новом методе картографирования почв с использованием пластики рельефа//Почвоведение. 1988. № 6. С. 121-127.

Соболевский П.К. Современная Горная Геометрия//Социалистическая реконструкция и наука, 1932. Вып. 7. С. 42-78. (Статья воспроизведена в приложении настоящего сборника).

Степанов И.Н. Истинные и ложные линии на почвенных картах// Почвоведение. 1990. № 3. С. 128-146.

* По этой причине, например, трудно признать основательной аргументацию оппонентов отмеченного выше метода "пластики рельефа" (А.В.Гедымин, Н.П.Сорокина /1988/ и М.С.Симакова /1988/) в недавней дискуссии о почвенном картировании с учетом рельефа. Любопытно, что редакция журнала "Почвоведение" решила прекратить обещавшую статью плодотворной дискуссию на статье И.Н.Степанова /1990/, уступив тем самым исключительное право на подобные обсуждения зарубежным коллегам. Правда, обсуждения такого рода возникали за рубежом и раньше /например, Pennock et al., 1987/, но их опыт не принимается во внимание ни редакцией "Почвоведения", ни упомянутыми оппонентами.

Степанов И.Н., Лошакова Н.А., Саталкин А.И. и др. Составление почвенных карт с использованием системного картографического метода - пластики рельефа//Метод пластики рельефа в тематическом картографировании. Пушкино: ОНТИ НЦБИ АН СССР. 1987. С. 7-22.

Степанов И.Н., Флоринский И.В., Шарый П.А. О концептуальной схеме исследований ландшафта//Наст. сб. С. 9-15.

Шарый П.А. Топографический метод вторых производных//Наст. сб. С. 30-60.

Шарый П.А. Классификация точек поверхности в силовом поле//Теория и практика классификации и систематики в народном хозяйстве. Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического симпозиума с международным участием. Пушкино, 17-19 декабря 1990 г. М.: НИВЦ АН СССР, ВИНТИ АН СССР и ГКНТ СССР. 1990, С. 104-105.

Шарый П.А., Степанов И.Н. О методе вторых производных в геологии//ДАН СССР 1991. Т. 219. № 2.

Aandahl A.R. The characterization of slope positions and their influence on the total nitrogen content of a few virgin soils of western Iowa//Soil. Sci. Soc. Am. Proc. 1948. V. 13. P. 449-454.

Anderson M.G., Burt T.P. The role of topography in controlling throughflow generation //Earth Surface Processes, 1978. V. 3. No 4. P. 331-344.

Anderson M.G., Burt T.P. The role of topography in controlling throughflow generation: a reply//Earth Surface Processes, 1980. V. 5. No 2. P. 193-195.

Barsch D., Liedtke H. Principles, scientific value and practical applicability of the geomorphological map of the Federal Republic of Germany at the scale of 1:25000 and 1:100000 (GMK-100)//Z.Geomorphologie. 1980. Suppl. Bd. 36. P. 296-313.

Beven K. Towards the use of catchment geomorphology in flood frequency predictions //Earth Surface Processes & Landforms. 1987. V. 12. No 1. P. 69-82.

Beven K., Wood F. Catchment geomorphology and the dynamics of runoff contributing areas //J.Hydrol. 1983. V. 65. No 1/3. P. 139-158.

Burt T.P. Slopes and slope processes //Progress in Physical Geography. 1988. V. 12. No 4. P. 583-594.

Burt T.P., Butcher D.P. Topographic controls of soil moisture distribution//J.Soil Sci. 1985. V. 36. No 3, P. 469-486.

Carter J.R. Digital representations of topographic surfaces //Photogram. Eng. & Remote Sensing. 1988. V. 54. No 11. P. 1577-1580.

Chorowicz J., Kim J., Manoussis S. et al. A new technique for recognition of geological and geomorphological patterns in digital terrain models //Remote Sens. Environ. 1989. V. 29. No 3. P. 229-239.

Clarke K.C. Scale-based simulation of topographic relief //The Amer. Cartographer. 1988. V. 15. No 2. P. 173-181.

Conacher A.J., Dalrymple J.B. The nine unit landsurface model: an approach to pedogeomorphic research // Geoderma. 1977. V. 18, No 1-2, P. 1-154.

Cox N.J., Evans I.S. Introduction //Earth Surface Processes and Landforms. 1987. V. 12. No 1. P. 1-2.

Dalrymple J.B., Blong R.J., Conacher A.J. A hypothetical nine unit landsurface model //Z.Geomorphol. 1968. V. 12, P. 60-76.

Daniels R.B., Gilliam J.W., Cassel D.K. et al. Soil erosion class and landscape position in the North Carolina piedmont //Soil Sci. Soc. Am. J., 1985. V. 49. No 4. P. 991-995.

Dikau R. Case studies in the development of derived geomorphic maps //Geologisches Jahrbuch. 1988. A. 104. P. 329-338.

Douglas D.H. Experiments to locate ridges and channels to create a new type of digital elevation model //Cartographica. 1986. V. 23. No 4. P. 29-61.

Evans I.S. General geomorphometry, derivations of altitude and descriptive statistics // Spatial analysis in geomorphology. L.: Methuen and Co LTD, 1972, P. 17-90.

Evans I.S. An integrated system of terrain analysis and slope mapping //Z.Geomorphologie. 1980. Suppl. Bd. 36. P. 274-285.

Evans I.S. General geomorphometry //Geomorphological Techniques. L.: George Allen and Unwin, 1981. P. 31-37.

Flash J.D., Chidley T.R.E. Digital elevation models and their application to remote sensing of water resources //IGARSS'88, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 12-26 Sept. 1988, Edinburg. Paris: ESA, 1988. P. 1545-1546.

Frank T.D. Mapping dominant vegetation communities in the Colorado Rocky Mountain Front Range with Landsat Thematic Mapper and digital terrain data //Photogram. Eng. & Remote Sensing. 1988. V. 54. No 12. P. 1727-1734.

Franklin S.E. Terrain analysis from digital patterns in geomorphometry and Landsat MSS spectral response //Photogram.

togram. Eng. & Remote Sensing. 1987. V. 53. No 1. P. 59–65.

Gauss C.F. *Disquisitiones generales circa superficies curvas*, 1827. (Имеется перевод: Гаусс К.Ф. Общие исследования о кривых поверхностях//Об основаниях геометрии. Сб. классических работ по геометрии Лобачевского и развитию ее идей. М.: Гос. изд-во тех. лит-ры. 1956. С. 123–161).

Gerrard A.J. Soils and landforms. An integration of geomorphology and pedology. L.: George Allen & Unwin. 1981. 219 p. (Имеется перевод: Джерард А. Почвы и формы рельефа. Комплексное геоморфолого-почвенное исследование. Л.: Недра. 1984. 208 с.).

Govers G. Selectivity and transport capacity of thin flows in relation to rill erosion//Catena. 1985. V. 12. No 1. P. 35–49.

Hall G.F. Pedology and geomorphology //Pedogenesis and Soil Taxonomy. 1. Concepts and Interactions. Amsterdam: Elsevier Sci. Publ. 1983. P. 117–140.

Hugget R.G. Soil landscape system: a model of soil genesis//Geoderma, 1975. V. 13. No 1. P. 1–22.

Jenson S.K., Dominique J.Q. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis.//Photogram. Eng. & Remote Sensing. 1988. V. 54. No 11. P. 1593–1600.

Kachanovski R.G., de Jong E., Rolston D.E. Spatial and spectral relationships of soil properties and microtopography: II. Density and thickness of B horizon//Soil Sci. Soc. Am. J. 1985. V. 48. No 3. P. 185–205.

Klemeš V. Conceptualisation and scale in hydrology//J. Hydrol. 1972. V. 65. No 1/3. P. 1–23.

Krcho J. Morphometric analysis of relief on the basis of geometric aspect of field theory//Acta Geographica Univ. Comenianae. Geographico-physica. No 1. P. 7–233.

Krcho J. Teoreticka koncepcia i interdisciplinarme aplikacie komplexneho digitalneho modelu reliefu pri modelovaní dvojdimenzionalnych polí//Geogr. časopis. 1983. V. 35. No 3. P. 265–291.

Krcho J. Matematicke vlastnosti georeliefu z hladiska geometrickych forem a jeho modelovanie aproximujuci-funkciami dvoch premennych//Geogr. časopis. 1989. V. 14. No 1. P. 23–47.

Kvetkauskas V. Keturspalvis morfografinis žemėlapis//Geografinis metraštis VI–VII. Ledyninio reljefo morfogenetė ir dabartiniai egzogeniniai procesai. Vilnius: Liefuvos TSR mokslo akademija. 1963–1964. P. 87–107.

Lanyon L.E., Hall G.F. Land surface morphology:
2. Predicting potential landscape instability in eastern

- Ohio//Soil Sci. 1983. V. 136. No 6. P. 382-386.
- Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature. N.Y.: W.H.Freeman & Comp. 1983. 468 p.
- Mark D.M. Automated detection of drainage networks from digital elevation models //Cartographica. 1984. V. 21. No 2/3. P. 168-178.
- Martz L.W., de Jong E. The relationship between land surface morphology and soil erosion and deposition an a small Saskatchewan basin//Proc. 7th Canadian Hydrotechnical Conference. Saskatoon. Canada. 1985. P. 1-19.
- Martz L.W., de Jong E. Using Cesium-137 to assess the variability of net soil erosion and its association with topography in a Canadian Prairie landscape//Catena. 1987. V. 14. No 5. P. 439-451.
- Martz L.W., de Jong E. CATCH: a Fortran program for measuring catchment area from digital elevation models // Computers and Geosci. 1988. V. 14. No 5. P. 627-640.
- Martz L.W., de Jong E. Natural radionuclides in the soils in small agricultural basin in the Canadian Prairies and their assosiations with topography, properties and erosion//Catena. 1990. V. 17. No 1. P. 85-96.
- Moor A.F., Simpson C.G. Image analysis - a new aid in morphotectonic studies//Proc. 17th Int. Symp. Remote Sensing of Envir. V. 3. Ann Arbor: ERIM. 1983. P. 991-1002.
- Moss A.J., Walker P.H. Particle transport by continental water flows in relation to erosion, deposition, soils, and human activities//Sediment. Geol. 1978. V. 30. No 2. P. 81-139.
- O'Longhlin E.M. Saturation regions in catchments and their relations to soil and topographic properties// J.Hydrol. 1981. V. 53. No 3-4. P. 229-246.
- Papo H.B., Gelbman E. Digital terrain models for slopes and curvatures //Photogram. Eng. & Remote Sensing. 1984. V. 50. No 6. P. 695-701.
- Pennock D.J., ZebARTH B.J., de Jong E. Landform classification and soil distribution in hummocky terrain, Saskatchewan, Canada//Geoderma. 1987. V. 40. No 3-4. P. 297-315.
- Peucker T.K., Douglas D.H. Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data //Computer Graphics and Image Processing. 1975. V. 4. No 4. P. 357-387.
- Phillips J.D. The role of spatial scale in geomorphic systems//Geogr. Analysis. 1988. V. 20. No 4. P. 308-317.

Poscolieri M., Onorati G. A quantitative geomorphology study of main carbonate massives of central and southern Apennines based on a digital elevation archive//IGARSS'88, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 12-26 Sept. 1988, Edinburgh. Paris: ESA, P. 1653-1654.

Ruhe R.V. Elements of the soil landscape//Trans. 7th Int. Congr. Soil Sci. V. 4. Madison, 1960. P. 165-170.

Schowengerdt R.A., Glass C.E. Digitally processed topographic data for regional tectonic evaluation//Geol. Soc. Amer. Bull. 1983. V. 94. No 4. P. 549-556.

Sinai G., Zaslavsky D., Golany P. The effect of soil surface curvature on moisture and yield//Beer Sheba observations. Soil Sci. 1981. V. 132. No 5. P. 367-375.

Speight J.G. Parametric description of landform//Land Evaluation. L.: Macmillan. 1968. P. 239-250.

Speight J.G. A parametric approach to landform regions//Progress in Geomorphology. Oxford: Alden Press. 1984. P. 213-230.

Speight J.G. The role of topography in controlling throughflow generation: a discussion//Earth Surface Processes. 1980. V. 5. No 2. P. 187-191.

Stone J.R., Gilliam J.W., Cassel D.K. et al. Effect of erosion and landscape position on the productivity of Piedmont Soils//Soil Sci. Soc. Am. J. 1985. V. 49. No 4. P. 987-991.

Troeh F.R. Landform parameters correlated to soil drainage//Soil Sci. Am. Proc., 1964. V. 28. No 6. P. 987-991.

Wilding L.P., Smeck N.E., Hall G.F. (eds.) Pedogenesis and Soil Taxonomy. I. Concepts and Interactions. Amsterdam: Elsevier Sci. Publ. 1983. 303 p.

Zaslavsky D., Rogowski A.S. Hydrologic and morphologic implications of anisotropy and infiltration in soil profile development//Soil Sci. Am. Proc. 1969. V. 33. No 4. P. 594-599.

Zevenbergen L.W., Thorne C.R. Quantitative Analysis of land surface topography //Earth Surface Processes and Landforms. 1987. V. 12. No 1. P. 47-56.

ТОПОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ВТОРЫХ ПРОИЗВОДНЫХ

П.А.Шарый

Введение

Тематические карты в почвоведении, геоморфологии, геоботанике и др. составляются с использованием топографических карт в качестве основы. Последние включают в себя обычно семейство изолиний равных высот – горизонталей (изогипсы, изобаты) с на-несенными на них отметками высот.

Топографическая основа в этом виде далеко не всегда адекватна целям построения тематических карт, связанных, как правило, со свойствами поверхности в поле притяжения Земли (далее условимся называть это поле гравитационным и писать о земной поверхности, хотя это может быть и поверхность раздела сред "вода – дно океана") потому, что условия протекания физико-химических и биологических процессов отнюдь не всегда зависят только от высоты, но чаще – от ее дифференциальных (кругизна, кривизна и др.) и нелокальных характеристик. По этим причинам вполне естественны попытки разработать более совершенную топографическую основу; в данной работе ограничимся изучением дифференциальных характеристик, не затрагивая нелокальные.

Известны сходные работы в геофизике (в грави- и магнитометрии): начавшиеся в 1935 г., они привели в 1949 г. к публикации в США так называемого метода вторых производных /28/, получившего впоследствии широкое развитие (см., например, /20/). В 1951 г. на базе модификации этого метода для гравиметрии /21/ была показана его применимость по отношению к поиску полезных ископаемых /20, 21/. Отметим, однако, что геофизический метод вторых производных не может быть механически перенесен в топографию, поскольку описывает энергетическую, а не земную поверхность, и имеет специфический физико-математический аппарат.

По отношению к тематическим картам в геоморфологии и геологии первые попытки формулировки ряда положений топографического метода вторых производных, насколько нам известно, предпринял в 1932 г. П.К.Соболевский, отмечавший на картах "геометрическое место точек перегиба" изогипс /16, с. 53/ и выделявший положительные и отрицательные радиусы кривизны горизонталей. К сожалению, эти работы на длительное время прекратились.

В конце 60-х гг. топографический метод вторых производных получил дальнейшее развитие в работах И.Н.Степанова и сотр. по "пластике рельефа" применительно к составлению почвенных и почвенно-мелиоративных карт /9/. Как и в работах П.К.Соболевского, основой здесь явились названные морфозограммами линии, являющиеся геометрическим местом точек перегиба горизонталей. Новый шаг состоял в выделении (цветом) "областей понижения" и "облас-

тей повышения", общей границей которых является морфоизографа.

В 1970 г. была прислана в издательство, в 1973 г. опубликована работа Й.Крхо /22/, где впервые выведены уравнения двух семейств связанных со второй производной изолиний (кривизны поверхности); одна из этих изолиний, как будет показано ниже, и есть морфоизографа. С этого времени в ЧСФР опубликован ряд работ, посвященных методу вторых производных в геоморфологии /22-27/.

Разработанная в приближении однородного гравитационного поля (см. ниже), теория Крхо в силу громоздкости и нестрогости вывода формул малопригодна для обобщений на средние и мелкие масштабы (это, однако, относится не к значимости, а к качеству рассматриваемой теории).

Отметим еще одну важную работу 1827 г. К.Ф.Гаусса /3/ по геодезии, посвященную выражавшейся через вторые производные полной (гауссовой) кривизне поверхности и давшую начало дифференциальной геометрии /10, 13/. Дело в том, что под топографическим методом вторых производных мы понимаем прежде всего метод изолиний, зависящих от направления гравитационного поля (подобно горизонталям). В дифференциальной геометрии же изучаются свойства самой поверхности, не зависящие от внешних полей.

Цель настоящей работы состоит в построении пригодной для обобщений на средние и мелкие масштабы теории (топографического) метода вторых производных.

2. Приближение однородного гравитационного поля

Основным объектом геоморфологии является поверхность раздела сред Земли (атмосфера – суша, вода – дно океана и т.п.), которая обычно аппроксимируется топографической поверхностью, представляющей собой двумерное дифференцируемое многообразие \mathcal{S} в трехмерном евклидовом пространстве E^3 . Из экзогенных и эндогенных факторов, определяющих изменение \mathcal{S} со временем, выделяются два фактора фундаментального значения – гравитационное поле и земная поверхность /12/, оба измеримые.

Ограничим рассмотрение участком поверхности Земли много меньше ее радиуса, для которого к тому же горизонтальные поверхности можно (в диапазоне от максимальной h_{max} до минимальной высоты h_{min} местности) считать параллельными плоскостями. Последнее означает, что речь идет об однородном гравитационном поле $\mathbf{g} = -\mathbf{g} \cdot \mathbf{k}$, где \mathbf{k} есть направленный вверх ось \mathbf{z} прямоугольной декартовой системы координат с базисом $i, j, k \in E^3$; отметим, что в этом приближении гравитационные аномалии не могут быть рассмотрены.

Определим в E^3 открытый прямоугольный параллелепипед P (его замыкание обозначим \bar{P}), две противоположные грани которого

перпендикулярны \vec{k} и имеют высоту h_{min} и h_{max} , а остальные ограничивают рассматриваемый участок Земли, сферичностью планеты в котором можно пренебречь. Открытый прямоугольник, замыкание которого \vec{G} есть нижняя грань P , обозначим G . Еще одно упрощающее ограничение состоит в том, что рассматриваемый участок топографической поверхности $S \subset P$ описывается на G однозначной бесконечно дифференцируемой функцией $z = h(x, y)$. Смысл этого ограничения таков: в целях простоты исключить из рассмотрения бесконечно крутые ступени, обрывы, случаи пещер, нависающих скал и т.п.

В \bar{P} гравитационный потенциал $\Psi = g \cdot z$. Действительно, в силовом поле с потенциальной энергией Ψ сила есть $-grad \Psi$ /6/. Гравитационный потенциал в ньютоновском приближении теории тяготения /19/ есть потенциальная энергия единичной массы; сила, действующая на единичную массу – это ускорение. Поэтому $\vec{g} = -grad \Psi = -g \cdot \vec{k}$, где во втором равенстве использовано выражение $g \vec{z}$ для потенциала; выбранный потенциал соответствует однородному гравитационному полю в \bar{P} .

Использование ньютоновской теории тяготения по отношению к Земле обосновывается ничтожно малым отклонением свойств пространства от евклидова вблизи земной поверхности /5, с. 32/.

3. Метод вторых производных в гравиметрии

Кратко рассмотрим метод вторых производных в гравиметрии, чтобы понять, что он дает и в чем его специфика.

Статика гравитирующих масс в ньютоновском приближении описывается уравнением Пуассона

$$\Delta \Psi = -4\pi \gamma \rho, \quad /19/$$

(ρ – плотность, γ – постоянная тяготения), частным случаем которого вне земли (в воздухе, в околоземном космическом пространстве), когда плотность близка к нулю, является уравнение Лапласа $\Delta \Psi = 0$. Измеряются обычно производные Ψ (напомним, что $\vec{g} = -grad \Psi$) вне земли. Случай измерений в скважинах и под водой относительно редки /20/. Требуется восстановить плотность масс под землей по надземным измерениям.

Обычно результаты измерений выражаются картой гравитационных аномалий. Эти карты еще слабо визуализируют подземные скопления масс (например, связанные с месторождением); требуемая визуализация достигается методом вторых производных.

Специфика метода состоит в использовании уравнения Лапласа

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = -\left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2}\right),$$

которое позволяет выразить вторую производную в вертикальном направлении z через вторые производные по x и y .

Отметим, что задача восстановления $\rho(\vec{r})$ полностью обычно не решается по карте гравитационных аномалий, что в методе вторых производных используются еще третья производные и что общим свойством метода вторых производных является большая чувствительность к ошибкам в исходных данных /20/.

Земная поверхность не описывается уравнением Пуассона, Лапласа или аналогичным (прежде всего в том смысле, что она одна, а не представляет собой семейство поверхностей); поэтому математический аппарат гравиметрии или магнитометрии непосредственно не переносится на случай топографии.

4. Выбор математических средств анализа

Мы ставим целью изучить находящуюся в однородном гравитационном поле топографическую поверхность, заданную функцией $z = h(x, y)$. Эта задача уже ставилась в литературе (см. введение), но отсутствие явно очертенного физического приближения и недостаточная строгость вывода соотношений привели, во-первых, к громоздкости теории, во-вторых, к наличию в ней незамеченных существенных нерешенных задач и, в-третьих, к сложности обобщений.

Метод изолиний /16/ есть представление геометрического места точек заданного свойства поверхности \mathcal{S} в гравитационном поле кривыми на карте. Стого говоря, это не всегда возможно. Например, горизонтальному участку \mathcal{S} соответствует горизонталь не в виде кривой, а в виде площадки; вершине холма отвечает изолированная точка. Короче, \mathcal{S} в гравитационном поле будет иметь – и возможно, не все устранимые (бесконечно малым преобразованием \mathcal{S}), особые точки, поведение изолиний в которых (и в их окрестности) заслуживает специального изучения. Значит, в теории имеет смысл различать множество особых и неособых точек \mathcal{S} .

Для этого будем использовать теорию множеств.

Топографическая поверхность вне зависимости от наличия гравитационного поля имеет определенные свойства, изучаемые в дифференциальной геометрии (то же можно заметить и о кривых); связь этих свойств и качеств \mathcal{S} в гравитационном поле важно не упускать из виду. Поэтому будем использовать дифференциальную геометрию.

Использование алгебры и математического анализа подразумевается. В настоящее время значительная часть теории кривых из дифференциальной геометрии /13/ уже вошла в курсы математического анализа – см., например /10/ – и мы будем пользоваться этим.

5. Горизонтали и особые точки

Горизонталью назовем геометрическое место точек пересечения горизонтальной поверхности $\vartheta(\vec{r}) = \text{const}$ с топографической по-

верхностью \mathcal{G} ; в случае поверхности раздела сред "атмосфера – суша" это изогипсы, в случае "вода – дно океана" говорят об изобатах /4, 14, 16/. В приближении однородного поля $Y(r) = g_z$, и горизонталь на \mathcal{G} удовлетворяет уравнениям

$$\begin{cases} z = z_0 \\ h(x, y) = z_0 \end{cases}, \quad (5.1)$$

откуда видно, что все точки горизонтали лежат на горизонтальной плоскости $z = z_0$, и если они образуют кривую, то эта кривая – плоская.

Достаточные условия того, чтобы горизонталь (5.1) являлась бесконечно дифференцируемой кривой на \mathcal{G} , легко получить из теорем о существовании неявной функции /10, § 7.16/. Используя обозначения

$$p = \frac{\partial h}{\partial x}, \quad q = \frac{\partial h}{\partial y}, \quad r = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}, \quad s = \frac{\partial^2 h}{\partial x \partial y}, \quad t = \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}, \quad (5.2)$$

запишем эти условия (именно: p и q не равны нулю одновременно) в виде

$$p^2 + q^2 > 0. \quad (5.3)$$

Под кривой (плоской) здесь понимается участок горизонтали, в некоторой окрестности каждой точки которого существует однозначное и единственное решение (5.1) в виде $y = y(x)$ или $x = x(y)$.

Множество N , удовлетворяющих (5.3) точек на \mathcal{G} , назовем множеством неособых точек \mathcal{G} . Оставшиеся точки \mathcal{G} , очевидно, удовлетворяют уравнению

$$p^2 + q^2 = 0 \quad (5.4)$$

и составляют, по определению, множество σ особых точек на \mathcal{G} : ясно, что N и σ не пересекаются.

Не уменьшая общности рассуждений, мы можем считать, что приближение однородного поля выполняется в открытом прямоугольном параллелепипеде $\Omega \supset \bar{P}$, грани которого параллельны \bar{P} ; тогда открытый прямоугольник $\omega \subset \bar{\Omega}$ содержит \bar{G} . Обозначим теперь N_ω множество неособых точек на ω и $\bar{\sigma} = \bar{G} \setminus N$ – множество особых точек на \bar{G} .

Утверждение. Множество N неособых точек открыто, а множество σ особых точек \mathcal{G} замкнуто. (5.5)

Доказательство первой части утверждения следует из непрерывности функции $p^2 + q^2$. Если точка $(x, y) \in \omega$ неособая, то и все точки некоторой ее окрестности принадлежат N_ω /10, § 7.3/. Таким образом, N_ω состоит из одних внутренних точек, то есть является открытым множеством. Пересечение $N_\omega \cap G$ двух открытых множеств, с одной стороны, есть открытое множество /1, с. 98/. а с другой – это есть множество неособых точек G , то есть N .

Вторая часть утверждения следует из определения σ как раз-

ности замкнутого множества \bar{G} и открытого множества N_ω (/1/, предложение 1, с. 105). Утверждение доказано.

Точки N названы неособыми потому, что на N горизонталь есть кривая. В особых точках $(x, y) \in \partial$ горизонталь может не быть кривой в обычном (определенном выше) смысле. В случае, когда $(x, y) \in G$ есть особая точка и $r^2 - s^2 > 0$ в этой точке, горизонталь высоты $z = h(x, y)$ имеет вид изолированной точки; при $r^2 - s^2 < 0$ в малой окрестности особой точки горизонталь имеет вид двух пересекающихся под ненулевым углом кривых (простейший пример — поверхность $z = xy$ при $x = y = 0$), при $r^2 - s^2 = 0$ (но $r^2 + s^2 + t^2 > 0$) в малой окрестности особой точки горизонталь может иметь так называемую точку возврата (рис. 1 б, в). Анализ этих случаев дан в работе /10, § 7.23/.

Отметим еще случай горизонтальной площадки на \bar{G} . Здесь горизонталь соответствующей высоты принимает, очевидно, вид этой площадки, что также не есть кривая (рис. 1, а).

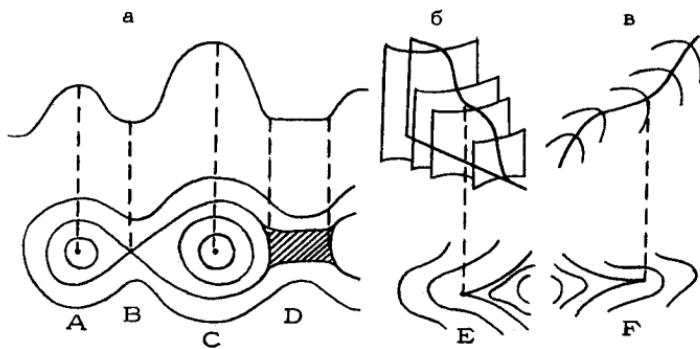


Рис. 1. Примеры особых точек топографической поверхности:
а — вертикальный разрез и горизонтали; А и С — изолированные
точки, В — самопересечение горизонтали, Д — горизонтальная
площадка. б, в — точки возврата горизонтали Е и F. Поверхности
изображены посредством вертикальных разрезов

Особые точки топографической поверхности \mathcal{S} могут иметь существенное значение для ее анализа. Изолированной особой точке отвечает локальный строгий экстремум \mathcal{S} (вершина холма или дно впадины). Случай $r^2 - s^2 < 0$ можно интерпретировать как самопересечение воспринимаемых как кривые (плоские) горизонталей: утверждение некоторых авторов о том, что такое самопересечение невозможно /14, 16/, является ошибочным. Крох /26, 27/ рассматривает частные случаи этого типа в седловине, однако в общей теории игнорирует, несмотря на то, что $r^2 + q^2$ вхо-

дит в знаменатель выведенных им формул для кривизны. Лукин /8/, рассматривая необычное поведение горизонталей (например, точки возврата) в ортогональной волновой модели Одесского /11/, отмечает их индикаторную роль в смысле выявления некоторых линий волновой модели (уравнение которых есть, очевидно (5.4), а происхождение связано с идеализацией в рассматриваемом варианте модели).

Отметим, что "абсолютно горизонтальные" участки \mathcal{S} могут быть ликвидированы сколь угодно малым изменением топографической поверхности; подробно, однако, в данной работе этот вопрос не рассматривается.

6. Линии тока и линии скольжения

Движение масс вдоль поверхности \mathcal{S} в гравитационном поле происходит под действием тангенциальной составляющей силы притяжения. Не рассматривая само движение, мы хотим сейчас определить лишь направление и величину этой составляющей (обозначим ее \vec{g}_t).

Пусть \vec{n} есть единичный вектор внешней нормали к \mathcal{S} в точке $\vec{r}_0 \in \mathcal{S}$. Тогда уравнение касательной плоскости в \vec{r}_0 к \mathcal{S} выражается через скалярное произведение /2/:

$$(\vec{r} - \vec{r}_0, \vec{n}) = 0. \quad (6.1)$$

Отложив из точки \vec{r}_0 вектор \vec{g} , получаем положение его конца в точке $\vec{r}_0 + \vec{g}$; расстояние от этой точки до касательной плоскости есть

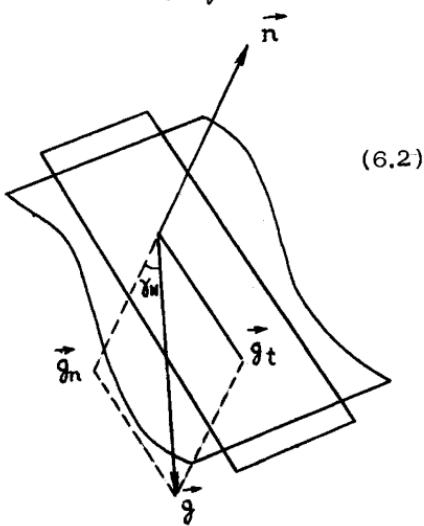
$$|(\vec{r}_0 + \vec{g} - \vec{r}_0, \vec{n})| =$$

$= |(\vec{n}, \vec{g})| /2/. Разложим вектор \vec{g} на тангенциальную \vec{g}_t и нормальную \vec{g}_n составляющие, рис. (6.2).$

Из $\vec{g} = \vec{g}_n + \vec{g}_t$ находим, что $\vec{g}_t = \vec{g} - \vec{g}_n$, но $|\vec{g}_n|$ есть расстояние $|(\vec{n}, \vec{g})| = -(\vec{n}, \vec{g})$.

Направление \vec{g}_n совпадает с $-\vec{n}$, поэтому

$$\vec{g}_n = \vec{n} \cdot (\vec{n}, \vec{g}) \quad \text{и}$$



$$\vec{g}_t = \vec{g} - \vec{n}(\vec{n}, \vec{g}), \quad (6.3)$$

причем (хотя формула (6.3) справедлива и в общем случае) отметим неравенство

$$(\vec{n}, \vec{g}) < 0. \quad (6.4)$$

Смысъ этого неравенства состоит в том, что угол между \vec{n} и \vec{g} есть тупой угол, то есть не рассматриваются пещеры, нависающие скалы и бесконечно крутые склоны.

Результаты (6.3) и (6.4) выведены без предположения об однородности гравитационного поля.

В приближении однородного поля $\vec{g} = -g\vec{k}$ с учетом выражения для внешней нормали к δ /10, § 7.24/

$$\vec{n} = (-p\vec{i} - q\vec{j} + \vec{k}) / (1 + p^2 + q^2)^{1/2} \quad (6.5)$$

легко убедиться, что условие (6.4) выполнено; величина

$$\vec{g}_t = -g \cdot \frac{p\vec{i} + q\vec{j} + (p^2 + q^2)\vec{k}}{1 + p^2 + q^2}. \quad (6.6)$$

Отметим еще, что в однородном поле

$$\begin{cases} \cos \gamma_N = (\vec{n}, \vec{g}) = \frac{1}{(1 + p^2 + q^2)^{1/2}}, \quad 0 \leq \gamma_N \leq \frac{\pi}{2} \\ \sin \gamma_N = \frac{\sqrt{p^2 + q^2}}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}} \\ \tan \gamma_N = \sqrt{p^2 + q^2}, \end{cases} \quad (6.7)$$

где γ_N есть угол между \vec{k} и \vec{n} /22/.

Линией скольжения назовем кривую на поверхности δ , определенную в неособых точках $N \subset G$, в каждой точке которой направление вектора касательной совпадает с направлением тангенциальной составляющей ускорения \vec{g}_t . В особых точках, очевидно, $\vec{g}_t = 0$ (так как $p = q = 0$) и направление \vec{g}_t , следовательно, не определено. Линии скольжения ориентированы в направлении спуска, поскольку \vec{g}_t -компоненты \vec{g}_t отрицательна на N .

Зная, что $|\vec{g}_t| = g \cdot \sin \gamma_N$, вводя обозначение ℓ для длины дуги линии скольжения и используя то обстоятельство, что в силу известного соотношения /10, § 6.7/

$$\left(\frac{dx}{d\eta} \right)^2 + \left(\frac{dy}{d\eta} \right)^2 + \left(\frac{dz}{d\eta} \right)^2 = 1 \quad (6.8)$$

вектор касательной к кривой $\dot{\vec{r}}_t = \frac{dx}{d\eta} \vec{i} + \frac{dy}{d\eta} \vec{j} + \frac{dz}{d\eta} \vec{k}$

есть единичный вектор, получаем

$$\vec{g}_t = g \cdot \sin \gamma_N \dot{\vec{r}}_t \quad \text{на } N \quad (6.9)$$

и из (6.6) находим, что

$$\dot{\vec{r}} = - \frac{\rho \vec{i} + q \vec{j} + (p^2 + q^2) \vec{k}}{(\rho^2 + q^2)^{1/2} (1 + p^2 + q^2)^{1/2}} \text{ на } N. \quad (6.10)$$

Докажем теперь, что на N любая горизонталь в точке пересечения с любой линией скольжения перпендикулярна ей.

Для этого достаточно доказать, что

$$(\dot{\vec{r}}, \dot{\vec{s}}) = 0 \quad \text{на } N, \quad (6.11)$$

где s — длина дуги горизонтали, а $\dot{\vec{s}}$ — вектор касательной к ней.

Дифференцируя уравнение горизонтали $h(x, y) = \text{const}$ по s и замечая, что для плоской кривой (6.8) примет вид $(\frac{dx}{ds})^2 + (\frac{dy}{ds})^2 = 1$, получаем

$$\rho \frac{dx}{ds} + q \frac{dy}{ds} = 0, \quad (6.12)$$

откуда

$$\dot{\vec{s}} = \pm (-q \vec{i} + \rho \vec{j}) / \sqrt{\rho^2 + q^2} \quad \text{на } N. \quad (6.13)$$

(выбор знака определяется выбором ориентации горизонтали), и выполнение (6.11) доказано.

Утверждение об ортогональности горизонталей и линий скольжения было сформулировано (но доказательства не приведено) П.К.Соболевским в 1932 г. /16, с. 53/.

Линиями тока называют проекции линий скольжения на горизонтальную плоскость G . Из выражения для $\dot{\vec{s}}$, обозначив длину дуги линии тока s , находим для вектора касательной $\dot{\vec{s}}$ к линии тока (плоской кривой):

$$\dot{\vec{s}} = -(\rho \vec{i} + q \vec{j}) / \sqrt{\rho^2 + q^2} \quad \text{на } N. \quad (6.14)$$

Отметим сразу же, что в линиях тока происходит потеря информации, содержащейся в (пространственных) линиях скольжения. Например, для радиально симметричного холма линии тока есть прямые, тогда как линии скольжения имеют точку перегиба, то, есть только последние содержат сведения о переходе линии скольжения выпуклой в вогнутую.

Линии тока также ортогональны горизонталям, поскольку $(\dot{\vec{s}}, \dot{\vec{r}}) = 0$ на N . Систематическое использование штрихов вдоль линии тока (гашию) в картографии началось в XVIII веке (например, штриховка И.Лемана, 1799 г.; см. /15, § 4.2/).

Покажем теперь, что в каждой неособой точке G направление,

в котором величина убывания высоты при бесконечно малом смещении максимальна, есть направление линии тока, то есть при движении по линии скольжения происходит наискорейшее убывание высоты.

Действительно, производная высоты $h(x, y)$ по направлению единичного вектора \vec{m} на N есть $/10, § 7.6/$.

$$\frac{\partial h}{\partial \vec{m}} = (\nabla h, \vec{m}) \leq |\nabla h| = \sqrt{p^2 + q^2}. \quad (6.15)$$

Здесь ∇h — двумерный градиент, то есть $\nabla h = p\vec{i} + q\vec{j}$. Отсюда из всех направлений \vec{m} лишь противоположное ∇h (то есть $-\nabla h$) дает максимальное убывание высоты. Но это как раз и есть направление $\vec{g} = -(p\vec{i} + q\vec{j}) / \sqrt{p^2 + q^2}$ вдоль линии тока.

Заметим, что попутно мы получили количественную меру этого максимального убывания высоты, а именно $\operatorname{tg} \gamma_N = \sqrt{p^2 + q^2}$.

7. Крутизна. Особые точки изолиний крутизны

Для определения крутизны в общем случае (неоднородное гравитационное поле, произвольная топографическая поверхность S') проведем следующие рассуждения.

Локально (для бесконечно малых смещений) гравитационное поле можно считать однородным. Тогда для малого участка S вблизи рассматриваемой точки $\vec{r}_0 \in S$ имеют смысл линия тока и линия скольжения; для бесконечно малого смещения их можно заменить на касательные. Касательная к линии скольжения направлена по \vec{g} , касательная к линии тока лежит на пересечении той плоскости, где определен угол γ_N (рис. 6.2), и плоскости $(\vec{r} - \vec{r}_0, \vec{g}) = 0$ (горизонтальной), причем между этим направлением и \vec{g} угол равен γ_N .

В предыдущем разделе мы установили, что $\operatorname{tg} \gamma_N$ есть количественная мера для максимального убывания высоты в однородном поле; отсюда возникает представление о крутизне $\operatorname{tg} \gamma_N$ как о соответствующей неотрицательной величине.

Ясно, что можно также определить и отрицательную крутизну, когда \vec{g} имеет острый угол с \vec{f} , то есть не выполняется (6.4) — пещеры, нависающие скалы и т.п.

Таким образом, используя

$$\cos \gamma_N = \left(-\vec{r}, \frac{\vec{g}}{|\vec{g}|} \right), \quad (7.1)$$

получаем

$$\operatorname{tg} \gamma_N = \frac{\left[1 - \left(\vec{r}, \frac{\vec{g}}{|\vec{g}|} \right)^2 \right]^{1/2}}{\left(-\vec{r}, \frac{\vec{g}}{|\vec{g}|} \right)} \quad (7.2)$$

для крутизны в общем случае.

Рассмотрим теперь приближение однородного гравитационного поля, когда выполняется (6.4). Подставим в (7.2) $\vec{g} = -\rho \vec{k}$ и, используя формулу (6.5) для нормали \vec{n} , получаем для крутизны уже известную нам формулу (6.7), (6.15)

$$\operatorname{tg} \gamma_N = \sqrt{\rho^2 + q^2}, \quad 0 \leq \gamma_N < \frac{\pi}{2}. \quad (7.3)$$

Отметим, что в особых точках крутизна обращается в ноль; таким образом, крутизна определена не только на N , но во всех точках G .

Можно определить на G двумерное векторное поле крутизны, потенциальной функцией которого является высота $h(x, y)$:

$$-\nabla h = -(\rho \vec{i} + q \vec{j}). \quad (7.4)$$

Этот вектор (длина его равна крутизне) направлен вдоль линии тока на N , равен нулю на \mathcal{O} , и к нему применимы известные теоремы теории поля [10, 16]. В частности, П.К.Соболевским [16, с. 60] отмечена независимость равного разности высот криволинейного интеграла

$$\int_{\Gamma} (\nabla h, d\vec{s}) = z_2 - z_1 \quad (7.5)$$

от формы (кусочно-гладкой) ориентированной кривой $\Gamma \subset G$, соединяющей заданные точки $(x_1, y_1), (x_2, y_2) \in G$, вытекающая из соответствующей теоремы теории поля [10, § 13.3]. Здесь $d\vec{s}$ есть векторный дифференциал длины дуги Γ , $z_1 = h(x_1, y_1), z_2 = h(x_2, y_2)$.

Изолинии крутизны описываются уравнением

$$\sqrt{\rho^2 + q^2} = \text{const}, \quad (7.6)$$

где const должна быть неотрицательной. Проводя аналогичные п. 5 рассуждения, находим, что уравнение

$$(\rho r + qs)^2 + (\rho s + qt)^2 = 0 \quad (7.7)$$

определяет замкнутое множество особых точек для изолиний крутизны на G , а неравенство

$$(\rho r + qs)^2 + (\rho s + qt)^2 > 0 \quad (7.8)$$

определяет открытое множество неособых точек для изолиний крутизны на G ; на этом множестве изолинии крутизны являются кривыми. Любые (не обязательно горизонтальные) плоские участки поверхности \mathcal{S} удовлетворяют (7.7), поскольку вторые производные для плоскости равны нулю; уже из этого примера видно, что множество особых точек изолиний крутизны на G не совпадает, вообще говоря, с \mathcal{O} (а множество неособых точек (7.8) – с N).

В п. 5 было показано, что особые точки горизонталей есть точки с нулевой крутизной. Другими словами, чтобы понять смысл особых точек функции, следует осознать смысл составленного из ее первых частных производных выражения. В случае изолиний крутизны ситуация аналогична, но соответствующее выражение будет содержать уже вторые производные. Имея в виду дальнейшее использование зависящих от вторых производных величин, преобразуем (7.7) к иному виду и уточним взаимоотношения $\mathcal{O}_v \subset N$ и множество особых точек изолиний крутизны $\mathcal{O}_v \subset G$.

Прежде всего заметим, что $\mathcal{O} \subset \mathcal{O}_v$. В самом деле, из $p^2 + q^2 = 0$ следует $p = q = 0$, что обращает (7.7) в тождество.

Далее, вводя функцию

$$k'_v = p^2 r + 2pq s + q^2 t, \quad (7.9)$$

замечаем, что из $(x, y) \in \mathcal{O}_v$ следует $k'_v = 0$. Действительно, (7.7) означает $pr + qs = ps + qt = 0$. Умножая первое из этих равенств на p , второе — на q и складывая полученные равенства, получаем $k'_v = 0$.

Вводя также функцию

$$K' = r^2 - s^2, \quad (7.10)$$

заметим, что

$$k'^2_v = p^2(pr + qs)^2 + q^2(ps + qt)^2 + s(p^2r + 2pq s + q^2t) - pq K', \quad (7.11)$$

причем третья скобка в правой части этого равенства есть k'_v .

Докажем теперь следующее утверждение. Для точек N

$$\text{верно } (x, y) \in \mathcal{O}_v \Leftrightarrow \begin{cases} k'_v = 0 \\ K' = 0. \end{cases} \quad (7.12)$$

Доказательство того, что $(x, y) \in \mathcal{O}_v \Rightarrow k'_v = K' = 0$, получаем из полученного выше результата $(x, y) \in \mathcal{O}_v \Rightarrow k'_v = 0$ и равенств (7.11) и (7.7). Обратное $((x, y) \in \mathcal{O}_v \Leftarrow k'_v = K' = 0)$ требует рассмотрения трех случаев: 1) $p \neq 0, q \neq 0$, 2) $p = 0, q \neq 0$ и 3) $p \neq 0, q = 0$ (случай $p = q = 0$ рассмотрен выше и отвечает $(x, y) \notin N$).

1) $p \neq 0, q \neq 0$. Из (7.11) с учетом $k'_v = K' = 0$ получаем $p^2(pr + qs)^2 + q^2(ps + qt)^2 = 0 \Rightarrow pr + qs = ps + qt = 0$, что означает выполнение (7.7), откуда $(x, y) \in \mathcal{O}_v$.

2) $p = 0, q \neq 0$. С учетом $k'_v = K' = 0$ получаем из (7.11) $t = 0$. Используя выражение (7.10), находим из $K' = 0$ равенство $s = 0$. Но при $r = t = s = 0$ выполняется (7.7), то есть $(x, y) \in \mathcal{O}_v$.

3) $p \neq 0, q = 0$. Аналогично находим из (7.11), что $r = 0, K' = 0$ с

учетом (7.10) и теперь дает $s=0$. При $q=r=s=0$ выполняется (7.7), что означает $(x, y) \in \mathcal{O}_q$. Утверждение доказано.

Итак, \mathcal{O}_q состоит из точек \mathcal{O} и тех точек N , где пересекаются решения уравнений

$$p^2r + 2pq s + q^2t = 0 \quad (7.13)$$

$$\text{и} \quad rt - s^2 = 0; \quad (7.14)$$

иных особых точек изолиний крутизны на G , согласно (7.12), нет.

Проще, доказано следующее:

- особые точки горизонталей есть также особые точки для изолиний крутизны;

- пересечение $K'_v=0$ и $K'_w=0$ на N есть тоже особые точки изолиний крутизны (но не горизонталей!);

- других особых точек изолиний крутизны на G нет.

Отметим, что дифференцирование (крутизна выражается через первые частные производные от $h(x, y)$) привело к появлению дополнительных особых точек ($\mathcal{O} \subset \mathcal{O}_q$) для изолиний.

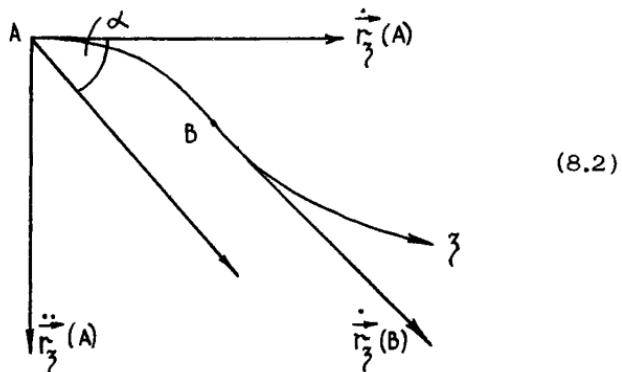
8. Геометрические понятия, связанные с кривизной

Геометрические понятия метода вторых производных, излагаемого в следующем разделе, не так уж сложны. Однако использование представлений и терминологии дифференциальной геометрии создало бы для незнакомого с ней читателя очевидные трудности. По этой причине и с целью ввести необходимые для дальнейшего термины, обозначения и формулы, предложим изложению метода краткое рассмотрение некоторых идей и понятий дифференциальной геометрии.*

Начнем с кривизны кривой (не обязательно плоской). То обстоятельство, что окружность радиуса R по определению имеет кривизну $1/R$, которую можно получить как отношение угла между касательными в концах какой-либо дуги окружности к длине этой дуги, дает идею определения кривизны кривой. Именно: если длина дуги кривой есть λ , то кривизна определяется как предел отношения угла α между касательными \overrightarrow{AB} (единичными, вследствие (6.8)) в точках А и В, см. рис. (8.2), к длине отрезка дуги AB :

$$k = \lim_{\Delta \lambda \rightarrow 0} \frac{\alpha}{\lambda}. \quad (8.1)$$

* Есть еще одна причина – встречающиеся в работах различных авторов по геоморфологии неудачные концепции и даже ошибочные утверждения, связанные с незнанием основных понятий геометрии поверхностей. Тому можно было бы привести немало примеров (такая цель здесь не ставится), но более целесообразно хотя бы кратко рассмотреть эти понятия.



(8.2)

Стрелкой на кривой показано направление возрастания ζ ; при противоположной ориентации кривой $\vec{\zeta}$ будет направлен в обратную сторону, $\vec{\zeta}$ не изменится

Доказано /10, § 6,9/, что

$$K = |\vec{r}_3|^{-1} \left[\left(\frac{d^2 x}{d \zeta^2} \right)^2 + \left(\frac{d^2 y}{d \zeta^2} \right)^2 + \left(\frac{d^2 z}{d \zeta^2} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (8.3)$$

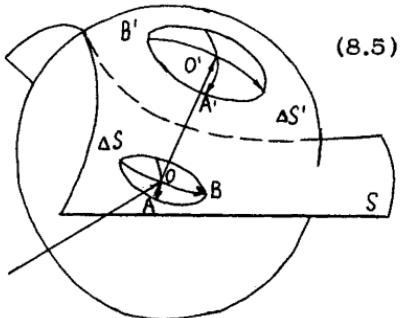
Геометрический смысл \vec{r}_3 состоит в том, что этот вектор направлен в сторону вогнутости кривой, см. рис. (8.2), и ортогонален $\vec{\zeta}$ (дифференцируя $(\vec{r}_3, \vec{\zeta}) = 1$ по ζ , получаем $2(\vec{r}_3, \vec{\zeta}) = 0$, что и доказывает перпендикулярность).

Единичный вектор $\vec{v} = \vec{r}_3 / |\vec{r}_3|$, определенный во всех точках кривой, где кривизна отлична от нуля, называется вектором главной нормали.

Обобщение идеи определения кривизны (8.1) на случай поверхности впервые предложено в 1827 году в замечательной работе К.Ф.Гаусса /3/, положившей начало дифференциальной геометрии поверхностей. Полная (гауссова) кривизна K в точке \vec{r} поверхности \mathcal{S} определяется как предел отношения площади изображения, см. рис. (8.5), на единичной сфере вокруг точки \vec{r} (или, что то же, телесного угла $\Omega / 18$, т. III, с. 272/), получаемого лучком нормалей, образуемых точками содержащего \vec{r} участка ΔS поверхности \mathcal{S} (с началом в \vec{r}), к площади $|\Delta S|$:

$$K = \pm \lim_{|\Delta S| \rightarrow 0} \frac{\Omega}{|\Delta S|}. \quad (8.4)$$

Этим знак K еще не определен: Гаусс /3/ завершает определение, заметив, что есть два случая: когда изображение на сфере сохраняет (либо меняет) направление любых выходящих из точки \vec{r} и



(8.5)

$\Delta S'$ – изображение ΔS
 O – точка \vec{F} , OO' –
 нормаль \vec{n} в точке \vec{F}

лежащих на ΔS кривых (тогда выбирается +) и когда для одних кривых это так, для других – нет (этот случай изображен на рис. (8.5): кривая OB меняет направление в изображении $O'B'$, кривая OA имеет то же направление, что $O'A'$. Тогда выбирается –). Если S выражается формулой $\vec{z} = \vec{h}(x, y)$, то в принятых здесь обозначениях имеем /3/

$$K = \frac{r^2 - s^2}{(1 + p^2 + q^2)^2}. \quad (8.6)$$

Далее Гаусс доказывает (в этой же работе) теорему о независимости полной кривизны от любых преобразований искривления поверхности, при которых длины кривых на ней не меняются.

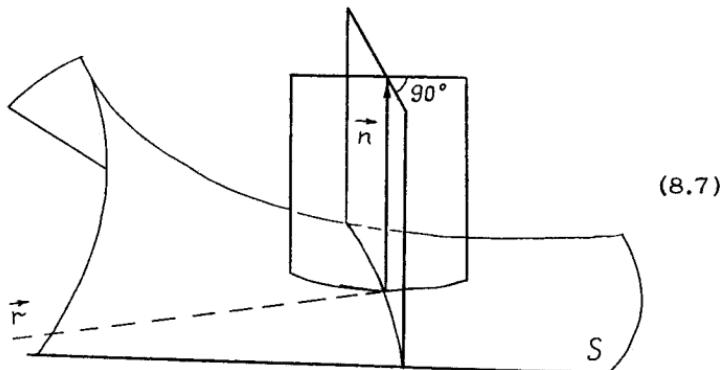
В приведенном виде определение кривизны поверхности через отношение телесного угла к площади выглядит скорее аналитическим, чем геометрическим. Обратимся поэтому к геометрическим понятиям, установленным еще до работы Гаусса /3/ Эйлером.

Пусть \vec{n} есть единичный вектор нормали (в точке \vec{F}) к S . Кривая, получаящаяся при пересечении S какой-либо проходящей через \vec{n} плоскостью, называется нормальным сечением поверхности S в точке \vec{F} /10, 13/. Проводя в точке \vec{F} два взаимно перпендикулярных нормальных сечений (см. рис. (8.7)), Эйлер установил, что полусумма кривизн этих нормальных сечений в \vec{F} , взятых со знаком плюс, если вогнутость – по \vec{n} , и минус – если против \vec{n} (важна только согласованность знаков, выбор их может быть и противоположным; условимся, однако, об этом выборе), не зависит от угла поворота (взаимно перпендикулярных!) плоскостей вокруг \vec{n} . Кроме того, нормальные сечения в точке \vec{F} , для которых достигается максимум (k_{max}) и минимум (k_{min}), кривизны, взаимно перпендикулярны (теорема Эйлера /10, 13/).

Величина

$$H = \frac{1}{2} (k_{min} + k_{max}) = \frac{1}{2} (k' + k'') \quad (8.8)$$

известна как средняя кривизна поверхности /13/ – и это есть альтернативное приведенному выше определение кривизны поверхности в точке \vec{F} . (Здесь k' и k'' – кривизны двух любых взаимно перпендикулярных сечений в точке \vec{F}).



(8.7)

Нормальные сечения, для которых достигается максимум и минимум кривизны (k_{\max} и k_{\min}), называются главными нормальными сечениями (поверхности S в точке \vec{r}).

Далее Гаусс /3/ доказал, что полная (гауссова) кривизна поверхности

$$K = k_{\min} \cdot k_{\max}, \quad (8.9)$$

то есть является произведением кривизн двух главных нормальных сечений. Заметим, что в отличие от H , где можно брать кривизны двух любых взаимно перпендикулярных сечений (не обязательно главных), для K следует брать кривизны только главных нормальных сечений.

Мы приходим к важному выводу: кривизна поверхности в точке характеризуется двумя значениями кривизны лежащих на ней (взаимно перпендикулярных в этой точке) кривых — нормальных сечений. Одним значением кривизны кривой нельзя описать кривизну поверхности. Поэтому имеют смысл введенные Гауссом /3/ понятия выпукло-выпуклой, вогнуто-вогнутой и выпукло-вогнутой поверхностей. Участок выпукло-вогнутой поверхности (однополостного гиперболоида) изображен на рис. (8.5); здесь k_{\min} отрицательно, а k_{\max} положительно (вогнутость по \vec{n}).

Зная k_{\min} и k_{\max} , можно вычислить H и K ; зная k' и k'' , можно вычислить только H . Таким образом, главные нормальные сечения более информативны, чем иные, и K больше характеризует поверхность, чем H .

Заметим, что из (8.8) и (8.9) следует, что

$$k_{\max, \min} = H \pm (H^2 - K)^{\frac{1}{2}} \quad (8.10)$$

Приведем еще для справок выражение для H , когда поверхность задана функцией $z = h(x, y)$ /13, с. 138/:

$$H = \frac{1}{2} \frac{(1+q^2)r - 2pqg + (1+p^2)t}{(1+p^2+q^2)^{3/2}}. \quad (8.11)$$

Отметим в дифференциальной геометрии также теорему Менье /10, 13/, связывающую кривизну $k = |\ddot{\vec{r}}|$ кривой Γ на поверхности S , проходящей через точку \vec{r} , с кривизной k_0 нормального сечения в точке \vec{r} (с учетом знака), имеющего в этой точке общую касательную с Γ :

$$k_0 = k \cdot \cos \theta. \quad (8.12)$$

Здесь θ есть угол между главной нормалью $\vec{n} = \ddot{\vec{r}} / |\ddot{\vec{r}}|$ к Γ и нормалью \vec{n} к S в точке \vec{r} , а $\cos \theta = (\vec{n}, \vec{v})$. При $k=0$ для Γ теряет смысл \vec{v} (см. определение главной нормали выше), но доказано /10, § 7.24/, что в этом случае $k_0=0$.

Объединяя эти факты, запишем теорему Менье в виде

$$k_0 = (\vec{n}, \ddot{\vec{r}}). \quad (8.13)$$

Точки дважды непрерывно дифференцируемой поверхности S в дифференциальной геометрии принято классифицировать следующим образом /10, 13/ (в скобках – пример состоящей только из точек соответствующего типа поверхности):

$K > 0$ – эллиптические (эллипсоид)

$K < 0$ – гиперболические (однополостной гиперболоид)

$K = 0$ – при $k_{min}^2 + k_{max}^2 > 0$ – параболические (цилиндр) (8.14)

$K = 0$ – при $k_{min}^2 + k_{max}^2 = 0$ – точки уплощения (плоскость).

Участок поверхности однополостного гиперболоида изображен на рис. (8.7).

Рассмотрим эту классификацию более внимательно, см. рис. (8.5). При изображении ΔS на единичной сфере случаю $K > 0$ соответствует либо сохранение направления главных нормальных сечений, либо их изменение; Гаусс /3/ счел это различие (между холмом и впадиной) введенных им выпукло–выпуклых от вогнуто–вогнутых поверхностей “несущественным” (для тех целей, которые онставил перед собой). Случаю $K < 0$ соответствует изменение направления только одного из двух главных нормальных сечений; отметим, что если одно из этих направлений оказывается выделенным каким-либо естественным образом, то выпукло–вогнутая и вогнуто–выпуклая поверхности уже неэквивалентны. Случай параболической поверхности, когда изображение сжато вдоль одного из главных нормальных сечений, при выделенности какого-либо из таких направлений дает уже четыре типа поверхностей: вогнуто–прямые, выпукло–прямые, прямо–вогнутые и прямо–выпуклые. Наконец, в точках уплощения изображение сжимается по всем направлениям, и выделенность какого-либо направления не создает новых типов поверхностей.

Из этих рассуждений видно, что дополнительно к четырем типам точек поверхности (8.14) могут, в принципе, существовать еще не менее пяти типов точек поверхности; другими словами, классификация (8.14) допускает для определенных классов поверхностей расширение. Замечая, что топологические причины могут даже для бесконечно дифференцируемых двумерных многообразий в E^3 сделать невозможным определенный выбор непрерывно зависящей от точки поверхности нормали (известный пример такой неориентируемой поверхности — лист Мебиуса /10, § 7.21), можно понять, что классификация (8.14) с математической точки зрения имеет бесспорное достоинство: она применима к широкому классу поверхностей, включая неориентируемые.

Однако топографическую поверхность S естественно считать замкнутой ориентируемой поверхностью — и тогда для нее имеет смысл внешняя нормаль \vec{n} , непрерывно зависящая от точки $\vec{r} \in S$. Но это обстоятельство сразу же решает вопрос об отличии выпукло-выпуклых участков S от вогнуто-вогнутых: если $k_{max} > k_{min} > 0$, то вогнутости главных нормальных сечений направлены в сторону внешней нормали \vec{n} и точка S является вогнуто-вогнутой; при $k_{min} \leq k_{max} < 0$ точка S есть выпукло-выпуклая. Аналогично, по отношению к параболическим точкам это отчасти снимает вырождение: $k_{min} < k_{max} = 0$ отвечает один случай (выпукло-прямой или прямо-выпуклый), $k_{max} > k_{min} = 0$ отвечает другой (вогнуто-прямой или прямо-вогнутый).

Итого мы имеем 6 типов точек поверхности, еще не имея способа различать главные нормальные сечения.

Топология, таким образом, в интересующем нас случае не дает полного снятия вырождения. Но ведь есть еще гравитация!

Взяв касательную к главному нормальному сечению и выбирая всякий раз "более крутую" из них, получаем выделенное главное нормальное сечение.

9. Горизонтальная и вертикальная кривизна

Сначала проведем рассмотрение в общем случае. Замкнутая бесконечно дифференцируемая ориентируемая (топографическая) поверхность S имеет уравнение

$$F(\vec{r}) = 0; \quad (9.1)$$

сразу отметим, что $\text{grad } F \neq 0$ ни для какой точки $\vec{r} \in S$, иначе S не имела бы касательной плоскости в этой точке /10, § 7.19/. Горизонтальные поверхности имеют уравнение

$$\Psi(\vec{r}) = \text{const}, \quad (9.2)$$

где $\Psi(\vec{r})$ — потенциал притяжения в ньютоновской теории /19/;

$$\vec{g} = -\text{grad } \Psi \quad (9.3)$$

есть вектор ускорения поля притяжения.

При соответствующем выборе знака $F(\vec{r})$ внешняя нормаль к S запишется в виде

$$\vec{n} = \frac{\text{grad } F}{|\text{grad } F|}, \quad (9.4)$$

где знаменатель не равен нулю на S , как отмечено выше.

Тогда на S справедлива формула (6.3) для \vec{g}_t и неравенство

$$|\vec{g}_t| > 0 \quad (9.5)$$

определяет открытое множество неособых точек $N \subset S$, тогда как замкнутое множество $O = S \setminus N$ особых точек, отвечающих $|\vec{g}_t| = 0$ на S , есть также множество точек, где $\vec{g} = \pm |\vec{g}| \cdot \vec{n}$, что видно из (6.3).

Совместное решение (9.1) и (9.2) дает горизонталь, которая на N есть бесконечно дифференцируемая кривая с единичным вектором касательной \vec{k} (λ - длина дуги этой кривой); на O горизонталь может иметь особенности (см. п.5). Доказав теперь, что

$$(\vec{k}, \vec{g}_t) = 0 \quad \text{на } N, \quad (9.6)$$

мы определим на $N \subset S$ два семейства линий - горизонтали и линии скольжения (вдоль \vec{g}_t), ортогональные друг другу.

Доказательство таково. Дифференцируя (9.1) по λ на N , получаем $(\vec{k}, \text{grad } F) = 0 \Leftrightarrow (\vec{k}, \vec{n}) = 0$. Дифференцирование (9.2) дает $(\vec{k}, \text{grad } \varphi) = 0 \Leftrightarrow (\vec{k}, \vec{g}) = 0$. Но тогда, находя из (6.3), что $(\vec{k}, \vec{g}_t) = (\vec{k}, \vec{g}) - (\vec{k}, \vec{k}) / (\vec{n}, \vec{g})$, получаем $(\vec{k}, \vec{g}_t) = 0$, чем и доказано (9.6).

Нормальные сечения на N можно ввести, используя эту единственную заданность направлений: имеющее общую касательную с линией скольжения пусть имеет кривизну k_λ , а имеющее общую касательную с горизонталью пусть имеет кривизну k_ν .

Вернемся теперь к приближению однородного гравитационного поля (вернув прежний смысл множествам N и O) с целью получить выражения для k_λ и k_ν в этом приближении.

Отметим прежде, чем все рассмотренные изолинии (горизонтали, изолинии крутизны), а также линии тока и линии скольжения существенно связаны с направлением \vec{g}_t . Рассмотренные в п.8 величины никак не связаны с внешним полем, и произвольное сочетание тех и других не имело бы смысла: именно поэтому k_λ и k_ν связаны с направлением \vec{g}_t . Отсюда, собственно, начинается метод вторых производных.

По теореме Эйлера /13, 3/ средняя кривизна

$$H = \frac{1}{2} (k_\lambda + k_\nu) \quad \text{на } N \quad (9.7)$$

и, зная выражение (8.11) для N в рассматриваемом приближении, достаточно найти k_h , чтобы затем вычислить k_v по (9.7).

Найти k_h можно с помощью теоремы Менье (8.13). Вначале находим $\frac{d\vec{x}}{d\xi}$ (напомним, что $|\frac{d\vec{x}}{d\xi}|$ есть кривизна горизонтали). Из (6.13) ясно, что

$$\frac{dx}{d\xi} = \pm \frac{-q}{\sqrt{p^2+q^2}}, \quad \frac{dy}{d\xi} = \pm \frac{p}{\sqrt{p^2+q^2}} \text{ на } N, \quad \text{при этом (9.8)}$$

$$\frac{dp}{d\xi} = r \frac{dx}{d\xi} + s \frac{dy}{d\xi}, \quad \frac{dq}{d\xi} = s \frac{dx}{d\xi} + t \frac{dy}{d\xi} \quad \text{на } N, \quad \text{откуда (9.9)}$$

$$\frac{d^2x}{d\xi^2} = \frac{-p}{(p^2+q^2)^{3/2}}(q^2r - 2pq s + p^2t), \quad \frac{d^2y}{d\xi^2} = \frac{-q}{(p^2+q^2)^{3/2}}(q^2r - 2pq s + p^2t) \text{ на } N. \quad (9.10)$$

Искомый вектор $\frac{\ddot{\vec{x}}}{\xi} = \frac{d^2x}{d\xi^2} \vec{i} + \frac{d^2y}{d\xi^2} \vec{j}$ равен поэтому

$$\frac{\ddot{\vec{x}}}{\xi} = \tilde{k}_h \frac{\dot{\vec{x}}}{\xi} \quad \text{на } N, \quad (9.11)$$

где $\frac{\dot{\vec{x}}}{\xi}$ есть вектор касательной вдоль линии тока (6.14), а

$$\tilde{k}_h = \frac{q^2r - 2pq s + p^2t}{(p^2+q^2)^{3/2}} \quad \text{на } N \quad (9.12)$$

есть (наделенная знаком) кривизна горизонтали. Знак этот имеет следующий геометрический смысл: $\tilde{k}_h < 0$ означает, что вогнутость горизонтали направлена против (ориентированной в сторону $\dot{\vec{x}}_t$!) линии тока, $\tilde{k}_h > 0$ – вогнутость направлена по линии тока.

Теорема Менье (8.13) позволяет найти кривизну этого нормального сечения (используем (6.5) для \tilde{k}_h и (6.7) для $\sin \gamma_N$):

$$k_h = \tilde{k}_h \cdot \sin \gamma_N \quad \text{на } N, \quad \text{где } 0 < \gamma_N < \frac{\pi}{2}. \quad (9.13)$$

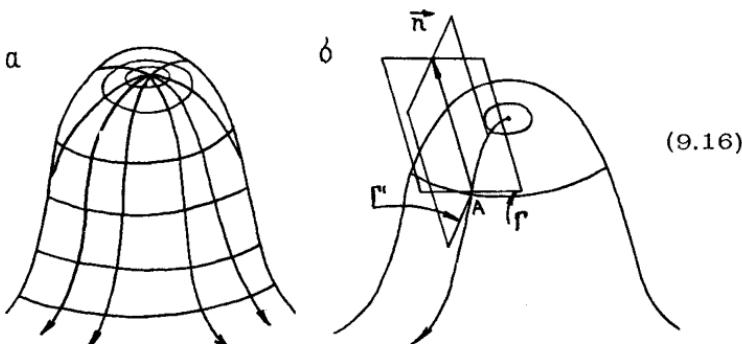
Окончательно,

$$k_h = \frac{q^2r - 2pq s + p^2t}{(p^2+q^2) \cdot (1+p^2+q^2)^{1/2}} \quad \text{на } N \quad \text{и} \quad (9.14)$$

$$k_v = \frac{p^2r + 2pq s + q^2t}{(p^2+q^2) \cdot (1+p^2+q^2)^{1/2}} \quad \text{на } N; \quad (9.15)$$

последняя формула найдена из (9.7) описанным выше способом.

Назовем k_h и k_v горизонтальной и вертикальной кривизной (нормального сечения) \mathcal{S} , соответственно. Смысл этих названий следующий. На поверхности \mathcal{S} (для $N \in G$) посредством тангенциальной составляющей вектора ускорения $\ddot{\vec{x}}_t$ естественным образом формируются линии скольжения и к ним перпендикулярно в точ-



(9.16)

ках пересечения горизонтали, рис. (9.16, а). Эта ортогональная система кривых позволяет в каждой неособой точке \mathcal{S} , например, в точке А, рис. (9.16, б), построить два взаимно перпендикулярных нормальных сечения, как описано выше. Одно из них, Γ , горизонтально в точке А – его кривизна называется горизонтальной. Другое, Γ' , наклонно в А (угол наклона $\gamma_{\mathcal{N}}$), причем имеет максимально близкое к вертикальному – из всех возможных для лежащих в касательной плоскости к \mathcal{S} в А направлений – положение, это доказано (6.15). Кривизна этого нормального сечения называется поэтому вертикальной (проникновение под поверхность \mathcal{S} , в толщу Земли, здесь никак не имеется в виду!).

Впервые аналогичные (9.14) и (9.15) выражения для k_h и k_v были получены Крхом /22/, без указаний физического приближения и несогласованные по знаку (полусумма их не равна средней кривизне). Последнее было исправлено в 1989 г. в его же работе /27/. Громоздкость и нестрогость теории Крхом /22/ привели, однако, к малопригодности предложенного им варианта для обобщений (частично выполненных в настоящей работе попутно с созданием строгого варианта теории).

Обозначив для нормальных сечений Γ и Γ' (рис. 9.16, б) длину дуги λ и μ , соответственно, по определению нормального сечения (п. 8) находим, что

$$\ddot{\vec{\lambda}} = k_h \cdot \vec{n}, \quad \ddot{\vec{\mu}} = k_v \cdot \vec{n} \quad \text{на } N, \quad (9.17)$$

отсюда и из (9.11) ясно, что $\ddot{\vec{\lambda}}$ и $\ddot{\vec{\mu}}$ различаются по величине и направлению, связь их видна из следствия теоремы Менье (9.13).

Попытаемся теперь изучить смысл найденных величин метода вторых производных.

Покажем, что k_h есть мера конвергенции (схождения) линий тока. В приближении однородного поля линии тока на N есть проекции линий скольжения на плоскость \mathcal{G} , однозначно ориентированные вектором \vec{g} (п. 6).

Из теоремы Гаусса-Остроградского для плоского случая /10, § 13.10/ определим смысл дивергенции $\operatorname{div} \vec{F}$. Пусть произвольная, но фиксированная точка (x, y) принадлежит N и окружена малым кругом $T_\epsilon \subset N$ радиуса $\epsilon > 0$ (это всегда возможно для достаточно малого ϵ , так как N есть открытое множество) с внешней нормалью \vec{n}' к положительно ориентированной границе Γ_ϵ круга T_ϵ ; согласно этой теореме

$$\iint_{T_\epsilon} \operatorname{div} \vec{F} dx dy = \int_{\Gamma_\epsilon} (\vec{F}, \vec{n}') d\zeta, \quad (9.18)$$

где $d\zeta$ — дифференциал дуги Γ_ϵ . Используя теорему о среднем и переходя к пределу, находим

$$\operatorname{div} \vec{F} = \lim_{\substack{\epsilon \rightarrow 0 \\ \epsilon > 0}} \frac{1}{\pi \epsilon^2} \int_{\Gamma_\epsilon} (\vec{F}, \vec{n}') d\zeta, \quad (9.19)$$

где интеграл в правой части есть поток единичного вектора $\vec{\hat{F}}$ через окружность Γ_ϵ . Это значит, что $\operatorname{div} \vec{F}$ есть мера расходимости линий тока. Вычисляя с помощью формулы (6.14) для $\vec{\hat{F}}$ эту меру:

$$\operatorname{div} \vec{F} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{-p}{\sqrt{p^2+q^2}} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{-q}{\sqrt{p^2+q^2}} \right) = -k_h \text{ на } N, \quad (9.20)$$

убеждаемся в том, что k_h есть мера конвергенции линий тока на N . При $k_h > 0$ эти линии сближаются, при $k_h < 0$ расходятся, $k_h = 0$ отвечает параллельности линий тока.

В силу (9.13), k_h имеет тот же знак на N , что и \tilde{k}_h , но количественной мерой конвергенции линий тока не является, так как имеет еще фактор (множитель), зависящий от крутизны

$$\sin \gamma_N = \frac{t g \gamma_N}{\sqrt{1+t g^2} \gamma_N}, \quad 0 < \gamma_N < \pi/2 \text{ на } N. \quad (9.21)$$

Наличие в k_h фактора крутизны может иметь практические применения в тех случаях, когда нужно отличать достаточно выраженные "бассейны" от выраженных недостаточно (соответствующий "метод отсечки" выходит за рамки данной работы). Поскольку k_h есть наделенная знаком кривизна горизонталей, уместно заметить, что в 1932 г. П.К.Соболевский /16/ впервые, насколько нам известно, качественно отметил факт сближения или расходления линий тока знаком участков горизонталей (ориентируя их и рассматривая, с какой стороны при обходе горизонталей лежит радиус кривизны), выделив области конвергенции и дивергенции путем нанесения на карту "геометрического места точек перегибов" горизонталей, т.е. изолиний $\tilde{k}_h = 0$ (или, что то же, $k_h = 0$). Затем карты аналогичного типа были предложены И.Н.Степановым (см. /9/), в 1989 г. качественно связь знака k_h с конвергенцией линий тока была отмечена Крхом /27/.

Мы убедились, что наряду с горизонтальной кривизной k_h однозначно определяется и (наделенная знаком) кривизна горизонтали \tilde{k}_v , знак которой определяется полем притяжения Земли, см. (9.11), и не зависит от ориентации горизонталей. По аналогии можно предположить существование наряду с вертикальной кривизной k_v также и кривизны линий тока \tilde{k}_ζ . В п. 6 уже отмечалось, что в линиях тока происходит потеря информации, содержащейся в линиях скольжения. Покажем теперь, как именно это происходит. Используя метод, которым была изучена формула (9.11) (простые, но несколько громоздкие выкладки опускаем), находим на N :

$$\ddot{\tilde{k}}_\zeta = \tilde{k}_v \dot{\tilde{k}}_\zeta \quad \text{и} \quad (9.22)$$

$$\ddot{\tilde{k}}_\zeta = \tilde{k}_v \dot{\tilde{k}}_\zeta / (1 + p^2 + q^2) + k_v \cdot \vec{k}, \quad \text{где} \quad (9.23)$$

$$k_v = \pm [-pq(r-t) + (p^2 - q^2)s] / (p^2 + q^2)^{3/2}, \quad (9.24)$$

ζ и ζ — длина дуги линии тока, горизонтали и линии скольжения, соответственно, а знак для \tilde{k}_v должен быть взят в соответствии со знаком $\dot{\tilde{k}}_\zeta$ в формуле (6.13), т.е. зависит от выбора ориентации горизонталей (ведь по геометрическому смыслу (п. 8) \tilde{k}_ζ направлен всегда в сторону вогнутости линии тока, т.е. не зависит от ориентации горизонталей). Сравнивая полученные выражения $\ddot{\tilde{k}}_\zeta$ и $\ddot{\tilde{k}}_\zeta$, видим, что в линии тока полностью потеряна информация о вертикальной кривизне (\tilde{k}_v и $\dot{\tilde{k}}_\zeta$ ортогональны, поскольку $(\vec{n}, \dot{\tilde{k}}_\zeta) = 0$). Выразим еще \tilde{k}_v через $\text{rot } \vec{k}$. По определению /10, § 13.11/ ротора, находим для $\ddot{\tilde{k}}_\zeta$ (b — длина дуги линии тока)

$$\text{rot } \vec{k} = \mp \tilde{k}_v \cdot \vec{k} \quad \text{на } N. \quad (9.25)$$

Но $\text{rot } \vec{k}$ есть аксиальный вектор, т.е. меняет знак при замене правой системы плановых координат $x\hat{i} + y\hat{j}$ на левую (либо наоборот), что, впрочем, видно из (9.24). Такая неинвариантность k_v является следствием отсутствия выделенного гравитацией направления для горизонтальной плоскости G . Имеет место теорема Стокса /10, § 13.11/

$$\iint_{T_\epsilon} (\tilde{k}, \text{rot } \vec{k}) dx dy = \int_{\Gamma_\epsilon} (\dot{\tilde{k}}_\zeta, \dot{\tilde{k}}_\zeta) d\zeta, \quad (9.26)$$

откуда, применяя теорему о среднем и переходя к пределу при $\epsilon \rightarrow 0$, получаем

$$\mp \tilde{k}_v = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{1}{2\pi\epsilon} \int_{\Gamma_\epsilon} (\dot{\tilde{k}}_\zeta, \dot{\tilde{k}}_\zeta) d\zeta. \quad (9.27)$$

Здесь интеграл в правой части есть циркуляция вектора $\dot{\tilde{k}}_\zeta$ по положительно ориентированной окружности Γ_ϵ (ζ — длина дуги

Γ_ϵ), и мы вновь приходим к выводу, что $|\vec{k}_v|$ есть кривизна линий тока.

Вертикальная кривизна k_v в любой неособой точке $\vec{r}_A \in S$ образуется сечением S вертикальной плоскостью. Действительно, уравнение такой плоскости есть $(\vec{\gamma}(A) \times \vec{n}(A)) \cdot (\vec{r} - \vec{r}_A) = 0$ или

$$(\dot{\vec{\gamma}}(A), \vec{n} - \vec{n}_A) = 0; \quad (9.28)$$

в координатах это

$$-q_A \cdot (x - x_A) + p_A \cdot (y - y_A) = 0, \quad (x_A, y_A) \in N. \quad (9.29)$$

Координата z не входит в это уравнение, из чего и следует вертикальность. Применим это для нахождения k_v по производным высоты вдоль линий тока (b - длина дуги линии тока)

$$k_v = \frac{\frac{d^2 h}{d b^2}}{\left[1 + \left(\frac{dh}{db}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \quad \text{на } N. \quad (9.30)$$

Это почти очевидно, так как справа записано выражение для наделенной знаком кривизны плоской кривой (вертикального нормально-го сечения). Заметим, впрочем, что

$$-\frac{dh}{db} = -\left(p \frac{dx}{db} + q \frac{dy}{db}\right) = \sqrt{p^2 + q^2} = tg \gamma_N \quad \text{на } G, \quad (9.31)$$

т.е. это крутизна (компоненты $\vec{\gamma}_b$ взяты из (6.14)). Отсюда

$$\frac{d^2 h}{d b^2} = -\frac{d}{db} \sqrt{p^2 + q^2} = k_v \cdot (1 + p^2 + q^2)^{\frac{3}{2}} \quad \text{на } N; \quad (9.32)$$

из (9.31) и (9.32) следует (9.30). Формула (9.30) может быть полезна для компьютерных или приближенных расчетов вертикальной кривизны.

Уравнение плоскости, дающей горизонтальную кривизну k_h , в точке \vec{r}_A есть (γ - длина дуги линии скольжения)

$$(\dot{\vec{\gamma}}(A), \vec{n} - \vec{n}_A) = 0; \quad (9.33)$$

эта плоскость не является ни вертикальной, ни горизонтальной, что видно из ее уравнения в координатах.

$$p_A \cdot (x - x_A) + q_A \cdot (y - y_A) + (p_A^2 + q_A^2) \cdot (z - z_A) = 0, \quad (9.34)$$

так как p_A и q_A одновременно не обращаются в ноль на N . Дадим здесь еще метод определения производной высоты $h(x, y)$ по длине дуги нормального сечения. Найдем $\frac{dh}{d\mu}$, где μ - длина дуги вертикального нормального сечения. Из (9.28), дифференцируя по μ (считаем \vec{r}_A произвольным, но фиксированным вектором):

$$(\dot{\vec{r}}_A(A), \dot{\vec{r}}_M) = 0 \quad \text{или} \quad -q_A \cdot \frac{dx}{d\mu} + p_A \cdot \frac{dy}{d\mu} = 0 \quad (9.35)$$

Далее, на S $z = h(x, y)$, откуда

$$\frac{dz}{d\mu} = \frac{dh}{d\mu} = p \frac{dx}{d\mu} + q \frac{dy}{d\mu}. \quad (9.36)$$

Произвольные p и p_A , вообще говоря, нельзя считать совпадающими: вертикальное нормальное сечение \vec{r} (рис. 9.16 б) и линия скольжения могут не совпадать (последняя обычно не является плоской кривой). Вспоминая (6.8), находим с помощью полученных формул

$$\dot{\vec{r}}_M = \left[-p_A \vec{i} - q_A \vec{j} - (p_A^2 + q_A^2) \vec{k} \right] / \left[p_A^2 + q_A^2 + (pp_A + qq_A)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9.37)$$

на N ,

где знак уточнен условием

$$\dot{\vec{r}}_M(A) = \dot{\vec{r}}_A(A), \quad (9.38)$$

поскольку вертикальное нормальное сечение по определению имеет общую касательную (в точке \vec{r}_A) с линией скольжения. Теперь

$$\frac{dh}{d\mu} = p \frac{dx}{d\mu} + q \frac{dy}{d\mu} = -\frac{pp_A + qq_A}{[p_A^2 + q_A^2 + (pp_A + qq_A)^2]^{\frac{1}{2}}} \frac{\vec{r} \rightarrow \vec{r}_A}{\sqrt{1 + p_A^2 + q_A^2}} \quad (9.39)$$

$$\frac{d^2h}{d\mu^2} = \frac{(p_A^2 r + 2p_A q_A s + q_A^2 t)(p_A^2 + q_A^2)}{[p_A^2 + q_A^2 + (pp_A + qq_A)^2]^2} \frac{\vec{r} \rightarrow \vec{r}_A}{\sqrt{1 + p_A^2 + q_A^2}} \frac{k_v(A)}{\sqrt{1 + p_A^2 + q_A^2}} \quad (9.40)$$

В силу произвольности точки $\vec{r}_A \in S$ в правых частях можно опустить индекс A ; это ξ -компоненты \vec{n} со знаком минус в точке \vec{r}_A , т.е. $n_x k_v$ в точке $\vec{r} = \vec{r}_A$.

Отметим еще следующее. Если в применении к k_h теорема Менье дает значимый результат (9.13) (связь горизонтальной кривизны и кривизны горизонтали), то этого не удается увидеть по отношению к k_v (имеется в виду смысловая, а не чисто математическая сторона вопроса). Применив эту теорему к вектору $\ddot{\vec{r}}$ главной нормали линии скольжения, т.е. взяв скалярное произведение на \vec{n} равенства (9.23), получим связь между кривизной линии скольжения и k_v :

$$k_v = (\ddot{\vec{r}}, \vec{n}) = k_v \cos \theta \quad \text{на } N, \quad (9.41)$$

$$\text{где } \tilde{k}_v = [\tilde{k}_v^2 / (1 + p^2 + q^2)^2 + k_v^2]^{\frac{1}{2}} > 0 \quad \text{и} \quad (9.42)$$

θ есть угол между главной нормалью к линии скольжения и нормально к поверхности в этой же точке (при $k_y \neq 0$).

10. Морфоизографы

Изолинии равной горизонтальной кривизны поверхности

$$k_h = \text{const} \quad (10.1)$$

и вертикальной кривизны

$$k_y = \text{const} \quad (10.2)$$

назовем, соответственно, горизонтальными и вертикальными морфоизографами. Этот термин по отношению к горизонтальным изолиниям был введен И.Н.Степановым в общем направлении исследований по картографии естественных почвенных тел, строению земной поверхности, гидрологии склонов и т.п., названном им "метод пластики рельефа" (см. /9/ и ссылки там). Изолинии $k_h = 0$ изучались (впервые, насколько нам известно) в 1932 г. П.К.Соболевским /16/ применительно к геологическим задачам (поиск и изучение месторождений полезных ископаемых) и в связи с вопросами обрушения шахт.

В общем случае (неоднородное поле) на $N \subset S$ справедливо следующее утверждение: геометрическое место точек нулевой кривизны горизонталей ($\hat{\rho} = 0$, $\hat{\lambda}$ — длина дуги горизонтали) является также множеством точек нулевой горизонтальной кривизны ($k_h = 0$) топографической поверхности S . Доказательство утверждения очевидно из теоремы Менье (8.13):

$$k_h = (\vec{n}, \vec{\hat{\rho}}) \quad \text{на } N. \quad (10.3)$$

Взаимно однозначное соответствие точек горизонтали (пространственной кривой в неоднородном поле) и ее проекции на плоскость, обеспечивающее такое соответствие, сохраняет, как нетрудно понять, точки нулевой кривизны горизонтали. Это важное обстоятельство позволяет вручную, используя геометрическое место точек перегиба горизонталей /9, 16/, проводить горизонтальные морфоизографы нулевого значения $k_h = 0$ на крупномасштабных картах* в условиях неоднородного поля притяжения (за исключением окрестностей особых точек) и даже получать карты среднего масштаба на основе крупномасштабных карт.

В неоднородном поле притяжения, как установлено приведенным выше утверждением, на $N \subset S$ из $\hat{\rho} = 0$ следует $k_h = 0$. Значит

*Геодезические проекции, используемые для карт мелкого и среднего масштабов /15/, не сохраняя точки перегиба вследствие изгиба горизонтали при проекции, могут искажать карты морфоизограф (более подробное изучение этого вопроса выходит за рамки данной работы).

ли это, что на N верно обратное: из $k_h = 0$ следует $\vec{k} = 0$? Формула (10.3) показывает, что горизонтальная кривизна может равняться нулю при $\vec{k} \neq 0$ только при условии ортогональности \vec{n} и \vec{k} . Мы знаем, что в приближении однородного поля это невозможно, поскольку горизонталь (и ее производные) лежит в горизонтальной плоскости, а \vec{k} имеет отличную от нуля вертикальную составляющую, что видно из (6.5). Однако, горизонтальные поверхности $\varphi(\vec{r}) = \text{const}$ не есть плоскости в неоднородном поле, и запрет на ортогональность \vec{n} и \vec{k} этим, вообще говоря, снимается. Например, пусть участок $\Delta S \subset N \subset \mathcal{S}$ плоский, а хотя бы одна из пересекающих его горизонталей имеет отличную от нуля кривизну. Тогда на ΔS это — плоская кривая и $\vec{k} \neq 0$ лежит в плоскости ΔS и ортогональна \vec{n} , вследствие чего $k_h = 0$ (т.е. в неоднородном поле обратное, вообще говоря, неверно).

Но здесь мы обошли вниманием особые точки изолиний горизонтальной кривизны. Между тем очевидно, что изолиния $k_h = 0$ не есть кривая на ΔS — она заполняет всю эту площадку, превращая ее в множество особых точек изолиний k_h (заодно и k_v). Ясно, что участки S , на которых $k_h(k_v)$ есть постоянная, также будут множеством особых точек соответствующей изолинии $k_h = \text{const}/k_v = \text{const}$. Перейдем к приближению однородного гравитационного поля. В данной работе не обсуждается вопрос о связанных с третьими производными величинах и изолиниях (тальвеги, водоразделы и др.), входящий обычно в метод вторых производных [20]. В то же время, как мы знаем на примере изолиний крутизны (где особые точки изолиний на N отвечают пересечению $K=0$ и $k_v=0$), для описания множества особых точек на $N \subset G$ иначе, чем общей формулой

$$\left(\frac{\partial k_h}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial k_h}{\partial y} \right)^2 = 0 \quad (\text{для изолиний } k_v) \quad \left(\frac{\partial k_v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial k_v}{\partial y} \right)^2 = 0 \quad (10.4)$$

желательны величины, связанные с третьей производной. Поэтому этот вопрос не изучается здесь подробнее *.

Смысл изолиний $k_h = 0$ или, что то же, $\vec{k}_h = 0$, описываемых уравнением

$$q^2 r - 2pq s + p^2 t = 0 \quad \text{на } N, \quad (10.5)$$

состоит в том, что линии тока на них параллельны, и они делят $N \subset G$ на два открытых множества: области конвергенции N_+ (где $k_h > 0$ и линии тока сближаются, что количественно характери-

* Насколько нам известно, вопрос об особых точках морфоизограф вообще не изучался в литературе.

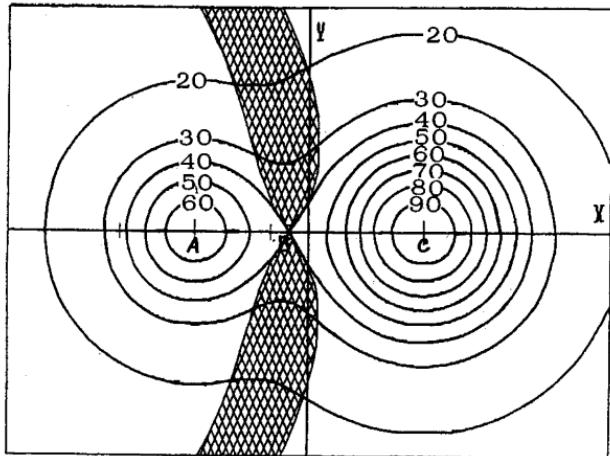


Рис. 2. Участок топографической карты (получен расчетом на ЭВМ). Видно, что горизонтальные морфоизографы $k_h = 0$ проходят через точки перегиба горизонталей. Множество особых точек σ состоит в этом случае из трех изолированных точек: А, В, и С (А и С - эллиптические, В - гиперболическая)

зует k_h , см. п. 9) и области дивергенции N_- (где $k_h < 0$ и линии тока расходятся). На рис. 2, отвечающему случаю двух хол-

$$\text{мов, } h(x, y) = h_1 \cdot \exp \left\{ -\frac{(x-x_0)^2 + y^2}{r_1^2} \right\} + h_2 \cdot \exp \left\{ -\frac{(x+x_0)^2 + y^2}{r_2^2} \right\}$$

при $h_1 = 100, h_2 = 60, x_0 = 1,2, r_1 = 1, r_2 = 0,8$.
заштрихованы области конвергенции N_+ ; незаштрихованные области
отвечают N_- .

11. Роль измерений в определении производных

Реальная земная поверхность сама по себе не является дифференцируемой; понятие производных возникает в процессе измерения. Поясним, как это происходит.

Измерительный прибор в процессе взаимодействия с земной поверхностью занимает на ней некоторое положение, зависящее как от поверхности, так и от размеров прибора. Легко представить себе в качестве измерительного прибора, например, диск радиуса ϵ , который кладется центром на интересующее нас место. Кругизна и ориентация диска затем могут быть найдены экспериментально (они и отождествляются с соответствующими величинами для земной поверхности). Повторное бросание диска на то же место даст, вообще говоря, несколько другие значения тех же величин. Среднее значение серии таких измерений позволяет вычислить (первые) произ-

водные для диска радиуса ε и погрешность их определения. Читатель может представить себе, как найти с помощью этого диска вторые производные в том же месте.

На практике понятие размера измерительного прибора по отношению к производным обычно соответствует не размеру диска (теодолита, ...), а шагу сетки ε цифровой модели рельефа. От размеров измерительного прибора ε , вообще говоря, зависят результаты измерений; сам этот размер определяется спецификой решаемой задачи. В этой связи подчеркнем важную роль размеров измерительного прибора как характерной длины (или масштаба) фактического "сглаживания" земной поверхности самим процессом измерения.

Одним из методов усреднения недифференцируемой, но интегрируемой функции $h(x, y)$ является ε -усреднение $\tilde{h}(x, y)$ по С.Л.Соболеву /10, §18.2/; в результате получается бесконечно дифференцируемая функция $\tilde{h}_\varepsilon(x, y)$, описывающая сглаженную поверхность с радиусом сглаживания ε .

Процесс измерения и размер измерительного прибора играют фундаментальную роль в изучении свойств земной поверхности: производные последней не имеют смысла вне процесса измерения, а возможность использования изложенной выше теории реальна только благодаря осуществлению этого процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров П.С. Введение в теорию множеств и общую топологию. М.: Наука, 1977. 368 с.
2. Беклемишев Д.В. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. Изд. 3-е, стереот. М.: Наука, 1976. 320 с.
3. Гаусс К.Ф. Общие исследования о кривых поверхностях//Об основаниях геометрии. Сборник классических работ по геометрии Лобачевского и развитию ее идей/Ред. Норден А.П. М.: Гос. изд-во техн. литературы, 1956. С. 123-161.
4. Геологический словарь. В 2-х томах. Изд. 2-е, испр. М.: Недра, 1978. 943 с.
5. Дирак П.А.М. Общая теория относительности. М.: Атомиздат, 1978. 65 с.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. Изд. 3-е, испр. и доп. М.: Физматгиз, 1973. 564 с.
7. Ласточкин А.М. Морфодинамический анализ. Л.: Недра, 1987. 256 с.
8. Лукин А.А. Опыт разработки методики морфоструктурно-гидрологического анализа. Новосибирск: Наука, 1987. 111 с.
9. Метод пластики рельефа в тематическом картографировании: Сборник научных трудов. Пущино: ОНТИ НЦБИ АН СССР. 1987. 160
10. Никольский С.М. Курс математического анализа. В 2-х томах. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: Наука, 1975. 840 с.
11. Одесский И.А. Волновые движения земной коры. Л.: Недра, 1972. 208 с.

12. Пенк В. Морфологический анализ. М.: Гос. изд-во геогр. литературы, 1961. 360 с.
13. Погорелов А.В. Дифференциальная геометрия. М.: Наука, 1974. 176 с.
14. Рыжов П.А. Геометрия недр. Изд. 3-е, испр. и доп. М.: Недра, 1964. 167 с.
15. Салишев К.А. Картоведение. Изд. 2-е, перер. и доп. М.: Изд-во МГУ, 1982. 408 с.
16. Соболевский П.К. Современная горная геометрия//Соц. реконструкция и наука, 1932. Вып. 7. С. 42-78.
17. Стернберг С. Лекции по дифференциальной геометрии. М.: Мир, 1970, 412 с.
18. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Изд. 7-е, стереот. М.: Наука, 1969. Т. 1, 608 с.; Т. 2, 800 с.
19. Фок В.А. Теория пространства, времени и тяготения. Изд. 2-е, доп. М.: Физматгиз, 1961. 564 с.
20. Шарма П. Геофизические методы в региональной геологии. М.: Мир, 1989. 487 с.
21. Elkins T.A. The second derivative method of gravity interpretation//Geophysics. 1951. V. 16. No 1. P. 29-50.
22. Krcho J. Morphometric Analysis of Relief on the Basis of Geometric Aspect of Field Theory//Acta Geographica Universitatis Comenianae. Geographico-physica. 1973. No 1. P. 7-233.
23. Krcho J., Haverlik, I. Mathematical Generalization of Forming Isoline Thematic Maps by Computer Exemplified by Morphometric Analysis of Relief and Dinamic of Relief Insolation//Ibid. P. 235-424.
24. Krcho J. Teoretická koncepcia a interdisciplinárne aplikácie komplexného digitálneho modelu reliéfu pri modelovaní dvojdimenziolálych polí//Geografický časopis. 1983. P. 35. C. 3. S. 265-291.
25. Krcho J. Geometrické formy georeliéfu a ich hierarchické úrovne//Geografický časopis. 1986. P. 38. C. 2-3. C. 210-235.
26. Krcho J. Matematické vlastnosti topografickej plochy georeliéfu z gladiska morfometrickej analýzy a jej modelovanie pomocou komplexného digitálneho modelu//Geografický časopis, 1987. P. 39. C. 2. S. 169-204.
26. Krcho J. Matematické vlastnosti georeliéfu z hládiska geometrických foriem a jeho modelovanie aproksimujúcimi funkiami dvoch premenných//Geografický časopis. 1989. P. 41. C. 1. S. 23-47.
27. Peters L.J. The direct approach to magnetic

О ДЕШИФРИРОВАНИИ ПРИРОДНЫХ ГРАНИЦ И ГЕНЕРАЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ СТРУКТУР ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

И.В.Флоринский

Введение

Практика показала низкую эффективность традиционных тематических карт в решении многих проблем природопользования. Стоит вопрос о создании карт нового типа.

В ряде работ /Метод пластики..., 1987; Степанов, 1990/ показаны преимущества метода "пластики рельефа" в решении различных практических и фундаментальных вопросов, возможность создания на основе этого метода информативных ландшафтных, почвенных, гидрологических, гидрогеологических, галогеохимических, геоботанических карт, использование их в целях тематических прогнозов и регнозов.

На наш взгляд, одна из причин успеха этого метода в том, что изолиния нулевой горизонтальной кривизны $K_h = 0$, дискретизируя земную поверхность на области дивергенции и конвергенции, вероятно, является некоторым элементом идеализированной интегральной природной границы. Очевидно, что внедрение в картографическую практику теории поверхности в силовом поле (статья Шарого П.А. в данном сборнике) приведет к возникновению новых подходов к обработке данных дистанционного зондирования.

В ряде работ /Выявление по топокартам..., 1983а; Степанов и др., 1988/ показана возможность выявления изображений структур земной поверхности, определенным образом соотносящихся с почвенным и растительным покровами, галогеохимическим режимом и, вероятно, с тектоническими структурами. Выявление этой качественно новой информации становится возможным, в основном, благодаря генерализации карт потоковых структур.

Используемый в настоящий момент алгоритм генерализации этих карт /Метод пластики..., 1987; Лошакова, 1988/ количественно не обоснован и, следовательно, субъективен. Гарантии от ошибок и артефактов он не дает, воспроизводимости не обеспечивает. Необходимо найти количественный алгоритм генерализации карт потоковых структур.

В связи со сказанным, в настоящей работе рассматриваются следующие вопросы:

1) возможность картографического решения проблемы выявления природных границ;

2) описание алгоритма обработки данных дистанционного зондирования, обеспечивающего данную возможность;

- 3) низкая адекватность традиционного картографического описания рельефа как причина неэффективности тематических карт;
- 4) краткий анализ основных подходов в алгоритмизации картографической генерализации;
- 5) выбор алгоритма генерализации изображений потоковых структур и его физической реализации на основе информационного подхода к изучению представления и обработки зрительных образов;
- 6) разработка алгоритма визуализации структур земной поверхности.

Введем рабочие определения.

Представление – некоторая формальная система, предназначенная для получения описания – определенной информации об изучаемых объектах, явлениях, процессах /Mapp, 1987/.

Структура земной поверхности (потоковая структура) – система некоторого уровня иерархии положительных, нулевых и отрицательных по горизонтальной кривизне элементов топографической поверхности. Иерархия потоковой структуры определяется масштабным уровнем ее организации. Предполагается определенная связь между потоковыми и геологическими структурами.

Изображение структуры земной поверхности – картографическое описание потоковой структуры в заданных координатах, проекции и масштабе.

Проблема дешифрирования природных границ

Одной из основных научных и практических задач наук о Земле является корректное выявление природных границ /Казанов, 1982/ и их картографическое отображение. Преобладающим видом исходной информации в природных исследованиях в настоящее время являются данные дистанционного зондирования, поэтому, видимо, целесообразнее говорить не о выявлении, а о дешифрировании природных рубежей.

Четких границ в природе не существует /Исаченко, 1958; Заруцкая, 1966, 1975, 1989; Каганский, 1982; Казанов, 1982/, их проведение является абстрагированием, идеализацией ситуации. Ввиду взаимообусловленности ландшафтных индивидуумов /Исаченко, 1975/ очевидно выделение таких идеализированных природных границ, которые характеризуют условно одновременное (без учета инерциальности /Исаченко, 1958/) изменение различных ситуаций (геологической, почвенной, ботанической, гидрологической и т.д.) в ландшафтных системах разного уровня иерархии. Работ, где подчеркивается необходимость изучения и картографического закрепления качественных корреляций ландшафтных компонентов (в основном – почвы и растительности, реже – с учетом рельефа), корректного описания природных границ, много /например, Давыдов, 1951; Заруцкая, 1975; Исаченко, 1958, 1960, 1961; Ларин, 1963; Лидов, 1949/, но математико-картографическое моделирование взаимосвязей явлений встречается в отечественной литературе редко.

В большинстве случаев ставка делается на "разум опытного картографа", который "способен мгновенно учитывать множество связей и оценивать характер их влияния в конкретной географической обстановке" /Салищев, 1975а/. Вероятно, это связано с недооценкой значения количественных параметров изучаемых природных объектов, процессов и явлений, что хорошо заметно, например, по работе А.Г.Исаченко /1958/.

Характеризуя взаимосвязанные объекты и явления, целесообразно использовать сопоставимые способы их отображения, которые могли бы обеспечить согласованность разнотематических карт, объективизировать получаемые при их анализе результаты /Бюштгенс, Кельнер, 1968/. Так как четких границ в природе не существует, необходимо показывать плавность изменения характеристик ландшафтных индивидуумов, выделяя при этом абстрактную границу некоторого уровня иерархии. Такой постановке задачи удовлетворяет способ изолиний: с одной стороны, передается континуальность картируемой количественной характеристики, с другой – она квантуется на области с одинаковыми значениями.

Исходя из концептуальной схемы исследования ландшафта (см. статью Степанова И.Н. с соавт. в данном сборнике), задачу можно сформулировать как создание изолинейных карт-предпосылок, лежащих в основе карт-результатов. При реалистичном подходе к этой проблеме необходимо признать, что, хотя данные почти о всех предпосылках и результатах можно выразить количественно и, следовательно, в форме изолиний, по точности эти карты будут плохо сопоставимы. Это объясняется как несопоставимостью различных характеристик (например, высота, количество лучистой энергии и механический состав почвы), так и – в большей степени – различиями в точности и объективности определения этих характеристик /Лидов, 1949/ (например, можно сравнить точность определения высоты стереофотограмметрическим способом, освещенности – люксметром и толщины гумусового горизонта почвы с помощью глазометра и рулетки). Кроме того, описание некоторых антропогенных факторов-предпосылок в форме изолиний представляется проблематичным.

Таким образом, видимо, целесообразно остановиться на картографическом представлении лишь тех предпосылок, высокую точность и объективность измерения характеристик которых мы можем гарантировать. Данному условию удовлетворяют топографические и топоклиматические факторы-предпосылки.

Топографическую поверхность можно описать изолиниями высоты, крутизны, горизонтальной, вертикальной, двух главных, средней, гауссовой кривизн (статья Шарого П.А. в данном сборнике) и экстремумов кривизны – "структурных линий рельефа" (водораздел, тальвег, подошва, бровка) /Васмут, 1983; Шарый, Степанов, 1991/.

Топоклиматические факторы-предпосылки /Frank, 1988/ тес-

но связаны с топографическими и могут быть представлены в виде изолинейных карт экспозиции и облученности земной поверхности.

Отображение на карте системы этих изолиний, по всей вероятности, может являться достаточно объективным геометрическим каркасом предпосылок природных границ (которые можно с известной осторожностью отождествить с самими границами). Это может помочь более строго вычислять количественные характеристики и корреляционные зависимости явлений, отображаемых на различных типах тематических карт, где до сих пор "почти безраздельно господствует качественный фон и ареалы, т.е. способы, характеризующие явления по площади, но не дающие возможности оценить вертикальную составляющую" /Берлянт, 1986/ и ее влияние на свойства картируемых явлений.

В первом приближении возможна корреляция свойств ландшафтных индивидуумов со знаком горизонтальной кривизны топографической поверхности /Временная методика..., 1984; Метод пластики..., 1987.

Создание карт с геометрическим каркасом предпосылок природных границ, вероятно, могло бы частично решить проблему противоречия между формой и содержанием картографического произведения /Асланиашвили, 1974; Берлянт, 1986/, которая практически выражается в задаче согласования комплектов разнотематических карт /Заруцкая, 1966/, их сопряженном анализе и поиске корреляций внутри спектра природных явлений /Берлянт, 1986; Робинсон, 1975/, а также генерализации изображений взаимозависимых элементов земной поверхности /Салищев, 1975а/. Отсутствие в традиционной картографии математического критерия природной границы делает процесс согласования субъективным, приводящим к потере даже очевидной корреляции между явлениями /Броцкий и др., 1958/, создает уверенность невозможности математического обоснования генерализации комплексных карт /Салищев, 1975а, 1982а/.

Возникает закономерный вопрос: если решение проблемы дешифрования географических границ во многом сводится к количественному описанию топографической поверхности, почему оно не было найдено раньше. Ответ, на наш взгляд, можно получить при анализе проблемы единства математической точности и наглядности изображения рельефа.

Проблема заключается в различной оценке адекватности описания рельефа, сделанного в системе некоторого картографического представления, реальной топографической поверхности. В картографии существует два основных способа описания рельефа: количественно-качественный и строго количественный.

Представитель первого направления А.А.Тилло /1890/ указывал: "хотя математическая основа имеет... первенствующее значение", одни изогипсы не дают ни общей, ни даже частной картины рельефа, и "художественная техника только одна заканчивает дело успешно". Описание качественных приемов изображения рельефа подробно

изложено Т.Н.Гунбиной и А.И.Спиридоновым /1938/ и П.К.Колдаевым /1956/.

Представитель второго направления И.Леман /О ситуации..., 1831/ считал, что в "топографических рисунках должно изображать только контуры... Общепринятое раскрашивание,... боковое освещение и перспективное изображение некоторых возвышенных предметов не только не помогают глазу и уму, но, напротив, утверждают в дурных привычках... Если рисунок назначен единственно для неопытного... топограф может решиться... на боковое освещение и перспективу".

В.В.Витковский /1915/, выступая против использования в описании рельефа художественной техники, писал: "... неровности всего точнее и полнее могут быть представлены совместным применением изогипс и гашюров... Изогипсы позволяют определять с большою точностью высоты, а гашюры – направление и крутизну скатов, вид, общее расположение и связь неровностей..."

М.Эккерт /1931/, подчеркивая, что "карта должна быть составлена так, чтобы по ней можно было быстро разобраться, где возвышенности и где углубления,... карта с рельефом, изображенным только в изогипсах, никогда не сможет дать такой картины", также указывал на необходимость использования штрихов крутизны. В силу специфики технологии, в двадцатых годах нашего века метод гашюров вышел из употребления. Этому способствовала первая мировая война: "для тщательного и научного изображения рельефа при помощи штрихов в военное время не хватало ни времени, ни сил. Проведение горизонталей... было единственно возможным" /Эккерт, 1931/. С другой стороны, замена штрихов горизонтальными резко повысила производительность труда, и потому считалось "прогрессивным мероприятием" /Салишев, 1944/.

С.И.Джусть /1958/ констатирует: отказ от использования других количественных "пластических" способов изображения рельефа "создавал убеждение о достаточности одних горизонталей" для его изображения. Под научностью картирования топографической поверхности стали понимать лишь "возможность точного и быстрого определения высот". Постепенно "изображение рельефа отодвигалось на второй план, уступая место другим элементам ландшафта", которые описывались качественно. Вероятно, одновременно снизилось понимание влияния дифференциальных характеристик топографической поверхности на характеристики других ландшафтных индивидуумов. К природным границам стали относить в основном изолинии экстремумов кривизны рельефа, определяемых, как правило, качественно.

Заметим, что трехмерная компьютерная графика, количественные методы построения блок-диаграмм и алгоритмы цифровой отмывки рельефа, блестящий обзор которых дан в работе В.К.Р.Норн /1981/, в тематической картографии применяются мало.

Создание тематических карт нового типа, основанных на системе изолиний топографических и топоклиматических факторов–предпосылок

развития ландшафта, вероятно, вызовет изменения в подходах к обработке данных дистанционного зондирования как исходной информации для дальнейших природных исследований.

Используемые сегодня алгоритмы дешифрирования аэрокосмоснимков (АКС) достаточно субъективны, результаты их интерпретации зависят, в основном, от опыта, способностей и взглядов исполнителя, являясь порой "импровизацией" /Геологические исследования..., 1975/. Предварительная машинная обработка дистанционных данных /например, Masuoka et al., 1988/, объективизирует результаты дешифрирования слабо, так как окончательная обработка и интерпретация информации осуществляется человеком.

Среди отображаемых на карте характеристик элементов ландшафта математически строго определяется лишь высота рельефа (стереофотограмметрическая обработка аэроснимков при топографическом дешифрировании). Отрисовать вручную по аэроснимку другие описанные выше изолинии невозможно. Аппаратного обеспечения этой задачи сегодня не существует, поэтому различие величин, опи- сывающих элементы топографической поверхности, игнорируется, и воображение дешифровщика создает несуществующие в природе псевдоабстрактные ареалы, которые затем закрепляются на карте.

Избежать подобных результатов дешифрирования, по нашему мнению, можно при следующем алгоритме обработки АКС.

1. В процессе стереофотограмметрического топографического дешифрирования крупномасштабных аэрофотоснимков, на основе стереомодели или цифровой модели рельефа составляется карта топографических и топоклиматических факторов-предпосылок. Дальнейшее топографическое дешифрирование предусматривает увязку ситуации с полученной системой изолиний.

2. В процессе тематического дешифрирования аэрокосмоснимков, в зависимости от степени влияния на изучаемые объекты, явления, процессы представленных изолиниями величин, на географическую основу будущей карты наносятся изолинии наиболее значимых в данной ситуации факторов-предпосылок с необходимым шагом их квантования. Дальнейшее тематическое дешифрирование предусматривает увязку интерпретации аэрокосмоснимка с полученным каркасом системы изолиний. Безусловно, что вопрос степени влияния факторов-предпосылок на тот или иной ландшафтный индивидуум весьма нетривиален и требует фундаментальных исследований.

Проблема генерализации изображений потоковых структур

В ряде работ /Выявление по топокартам..., 1983а, б; Метод пластики..., 1987; Степанов и др., 1988/ показана возможность выявления изображений структур земной поверхности, относящихся к различным уровням иерархии (рис. 1) и связанных, вероятно, с некоторыми геологическими (тектоническими) структурами. Отметим, что использование генерализации топографических карт в аналогичных целях достаточно хорошо известно /например, Цифровая

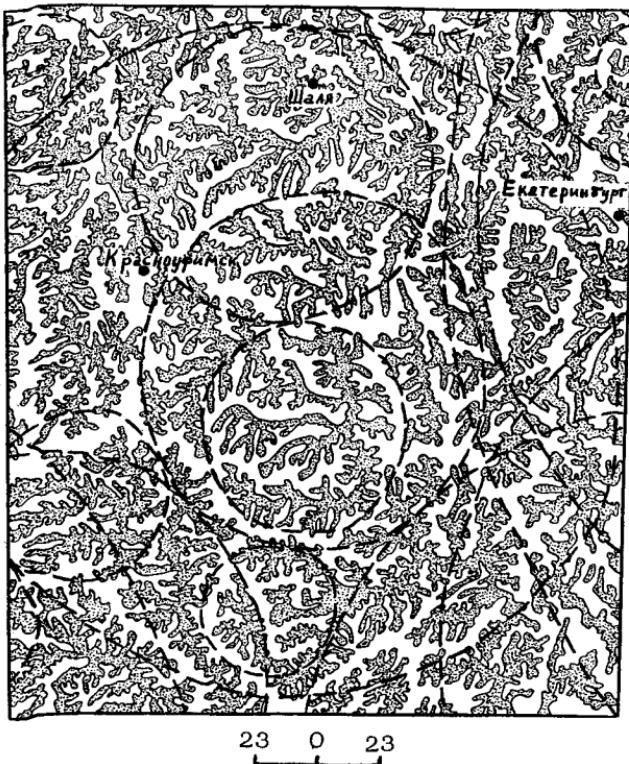


Рис. 1. Фрагмент "Карты структур земной поверхности и почвенно-го покрова Уральского региона СССР" /1990/. Выделение кольцевых структур различного уровня иерархии проведены Куряковой Г.А. (МИИГАиК). Заштрихованы области дивергенции.

фильтрация..., 1976/, но в нашем случае в качестве исходных данных выступают не изогипсы, а изображения потоковых структур, которые несут, естественно, другую информацию, нежели карты гипсометрии. Очевидно также и то, что процесс выявления названных структур включает в себя не только генерализацию информации, но и ряд других процедур, например – схематизацию, распознавание образов, однако, операция генерализации – наиболее важный этап обработки информации.

Генерализация потоковых структур проводится, как правило, вручную /Метод пластики..., 1987; Лошакова, 1988/, отсутствует ее количественный критерий, что делает проблематичным объективность получающихся результатов. Перед нами стоит задача разработки количественно-го алгоритма преобразования информации карт потоковых структур –

их генерализации – максимально удовлетворяющего постановке задачи. Кроме того, необходимо разработать подходы к проектированию алгоритма выявления структур земной поверхности.

Работа с картой – графическим закреплением описания материального объекта – земной поверхности – есть процесс зрительного восприятия и естественного преобразования информации, заложенной в изображении объекта, в результате которых формируется его описание / Arnheim, 1976; Keates, 1973/. Таким образом, анализ и выбор оптимального алгоритма генерализации и его физической реализации целесообразно проводить на основе информационного подхода к изучению представления и обработки зрительных образов /Marr, 1987/.

При решении задачи обработки информации рассматриваются три уровня понимания устройства, предназначенного для этой цели: 1) информационная теория; 2) представление и алгоритм; 3) физическая реализация.

На первом уровне выясняется, что является целью процесса обработки информации. Работа устройства описывается как некоторое отображение информации одного вида в информацию другого вида, формальные свойства которых определяются точно.

На втором уровне определяется, как может быть реализована существующая информационная теория. Выбираются представление для входной и выходной информации и алгоритм преобразования одной в другую.

На последнем уровне решается вопрос физической реализации выбранных представлений и алгоритма.

Информационная теория. Картографическая генерализация есть форма научной абстракции. Ее целью является извлечение из картографической модели качественно новой информации об изучаемых природных объектах, явлениях и процессах, иерархичное выявление существенной информации об их параметрах и свойствах /Асланикашвили, 1974; Баранский, 1946; Берлянт, 1975, 1986; Васмут, 1983; Гараевская, 1971; Геттнер, 1930; Заруцкая, 1966; Основы генерализации..., 1955; Салищев, 1975б, 1982а, 1982б; Сухов, 1957; Thapa, 1988а; Brassel, Weibel, 1988/.

Графическое средство представления информации должно содержать лишь те элементы, которые необходимы для точного описания и понимания существенной информации, так как "бесполезно стремиться направить внимание на важнейшие характеристики, если они окружены лишними, не относящимися к ним визуальными раздражителями, мешающими восприятию главного" /Боумен, 1971/.

Генерализация достигается путем следующего преобразования исходного массива исследуемой информации:

1. Снижение избыточности информации – исключение из рассмотрения незначительной по некоторым признакам информации, т.е. групп элементов данного массива на некотором масштабном уровне его рассмотрения.

2. Аппроксимация полезной информации – обобщение существенных

по некоторым признакам групп элементов данного информационного массива на некотором масштабном уровне его рассмотрения.

Данные высказывания можно представить в следующем виде:

$$A(m, x, y, \dots) \Rightarrow [E(m, x, y, \dots) \Rightarrow I(J, K, \dots)] = IN(J, K, \dots), \quad (1)$$

где $I(J, K, \dots)$ - исходный информационный массив; $IN(J, K, \dots)$ - массив качественно новой информации, получаемой в результате преобразования массива $I(J, K, \dots)$; J, K, \dots - целочисленные индексы элементов массивов $I(J, K, \dots)$ и $IN(J, K, \dots)$; x, y, \dots - признаки элементов $i(j, k, \dots)$ и $in(j, k, \dots)$ информационных массивов $I(J, K, \dots)$ и $IN(J, K, \dots)$, соответственно; m - признак масштабного уровня рассмотрения информационного массива $I(J, K, \dots)$; $E(m, x, y, \dots)$ - оператор снижения избыточности информации по некоторым признакам элементов массива $I(J, K, \dots)$ при признаке m ; $A(m, x, y, \dots)$ - оператор аппроксимации полезной информации по некоторым признакам элементов массива $I(J, K, \dots)$ при признаке m ; \Rightarrow - знак воздействия операторов $E(m, x, y, \dots)$ и $A(m, x, y, \dots)$ на информационный массив $I(J, K, \dots)$.

Формула (1) описывает в общем виде процесс картографической генерализации и может быть использована для дальнейшего решения задачи обработки информации данного вида.

Представление и алгоритм. При решении задач, связанных с обработкой информации изображений карт потоковых структур, исходной информацией является массив пикселов - наименьших разрешаемых элементов изображения - $I(J, K, \dots)$. Пиксель $i(j, k, \dots)$ обладает следующими признаками: а) координат x, y или r, φ ; б) линейного размера ℓ ; в) пространственной частоты $\omega_{max} = 1/\ell$; г) оптической плотности Φ .

Массив $I(J, K, \dots)$ обладает двумя основными свойствами:

1. По значению оптической плотности Φ $I(J, K, \dots)$ делится на два подмассива: $IW(J, K, \dots)$ и $IB(J, K, \dots)$. Первый подмассив объединяет пиксели с признаком $\Phi = 0$ (белое поле, изображение части области понижения), второй - пиксели с признаком $\Phi = const \neq 0$ (темное поле, изображение части области повышения).

2. Каждый подмассив делится на множество кластеров - групп пикселов R , характеризуемых двумя значениями пространственной частоты ω_x, ω_y , причем $\omega_{min} < \omega_x < \omega_{max}, \omega_{min} < \omega_y < \omega_{max}$; ω_{min} определяется размерами границ изображения.

Качественно новой информацией является массив пикселов $IN(J, K, \dots)$, обладающий аналогичными массиву $I(J, K, \dots)$ свойствами. Главное отличие массива $IN(J, K, \dots)$ от $I(J, K, \dots)$ состоит в том, что $\omega_{max}^N < \omega_{max}$. Спектр пространственных частот массива $IN(J, K, \dots)$ беднее, чем у $I(J, K, \dots)$: $|\omega_{max}^N - \omega_{min}| < |\omega_{max} - \omega_{min}|$,

$$\Delta \omega^N < \Delta \omega. \quad (2)$$

Из массива $IN(U, K, \dots)$ исчезают кластеры с небольшими значениями признака ℓ , происходит сглаживание "неровностей" (высоких частот ω_x, ω_y) при выполнении условия $\omega_{x,y} > \omega_{max}$; число элементов множества R^N меньше числа элементов множества R . Происходит генерализация исходной информации карты потоковых структур. Роль основного признака генерализации – масштабного уровня рассмотрения информации – играет ω_{max} .

Определим оптимальный алгоритм преобразования массива $I(U, K, \dots)$ в $IN(U, K, \dots)$, учитывая, что в данном процессе определяющую роль играет ω_{max} . Для этого проведем краткий анализ основных подходов в алгоритмизации картографической генерализации. Более подробную информацию можно получить в блестящих обзорах данной проблемы, выполненных К.Е.Brassel, R.Weibel /1988/, K.Thapa /1988a/, M.Sirko /1988/. Можно отметить также обзоры А.С.Васмута /1970/, А.И.Мартыненко /1972, 1974/, О.А.Павловой /1978/, К.А.Салищева /1972, 1982в/ и M.S.Montmonier /1982/.

Генерализация достигается путем проведения отбора и обобщения картографического материала "соответственно назначению и масштабу карты и картографируемой территории" /Билич, Васмут, 1984; Гараевская, 1971; Заруцкая, 1966; Основы генерализации..., 1955; Салищев, 1978, 1982а, б; Сухов, 1957; Филиппов, 1946; Thapa, 1988а; и др./

Можно выделить четыре этапа и направления развития теории картографической генерализации:

1. 1900–50 годы. Формирование интуитивных представлений о сущности процесса.
2. 1930–80 годы. Систематизация интуитивных представлений, разработка качественных алгоритмов процесса.
3. 1940–90 годы. Формализация и автоматизация качественных алгоритмов генерализации.

Понятие "генерализация", видимо, введено в 1908 году М.Эккертом /Thapa, 1988а/, считавшим данный процесс частью художественной обработки картографического материала. По мнению М.Эккера, алгоритмизация и объективизация процесса генерализации невозможны, так как закономерностями он не обладает. Подход к генерализации как к чисто субъективному процессу разделяли А.Геттнер /1930/, Э.Имгоф /1940/, А.Робинсон /1975/, E.Raisz /1962/ и другие исследователи.

К.А.Салищев /1939/ выдвинул тезис о научности процесса генерализации. В ЦНИИГАиК начинаются работы по изучению и систематизации эмпирических сведений об этом процессе и разработке качественных алгоритмов генерализации применительно к содержанию топографических карт /Филиппов, 1946; Соколов, 1951; Херсонский, 1951/. Главной итоговой работой направления качественной генерализации стала монография группы авторов "Основы

генерализации...” /1955/. Были проведены исследования по генерализации тематических карт /Исаченко, 1958; Заруцкая, 1965/.

Последовавшие затем многочисленные работы /Аэзолов, 1982; Башенина, Заруцкая, 1969; Билич, Васмут, 1984; Бюшгенс, Кельнер, 1968; Видина, 1963; Гараевская, 1971; Долгова, 1980; Заруцкая, 1966, 1988, 1989; Комков, 1951; Красильникова, 1961; Лошакова, 1988; Мамай, 1970; Салищев, 1978; 1982а; Смирнов, 1961; Спиридовон, 1975; Фадеева, 1963; Imhof, 1982; Keates, 1973; Lundqvist, 1959; Miller, Voskuil, 1964; Pannekoek, 1962/ не внесли существенной новизны в решение проблем, связанных с генерализацией. В отдельных публикациях отрицалась ее главная цель – получение качественно новых знаний /Бугаевский и др., 1986/, нередко под целью данного процесса понимались способы ее достижения – отбор и обобщение, игнорировался принцип иерархичности. Критерием объективности процесса генерализации называлось соответствие преобразованной карты действительности /Гараевская, 1971/, имея в виду ее соответствие “предписанным стандартам качества” /Салищев, 1982а/, т.е. продуктам субъективного процесса обработки эмпирических данных.

Вместе с тем отмечались трудность /Билич, Васмут, 1984; Салищев, 1975а, 1978/, невозможность и неподобранность формализации и автоматизации генерализации: “картограф при взгляде на карту способен воспринимать и мысленно учитывать разнообразные связи, для которых трудно или... невозможно найти математическую зависимость ради обоснования автоматизации процесса генерализации” /Салищев, 1982а/.

Безусловно, “предмет картографирования переполнен такими сторонами, которые составляют предметы исследования других наук” /Асланиашвили, 1974/, но очевидно отсутствие единства “взглядов, концепций на взаимосвязи явлений и строгих объективных критериев” /Ширяев, 1984/. В этой ситуации “приходится полагаться на художественное чутье, поскольку, стыдно признать, он (картограф – И.Ф.) не имеет научного обоснования для ответа на эти вопросы” /Робинсон, 1975/.

Художественный вкус, интуиция, опыт не могут гарантировать воспроизведимости результатов генерализации /Koeman, Weiden, 1970/. При использовании качественных алгоритмов “на карте создается ложная информация... Традиционная методика может быть приемлема лишь для популярных и учебных карт...” /Ширяев, 1984/

В конце сороковых годов начинаются работы по формализации, а несколько позже – автоматизации процесса генерализации. Количественные алгоритмы можно разделить на пять основных типов.

1. Алгоритмы отбора данных, использующих аппараты теорий информации, математической статистики и эмпирические знания экспертов. Алгоритмы разработаны А.В.Бородиным /1948, 1976/, А.В.Бородиным и В.М.Богинским /1973/, Т.В.Давыдкиной и

В.М.Богинским /1974/, В.В.Ивановым /1964/, П.П.Лебедевым /1990/, В.Ю.Нешатаевым /1989/, Б.Б.Серапинасом /1978/, В.И.Суховым /1947, 1950, 1957/, В.И.Суховым и М.Е.Надеждиной /1975/; Г.Н.Тетериным /1987/; Р.Beckett /1977/, N.Kadmon /1972/; E.Srnka /1970/, E.Topfer, W.Pillewizer /1966/; W.Weber /1977/ и другими исследователями.

2. Алгоритмы отбора и обобщения картографической информации (в основном линий, площадных объектов и поверхностей), реализуемые с помощью ее аппроксимации дугами окружностей и отрезками, полиномами различного вида, сплайнами, интерполяцией интегралом Фурье и др. Их различные варианты представлены в работах П.Бауэра /1973/; В.В.Зиборова и И.М.Марчука /1988/; В.В.Иванова /1965/; Ю.В.Свентэка /1986/; Б.В.Соловицкого /1974, 1978/; A.R.Boyle /1970/; G.Dettori, B.Falcidieno, /1982/; С.Кобман, F.L.T.Weiden, /1970/; J.Perkal /1958/; W.R.Tolbier /1965, 1966/; P.Vanicek, D.Woolnough /1975/ и других.

3. Алгоритмы отбора и обобщения, в основе которых лежит использование аппарата теории фильтров. В качестве примера приведем статью B.K.Bhattacharrya, B.Raychandhuri /1967/, работавших с картами остаточной намагниченности, и M.G.Mayers et al. /1988/, изучавших четыре алгоритма цифровой фильтрации тематической карты, составляемой на основе снимка Ландсат. Кроме того, широко известный в науках о Земле тренд-анализ /например, Чарльзорт и др., 1983; Robinson et al., 1969/ также относится к данному типу алгоритмов генерализации.

В ряде работ /Богомолов, 1976; Салищев, 1972/ обращается внимание на возможность проведения количественной генерализации на основе алгоритмов обработки (цифровой или аналоговой фильтрации) изображений /например, Прэтт, 1982/, в том числе - АКС /например, Комаров и др., 1974, 1976; Номоконова и др., 1978; Потапов, 1979; Сергеев, Януш, 1973; Фонтанель, 1975; Цифровая фильтрация..., 1976; Barber, 1949; Masnicka et al, 1988; Pincus, Dobrin, 1966/. Заметим, что возможность представления картографической генерализации как оптической фильтрации качественно описал М.Эккерт, указывая, что негенерализованная карта, если смотреть на нее с некоторого отдаления, должна выглядеть так же, как генерализованная, "частности становятся невидимыми" /Прасолов, 1978/. Сходные идеи высказывали А.Геттнер, /1930/, Л.Ратайский /1975/. Кроме того, явление естественной генерализации, имеющее место при аэрокосмосъемках /Скрягин, 1973/ ившедшее применение при выявлении разнопорядковых природных структур /например, Брюханов и др., 1977; Гонин, Яковлев, 1976; Григорьев, 1975/ и при составлении мелкомасштабных тематических карт /Богомолов, 1974; Брюханов, 1983; Кравцова, 1977; Смирнов, 1982/, является, по существу, низкочастотной фильтрацией (математическая модель приводится в работе Г.Б.Гонина /1980/).

Опыт оптико-электронной низкочастотной фильтрации изображений карт потоковых структур /Метод пластики..., 1987; Степанов и др., 1988; Лошакова, 1988/ показал, что алгоритмы фильтрации изображений, в принципе, пригодны для количественной генерализации карт потоковых структур, однако, необходимы дополнительные исследования и обоснование выбора конкретного алгоритма.

4. Алгоритмы эвристической генерализации. Ориентированы на использование в картографических компьютерных экспертных системах, являются логико-математическими моделями, в которых последовательность операций определяется по аналогии с традиционной ручной технологией генерализации /Халугин и др., 1989/. В качестве элементов данные модели могут включать те или иные охарактеризованные выше алгоритмы.

Подходы к эвристической генерализации разрабатывали А.С.Васмут и В.А.Вергасов /1974/, Е.Е.Ширяев /1977/ (выделение двух видов генерализации - масштабной и целевой), G.Wolf /1984/ и другие исследователи. Алгоритмы этого типа описаны в работах W.Lichtner /1979/, B.Nickerson /1988/, а концептуальные схемы эвристической генерализации приводятся А.С.Васмутом /1983/ и K.E.Brassel, R.Weibel /1988/.

5. Алгоритмы генерализации, основанные на использовании аппарата теории фракталов /Mandelbrot, 1967/, получили развитие в последние годы. В качестве примера назовем работу /K.Clarke, 1988/, который предложил алгоритм генерализации цифровой модели рельефа с разделенным преобразованием его масштабнозависимой и масштабнозависимой (фрактальной) составляющих, а также дал обзор существующих картографических фрактальных моделей. Однако в недавней работе L.W.Carstensen /1989/ убедительно показал нецелесообразность использования топографических данных (цифровых моделей рельефа, карт) для определения фрактальной размерности той или иной местности, ввиду того, что генерализация топографических данных зависит от ряда факторов, не имеющих отношения к фрактальности. Анализ работ K.Clarke /1988/ и L.W.Carstensen /1989/ позволяет предположить некоторое снижение интереса к данному типу количественных алгоритмов генерализации.

На базе краткого обзора основных типов алгоритмов картографической генерализации можно сделать следующий вывод: оптимальным типом алгоритма преобразования входной информации - массива $I(J,K,...)$ - в выходную информацию - массив $IN(J,K...)$ для данного вида информации, в целях выявления структур земной поверхности, являются алгоритмы низкочастотной фильтрации изображения, так как они ориентированы на обработку информации, заданной в растровой форме, достаточно легко реализуются как в цифровом, так и в аналоговом варианте, а также более экономичны, нежели алгоритмы других типов. С тем, чтобы максимально приблизить процедуру генерализации к естественному процессу восприятия

образов человеческим зрительным анализатором, предлагается использовать фильтр $\nabla^2 G$ /Marr, 1987/ и последующее двухуровневое квантование изображения /Прэтт, 1982; Marr, 1987/. ∇^2 – оператор Лапласа ($\partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$), G – распределение Гаусса:

$$G(x,y) = \exp[-(x^2+y^2)/2\pi\sigma^2], \quad (3)$$

где σ – пространственная постоянная гауссова распределения, среднеквадратичное отклонение. График $\nabla^2 G$ -фильтра в одномерном варианте представлен на рис. 2. Двумерное распределение значений функции Гаусса через расстояние r от начала координат задается следующим выражением:

$$G(r) = -(\pi\sigma^4)^{-1}(1-r^2/2\sigma^2)\exp(-r^2/2\sigma^2). \quad (4)$$

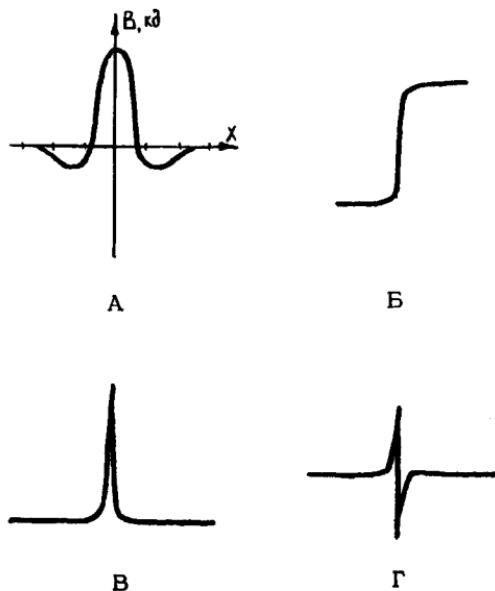


Рис. 2. Представление $\nabla^2 G$ -фильтра в виде одномерной функции, значения которой соответствуют яркости в каждой точке (А). Иллюстрация понятия "пересечение нулевого уровня": изменение оптической плотности (Б) вызывает пик или впадину первой производной (В) и пересечение нулевого уровня во второй производной (Г) /Marr, 1987/

Фильтр $\nabla^2 G$, реализующий оператор снижения избыточности информации $E(m, x, y, \dots)$, выбран по двум причинам:

1) гаусснан G допускает настройку на работу на необходимом масштабном уровне, размывает и эффективно уничтожает все кластеры, относящиеся к масштабному уровню, меньшие значения σ . Гауссово распределение гладко и локализовано в пространственной и частотной областях, что определяет минимальную вероятность внесения каких-либо деталей, отсутствующих на исходном изображении при максимально возможной равномерности его размыния. ω_{\max} соответствует σ .

2) лапласиан ∇^2 , предназначенный для выявления изменения оптической плотности Φ по пересечениям нулевого уровня второй пространственной производной (рис. 2,Б,В,Г), характеризуется экономичностью вычислительной процедуры, так как является изотропным дифференцирующим оператором самого низшего порядка.

Заметим, что полезность этого вида фильтрации была быстро понята специалистами по обработке аэрокосмической информации /Ahearn, 1988/.

В нашем случае при математическом описании операции снижения избыточности исходной информации в ее качестве целесообразнее использовать не массив пикселов $I(J, K, \dots)$, а двумерную функцию распределения оптической плотности исходного изображения $\Phi(x, y)$:

$$\nabla^2[G(x, y) * \Phi(x, y)], \quad (5)$$

где $*$ — знак свертки.

Цифровые значения пикселов, полученные после $\nabla^2 G$ -фильтрации, могут быть положительными и отрицательными (сумма равна нулю). Двухуровневое квантование изображения (присвоение пикселам с положительными значениями признака "+1", или $\Phi = \text{const} \neq 0$, а пикселам с отрицательными значениями признака "-1", или $\Phi = 0$), реализует оператор аппроксимации полезной информации $A(m, x, y, \dots)$ и позволяет иметь на выходе решения задачи абсолютно контрастное генерализованное изображение карты потоковых структур.

Физическая реализация. Предлагаемый алгоритм генерализации изображений структур земной поверхности может быть реализован следующим образом:

1. Гаусснан реализуется с помощью оптической схемы типа фокусировочного элемента (расфокусировка изображения). Величина σ регулируется вручную. Лапласиан ∇^2 и "бинаризация" реализуются также вручную, на основании визуального анализа оптической плотности неаппроксимированного изображения. Исходная информация записана на фотопленку типа "Микрат". На выходе задачи носителем информации является контрастная или особо контрастная фотобумага.

Результаты генерализации при данной реализации алгоритма

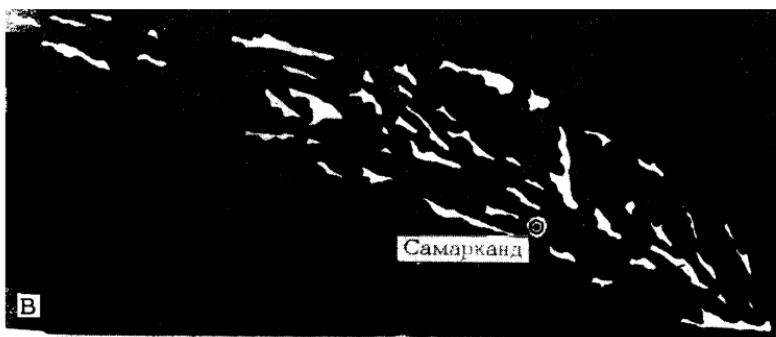
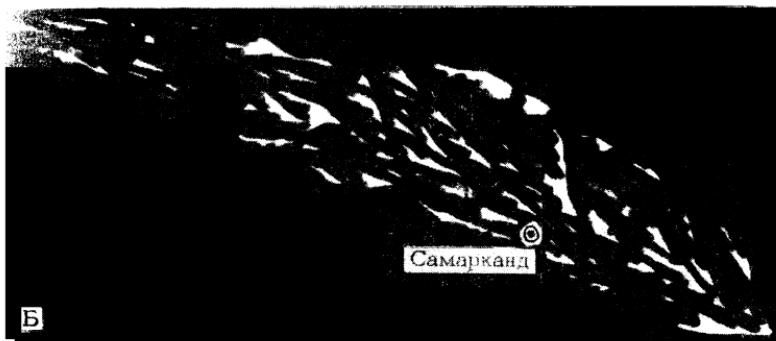


Рис. 3. Иллюстрация оптической фильтрации с помощью $\nabla^2 G$ -фильтра. А - исходное изображение фрагмента "Карты потоковых структур долины Зеравшана" /1989/; Б - реализация гауссиана с помощью расфокусировки; В - ручная реализация лапласиана и бинаризация изображения. Зоны дивергенции обозначены белым цветом

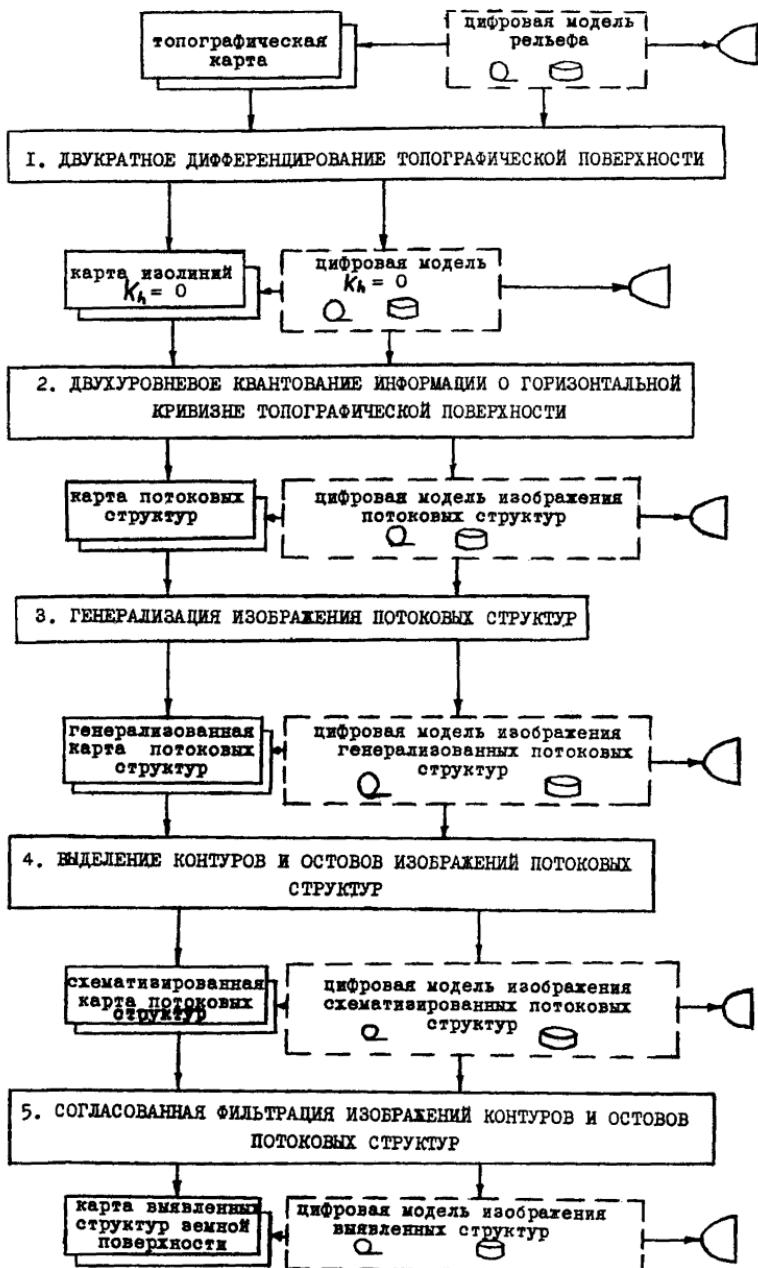


Рис. 4. Блок-схема алгоритма выявления структур земной поверхности. Условные обозначения: **Q** - информация хранится на магнитной ленте; **D** - информация хранится на магнитном диске; **D** - возможность представления информации в виде изображения на экране дисплея

несколько субъективны (рис. 3), но технологический процесс не требует серьезных затрат на оборудование и материалы.

1а. Гауссиан реализуется с помощью растрового рассеивателя или рассеивающей матовой стеклянной пластины. Основные операции - аналогично описанному в п. 1.

2. Цифровая компьютерная обработка изображения с использованием стандартного программного обеспечения /например, Прэтт, 1982/. Ввод информации в ЭВМ производится устройствами типа Scandig, ПЗС-матрица и т.п. Вывод - с помощью принтера или устройства типа Colorwrite.

Предлагаемый алгоритм генерализации может быть эффективно использован для объективизации выявления (визуализации) изображений полигональных и криволинейных структур земной поверхности различного уровня иерархии посредством построения остова генерализованного изображения и его согласованной фильтрации /например, Прэтт, 1982/ (рис. 4). На рис. 5 приводится пример использования данного алгоритма выявления структур земной поверхности. Отметим вероятность использования в аналогичных целях карт (цифровых моделей) вертикальной, средней, главных и гауссовой кривизн.

Выводы

1. Показана возможность картографического решения проблемы дешифрирования природных границ посредством визуализации системы изолиний топографических и топоклиматических величин.

2. Предложен алгоритм генерализации изображений потоковых структур и его физическая реализация. Алгоритм может быть использован для объективизации выявления выраженных в рельфе геологических структур, а также для генерализации любых площадных монохроматических картографических изображений. Вероятно его использование в целях объективизации дальней экстраполяции, тематических прогнозов и регнозов на основе критерия геометрического подобия рисунка потоковой структуры, а также прогноза перколяции (см. статью Шарого П.А. с соавт. в данном сборнике).

3. Кратко изложен вариант алгоритма визуализации изображений структур земной поверхности.



A

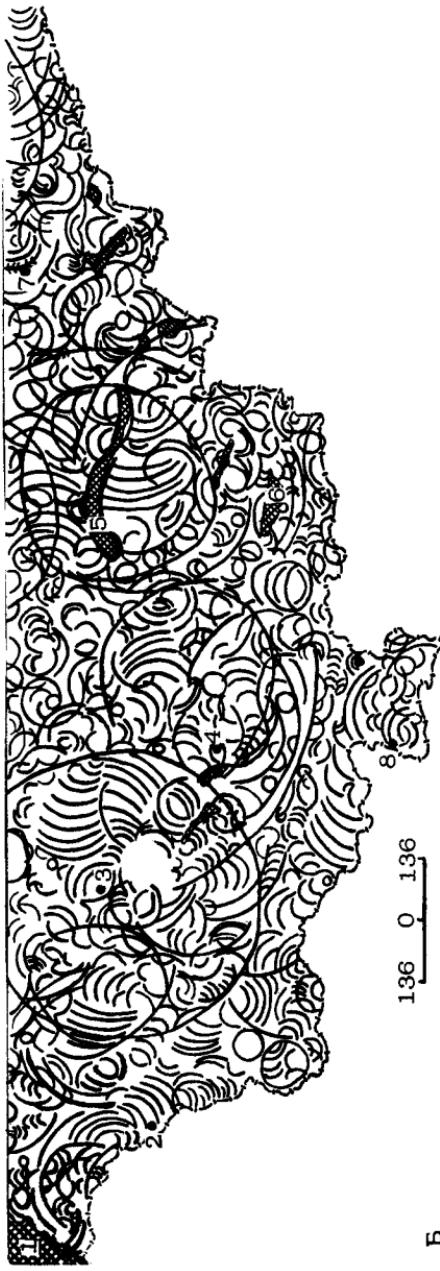


Рис. 5. Иллюстрация алгоритма выявления структур земной поверхности. А - уменьшенное изображение потоковых структур южных районов СССР, выполнено на основе "Карты потоковых структур СССР" /1990/. Б - результат визуального выявления структур земной поверхности, проведенного в соответствии с указанным алгоритмом (рис. 4). Обрабатывалось изображение, приведенное на рис. 5,А. При согласованной фильтрации выделялись дугообразные элементы изображения схематизированной карты потоковых структур. Цифрами обозначены: 1 - Каспийское море, 2 - Ашхабад, 3 - Учкудук, 4 - Ташкент, 5 - оз. Балхаш, 6 - оз. Иссык-Куль, 7 - Усть-Каменогорск, 8 - Хорог

ЛИТЕРАТУРА

Азизов Ш.К. Об особенностях генерализации крупномасштабных ландшафтных карт//Изв. АН АзССР. Сер. наук о Земле. 1982. № 2. С. 34-40.

Ананьев И.В., Трифонов В.Г. Сопоставление сейсмичности с элементами дешифрирования космических изображений//Исследование природной среды космическими средствами. Геология и геоморфология. Т.5. М.: ВНИТИ, 1976. С. 11-17.

Асланиашвили А.Ф. Метакартография. Основные проблемы. Тбилиси: Мецниереба, 1974. 125 с.

Баранский Н.Н. Генерализация в картографии и в географическом текстовом описании//Ученые записки МГУ. Вып. 119. География, кн. 2. М.: Изд-во МГУ, 1946. С. 180-205.

Бауэр П. Об одном практическом испытанном варианте автоматизированной генерализации линейных объектов картографического изображения//Геодезия и картография. 1973. № 8. С. 49-53.

Башенина Н.В., Заруцкая И.П. Принципы генерализации геоморфологических карт крупных и средних масштабов//Вест. Московского ун-та, сер. география, 1969. № 2. С. 18-24.

Берлянт А.М. Картографическое моделирование и системный анализ//Пути развития картографии. Сборник, посвященный 70-летию профессора К.А.Салишева. М.: Изд-во МГУ, 1975. С. 98-106.

Берлянт А.М. Образ пространства: карта и информация. М.: Мысль, 1986. 240 с.

Билич Ю.С., Васмут А.С. Проектирование и составление карт. М.: Недра, 1984. 364 с.

Богомолов Л.А. Оптическая генерализация и использование космических снимков для обновления мелкомасштабных карт (обзор проблемы)//Аэрометоды в географии. М.: МФГО, 1974. С. 24-26.

Богомолов Л.А. Дешифрирование аэроснимков. М.: Недра, 1976. 145 с.

Бородин А.В. К вопросу об отборе населенных пунктов на общегеографических картах//Сборник научно-технических и производственных статей по геодезии, картографии, топографии, аэроисъемке и гравиметрии. Вып. 18. М.: Геодезиздат, 1948. С. 127-132.

Бородин А.В. Вопросы генерализации картографического изображения при автоматическом создании карт //Геодезия и картография. 1976. № 7. С. 57-64.

Бородин А.В., Богинский В.М. Количественные критерии для генерализации на ЭВМ элементов содержания общегеографических карт//Реф. сборник № 25. Сер. картографическая. М.: ОНТИ ЦНИИГАиК, 1973. С. 6-12.

Боумен У. Графическое представление информации/Пер. с англ. М.: Мир, 1971. 225 с.

Броцкий А.С., Воронина А.Ф. и др. О методах полевого комплексного физико-географического картографирования//Вопросы географии, сб. 42. М.: Географиздат, 1958. С. 9-22.

Брюханов В.Н. О некоторых основных параметрах космических снимков с позиции их геологической информативности//Исследование Земли из космоса. 1983. № 4. С. 39–46.

Брюханов В.Н., Еремин В.К., Можаев Б.Н. Космические съемки в геологии//Сов. геология. 1977. № 11. С. 86–94.

Бугаевский Л.М., Билич Ю.С., Вахрамеева Л.А. и др. О некоторых положениях статьи "Рецидив формалистических концепций коммуникативной картографии под флагом автоматизации"//Геодезия и картография. 1986. № 7. С. 37–42.

Бюшгенс Л.М., Кельнер Ю.Г. Генерализация при комплексном картографировании природы крупных регионов//Геодезия и карточесия. 1968. № 11. С. 67–71.

Васмут А.С. Автоматизация в картографии//Итоги науки и техники. Сер.: География. Картография 1967–1969, вып. 4. М.: ВИНИТИ, 1970. С. 43–64.

Васмут А.С. Моделирование в картографии с применением ЭВМ, М.: Недра, 1983. 200 с.

Васмут А.С., Вергасов В.А. О некоторых математических аспектах процесса генерализации изображения местности на топографических картах//Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1974. № 6. С. 85–90.

Видина А.А. О содержании ландшафтных карт крупных масштабов и некоторых вопросах их генерализации//Материалы по физической географии. Вып. 3. Л.: Геогр. об-во СССР, 1963, С. 5–23.

Витковский В.В. Топография. Изд. второе. Петроград: Имп. Ник. Воен. Акад., 1915. 812 с.

Временная методика по составлению карт пластики рельефа крупного и среднего масштаба. Методические рекомендации /Степанов И.Н., Абдуназаров У.К., Брынских М.Н. и др. Пущино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1984. 20 с.

Выявление по топокартам и аэрофотоснимкам форм естественных почвенно-геоморфологических тел. Клеточная структура земной поверхности. Методические рекомендации /Степанов И.Н. Пущино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1983а. 76 с.

Выявление по топокартам и аэрофотоснимкам форм естественных почвенно-геоморфологических тел. Классификация структур земной поверхности. Методические рекомендации /Степанов И.Н., Сабитова Н.И. Пущино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1983б. 56 с.

Гараевская Л.С. Картография. М.: Недра, 1971. 360 с.

Геологические исследования из космоса /Под ред. С.Фредена, Э.Мерканти, М.Беккер/Пер. с англ. М.: Мир. 1975. 287 с.

Геттнер А. География. Ее история, сущность и методы/Пер. с нем. Е.А.Торнеус/Под ред. Н.Н.Баранского. М.: Госиздат, 1930. 416 с.

Гонин Н.Б., Яковлев Н.А. Закономерности генерализации на космических фотоснимках изображений некоторых индикаторов геологического строения//Исследование природной среды космическими

средствами. Геология и геоморфология. Т.5. М.: ВИНИТИ, 1976 С. 211-221.

Гонин Г.Б. Космическая фотосъемка для изучения природных ресурсов. Л.: Недра, 1980, 319 с.

Григорьев А.А. Космическая индикация ландшафтов Земли. Л.: Изд-во ЛГУ, 1975. 165 с.

Гунбина Т.Н., Спиридонов А.И. Опыт проработки вопроса об изображении рельефа на учебных физических картах (на примере карты СССР для средней школы М 1:5000000)/Под ред. А.А.Борзова//Труды ЦНИИГАиК. Вып. 21. М.: Изд-во ГУГСК НКВД СССР, 1938. 62 с.

Давыдкина Т.В., Богинский В.М. Исследование по программному отбору речной сети на ЭВМ//Реф. сборник, сер. картографическая, № 31. М.: ОНТИ ЦНИИГАиК, 1974. С. 55-62.

Давыдов, Г.П. Об отражении на карте взаимосвязей физико-географических элементов//Исследования по картографической генерализации. Труды ЦНИИГАиК. Вып. 76. М.: Геодезиздат, 1951. С. 18-23.

Джусь С.И. Некоторые вопросы картографического изображения рельефа. М.: Геодезиздат, 1958. 96 с.

Долгова Л.С. Методика составления мелкомасштабных почвенных карт. М.: Изд-во МГУ, 1980. 80 с.

Заруцкая И.П. Карты природы. Редакционно-подготовительные работы. Иркутск: Восточно-Сибирское изд., 1965. 208 с.

Заруцкая И.П. Составление специальных карт природы. М.: Изд-во МГУ, 1966. 232 с.

Заруцкая И.П. Географические принципы создания карт природы/Пути развития картографии. Сборник, посвященный 70-летию профессора К.А.Салищева. М.: Изд-во МГУ, 1975. С. 122-131.

Заруцкая И.П., Красильникова Н.В. Картографирование природных условий и ресурсов. М.: Недра, 1988. 299 с.

Заруцкая И.П., Красильникова Н.В. Проектирование и составление карт. Карты природы. М.: Изд-во МГУ, 1989. 296 с.

Зиборов В.В., Марчук И.М. О генерализации глубин при съемке донного рельефа //Геодезия и картография, 1988, № 10. С. 26-27.

Иванов В.В. О программировании отбора населенных пунктов на топографических картах//Геодезия и картография. 1964. № 2. С. 52-63.

Иванов В.В. О некоторых возможностях автоматизации составления топографических карт//Геодезия и картография, 1965. № 1. С. 62-66.

Имгоф Э. Изображение населенных пунктов на карте/Пер. с нем. М.: Геодезиздат. 1940. 76 с.

Исаченко А.Г. Физико-географическое картирование. Л.: Изд-во ЛГУ. Ч. 1. 1958. 232 с. Ч. 2. 1960. 231 с. Ч. 3. 1961. 268 с.

Исаченко А.Г. Картография и изучение взаимодействий между природой и обществом//Пути развития картографии. Сборник, пос-

вященный 70-летию профессора К.А.Салишева. М.: Изд-во МГУ, 1975. С. 46-56.

Каганский В.Л. Географические границы: противоречия и парадоксы//Географические границы/Под ред. Б.Б.Родомана и Б.М.Эккеля. М.: Изд-во МГУ, 1982. С. 7-19.

Казанов Л.К. К определению границ природных и природно-технических систем//Географические границы/Под ред. Б.Б.Родомана и Б.М.Эккеля. М.: Изд-во МГУ, 1982. С. 96-101.

Карта потоковых структур долины Зеравшана, М 1:25000. Составила Н.И.Сабитова. Ташкент: рукопись, фонды Гидроингео ПО Узбекгидрогеология, 1989.

Карта потоковых структур СССР, М 1:2500000. Листы 13, 14. Составила З.Ф.Поветухина. Пущино: рукопись, фонды ИПФС АН СССР, 1990.

Карта структур земной поверхности и почвенного покрова Уральского региона, М 1:1500000. Составили И.Г.Федичкина, Г.А.Курякова, З.Ф.Поветухина. Пущино: рукопись, фонды ИПФС АН СССР, 1990.

Колдаев П.К. Пластическое изображение рельефа на картах. М.: Геодезиздат, 1956. 134 с.

Комаров В.Б., Номоконова В.Ф., Углев Ю.В. Методы фильтрации фотоизображений и возможности их применения в геологии//Исследование природной среды космическими средствами. Геология и геоморфология. Т.2. М.: ВИНТИ, 1974, С. 107-110.

Комаров В.Б., Номоконова В.Ф., Углев Ю.В. Дальнейшее развитие вопросов фотографической фильтрации изображений в целях геологического дешифрирования//Исследование природной среды космическими средствами. Геология и геоморфология. Т.5. М.: ВИНТИ, 1976. С. 271-279.

Комков А.М. К вопросу о сущности и методах генерализации в картографии//Вопросы географии, Вып. 27. Экономическая география. М.: Географиздат, 1951. С. 237-256.

Кравцова В.И. Космическое картографирование. М.: Изд-во МГУ, 1977, 168 с.

Красильникова Н.В. Вопросы генерализации при составлении специальных карт (на примере геологических карт). М.: Изд-во МГУ, 1961. 153 с.

Ларин Д.А. Научно-техническое проектирование географических карт. М.: Госгеолтехиздат, 1963. 167 с.

Лебедев П.П. Системно-информационный подход к исследованию картографической генерализации//География и природные ресурсы, 1990, № 1, С. 151-156.

Лидов В.П. Из опыта работы по ландшафтному картированию Приокско-Террасного государственного заповедника//Вопросы географии. Сб. 16. Ландшафтovedение. М.: Географиздат, 1949. С. 179-190.

Лошакова Н.А. Использование метода пластики рельефа для сос-

тавления и анализа почвенных карт. Автореф. канд. дис. Новосибирск, 1988, 16 с.

Мамай И.И. Возможности генерализации ландшафтных карт (на примере западной части Казахстана) //Ландшафтный сборник. М.: Изд-во МГУ, 1970. С. 232-255.

Марр Д. Зрение. Информационный подход к изучению представления и обработки зрительных образов/Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1987. 400 с.

Мартыненко А.И. Автоматизация в картографии//Итоги науки и техники. Сер.: Картография. Т.5. М.: ВИНТИ, 1972, С. 24-52.

Мартыненко А.И. Автоматизация в картографии//Итоги науки и техники. Сер.: Картография. Т.6. М.: ВИНТИ. 1974. С. 45-80.

Метод пластики рельефа в тематическом картографировании: Сборник научных трудов. Пушкино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1987. 160 с.

Нешатаев В.Ю. Программа для автоматической генерализации картографических материалов//Эколого-географическое картографирование и оптимизация природопользования в Сибири. Материалы к 4 Регион. научн.-тех. конф. по тематическому картографированию (Иркутск, ноябрь 1989). Вып. 3. Иркутск: ИГ СО АН СССР, 1989. С. 175-176.

Номоконова В.Ф., Трофимов Д.М. и др. Фотографическая фильтрация – метод повышения геологической информативности космических снимков//Изв. вузов. Геология и разведка. 1978. № 11. С.136-141.

О ситуации или руководство к правильному изображению земной поверхности на топографических картах и планах. Извлечение из сочинений Лемана/Пер. с нем. СПб, 1831. 74 с.

Основы генерализации на общегеографических картах мелкого масштаба/Под ред. Ю.В.Филиппова//Труды ЦНИИГАиК. Вып. 104. М.: Геодезиздат, 1955. 336 с.

Павлова О.А. Математические методы генерализации линейных элементов при автоматизированном составлении карт//Методы современной картографии. Л.: Геогр. об-во СССР, 1978, С. 45-49.

Потапов О.А. Проблема обработки больших массивов геолого-геофизической информации и пути ее решения//Голография и оптическая обработка информации в геологии и геофизике. Л.: ЛИЯФ, 1979, С. 5-18.

Прасолов Л.И. К вопросу содержания почвенных карт мелкого масштаба//Генезис, география и картография почв. М.: Наука, 1978. С. 206-214.

Прэтт У. Цифровая обработка изображений. Кн. 2 /Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 480 с.

Ратайский Л. К вопросу о видах картографической генерализации Пер. спольск.//Пути развития картографии. Сборник, посвященный 70-летию профессора К.А.Салищева. М.: Изд-во МГУ, 1975. С.57-66.

Робинсон А. Исследования по оформлению карт//Пер. с англ.//
Там же. С. 67-75.

Салищев К.А. Основы картоведения. Общая часть. М.: Редбюро
ГУТК при СНК СССР, 1939. 308 с.

Салищев К.А. Важнейшие труды советской картографии за
25 лет//Сборник научно-технических и производственных статей
по геодезии, картографии, топографии, аэросъемке и гравиметрии.
Вып. 6. М.: Изд-во геодезической и картографической литературы,
1944. С. 3-29.

Салищев К.А. Генерализация в ее истории и современном раз-
витии//Итоги науки и техники. Сер.: Картография, Т.5. М.: ВИНИТИ,
1972. С. 6-23.

Салищев К.А. Взгляд на картографию в аспекте научно-техни-
ческой революции//Пути развития картографии. Сборник, посвящен-
ный 70-летию профессора К.А.Салищева. М.: Изд-во МГУ, 1975а.
С. 21-35.

Салищев К.А. О картографическом методе познания (анализ не-
которых представлений о картографии)//Пути развития картографии.
Сборник, посвященный 70-летию профессора К.А.Салищева. М.: Изд-
во МГУ, 1975б. С. 36-45.

Салищев К.А. Проектирование и составление карт. М.: Изд-во
МГУ, 1978. 238 с.

Салищев К.А. Картоведение. М.: Изд-во МГУ, 1982а. 408 с.

Салищев К.А. Картография. М.: Высшая школа, 1982б. 272 с.

Салищев К.А. Идеи и теоретические проблемы в картографии
80-х годов. Итоги науки и техники. Сер.: Картография, Т.10. М.:
ВИНИТИ, 1982в. 155 с.

Свентэк Ю.В. Обобщение начертаний на картах: опыт формализа-
ции метода//Тематическое системное картографирование с исполь-
зованием автоматики и дистанционных методов. М.: МФГО, 1986,
С. 18-23.

Серапинас Б.Б. О применении вероятностных зависимостей к
математическому обоснованию генерализации//Вест. Московского
ун-та, Сер.: География, 1978. № 4. С. 38-45.

Сергеев Г.А. Янутш Д.А. Статистические методы исследования
природных объектов. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 300 с.

Смирнов Л.Е. Генерализация при аэрокосмическом картографиро-
вании//Вестн. Ленинградского ун-та, Сер. география. 1982. № 12.
С. 60-70.

Смирнов Н.Н. Особенности составления и редактирования средне-
масштабных ландшафтных (типологических) карт//Изв. Воронежского
отд. геогр. об-ва СССР, 1961, Вып. 3. С. 91-96.

Соколов П.Д. Характерные примеры генерализации рельефа на
общегеографических картах//Исследования по картографической гене-
рализации/Труды ШНИГАиК, вып. 76. М.: Геодезиздат, 1951.
С. 59-73.

Соловицкий Б.В. Некоторые возможности автоматического обобще-
ния очертаний//Геодезия и картография. 1974. № 12. С. 56-59.

Соловицкий Б.В. Общий алгоритм автоматической генерализации тематических карт, составленных способом качественного фона, с помощью ЭВМ//Новые методы в тематической картографии (Математико-картографическое моделирование и автоматизация) М.: Изд-во МГУ, 1978. С. 103-113.

Спиридонов А.И. Геоморфологическое картографирование. М.: Недра, 1975. 183 с.

Степанов И.Н. Истинные и ложные линии на почвенных картах// Почвоведение. 1990, № 3. С. 128-146.

Степанов И.Н., Лошакова Н.А., Орлова Е.В. Оптико-структурный анализ форм земной коры по топографическим картам //ДАН СССР. 1988. Т. 299. № 4. С. 847-851.

Сухов В.И. Изображение населенных пунктов СССР на топографических картах//Труды ЦНИИГАиК. Вып. 48. М.: Геодезиздат, 1947, 176 с.

Сухов В.И. Аналитический метод генерализации//Труды МИИГАиК, Вып. 5. М.: Изд-во геодезической и картографической литературы, 1950. С. 3-14.

Сухов В.И. Составление и редактирование общегеографических карт. М.: Геодезиздат, 1957. 279 с.

Сухов В.И., Надеждина М.Е. Отбор дискретной информации на картах с применением ЭВМ//Географический сборник. № 5. М.: ВИНИТИ, 1975. С. 190-201.

Тетерин Г.Н. Числовые и аналитические характеристики карт и их значение при автоматизации картографирования//Научные труды ВАГО. Материалы 8 съезда ВАГО. Геодезия и картография. М.: ВАГО, 1987. С. 133-137.

Тилло А.А. Орография Европейской России на основании гипсометрической карты//Известия Императорского Русского Географического общества. Т. 36. СПб, 1890. С. 8-32.

Фадеева Н.В. О проблеме генерализации ландшафтных карт// Вопросы ландшафтоведения (Материалы к 6 Всесоюзному совещанию по вопросам ландшафтоведения). Алма-Ата: АН КазССР, Геогр. об-во СССР, 1963. С. 208-214.

Филиппов Ю.В. Основы генерализации рельефа на топографических картах//Труды ЦНИИГАиК. Вып. 47. М.: Геодезиздат, 1946, 232 с.

Фонтанель А. Обработка изображений ЕРТС//Геологические исследования из космоса/Пер. с англ. М.: Мир, 1975. С. 141-144.

Халугин Е.И., Каминский В.И., Стрелец Е.А. и др. Выбор операций генерализации по эвристическим признакам//Геодезия и картография. 1989, № 6. С. 37-39.

Херсонский С.А. Генерализация элементов почвенного и растительного покрова на общегеографических картах//Труды ЦНИИГАиК, Вып. 76. Исследования по картографической генерализации. М.: Геодезиздат, 1951. С. 24-39.

Цифровая фильтрация аэроснимков, стереомоделей и карт/Под ред. А.А.Чигирева. Л.: Недра, 1976. 200 с.

Чарльзурт Х.А.К., Робинсон Дж.Е., Кольбо Ж.П. Изучение особенностей рельефа методом пространственной фильтрации (на примере Парижского бассейна)/Пер. с фр./Картография. Зарубежные концепции и направления исследований. Вып. 1. М.: Прогресс, 1983. С. 246-259.

Шарый П.А., Степанов И.Н. Метод вторых производных в геологии//ДАН СССР. 1991. Т. 219. № 2.

Ширяев Е.Е. Новые методы отображения и анализа геоинформации с применением ЭВМ. М.: Недра, 1977. 182 с.

Ширяев Е.Е. Картографическое отображение, преобразование и анализ геоинформации. М.: Недра, 1984. 248 с.

Эккерт М. Военная картография/Пер. с нем. М.: Военно-топографическое управление РККА, 1931. 77 с.

Ahearn S.C. Combining laplacian images of different spatial frequencies (scales): implications for remote-sensing image analysis//IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 1988. Vol. 26. No 6. P. 826-831.

Arnheim R. The perception of maps//Amer. Cartogr. 1976. Vol. 3. No 1. P. 5-10.

Barber N.F. A diffraction analysis of a photograph of the sea//Nature. 1949. Vol. 164. No 4168. P. 485.

Beckett Ph. Cartographic generalisation//Cart.J. 1977. Vol. 14. No 1. P. 49-50.

Bhattacharyya B.K., Raychaudhuri B. Aeromagnetic and geological interpretation of a section of the Appalachian Belt in Canada//Canad. J. Earth Sciences. 1967. Vol. 4. No 6. P. 1015-1037.

Boyle A.R. The quantised line//Cartogr. J. 1970. Vol. 7. No 2. P. 91-94.

Brassel K.E. Weibel R. A review and conceptual framework of automated map generalization//Int. J. Geographical Information Systems. 1988. Vol. 2. No 3. P. 229-244.

Carstensen L.W.Jr. A fractal analysis of cartographic generalization//Amer. Cartogr. 1989. Vol. 16. No 3. P. 181-189.

Clarke K.C., Scale-based simulation of topographic relief//Amer. Cartogr., 1988, Vol. 15. No 2. P. 173-181.

Dettori G., Falcidieno B. An algorithm for selecting main points on a line//Computers and Geosciences. 1982. Vol. 8. No 1. P. 3-10.

Frank T.D. Mapping dominant vegetation communities in the Colorado Rocky Mountain Front Range with Landsat Thematic Mapper and digital terrain data//Photogram. Eng. and Remote Sensing. 1988. Vol. 54. No 12. P. 1727-1734.

Horn B.K.P. Hill shading and the reflectance map//Proc. of the IEEE. 1981. Vol. 69. No 1. P. 14-47.

- Imhof E. Cartographic relief presentation. Berlin-N.Y.: Walter de Gruyter, 1982. 389 p..
- Kadmon N. Automated selection of settlement in map generalisation//Cartogr.J., 1972. Vol. 9. No 2. P. 93-98.
- Keates J.S. Cartographic design and production. N.Y.: A Halsted Press Book, 1973. 240 p.
- Koeman C., Weiden F.L.T. van der. The application of computation and automatic drawing instruments to structural generalization//Cartogr.J. 1970. Vol. 7. No 1. P. 47-49.
- Lichther W. Computer-assisted processes of cartographic generalization in topographic maps//Geo-Processing. 1979. Vol. 1. No 2. P. 183-199.
- Lundqvist G. Generalization - a preliminary survey of an important subject//Canadian Surveyor, 1959. Vol. 16. No 10. P. 466-470.
- Mandelbrot B. How Long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension//Science. 1967. Vol. 156 No 3775. P. 636-638.
- Masuoka P.M., Harris J., Lowman P.D. et al. Digital processing of orbital radar data to enhance geologic structure: examples from the Canadian Shield//Photogram. Eng. and Remote Sens. 1988. Vol. 54. No 5. P. 621-632.
- Mayers M.G., Fosnight E.A., Sturdevant J.A. A study of four raster-based data generalization procedures//U.S. Geological Survey Bull. 1988. No 1841. P. B1-B10.
- Miller O.M., Voscuil R.J. Thematic-map generalization//Geographical Review. 1964. Vol. 54. No 1. P. 13-19.
- Monmonier M.S. Cartography and mapping//Progress in Human Geography. 1982. Vol. 6. No 3. P. 441-448.
- Nickerson B.G. Automated cartographic generalization for linear features//Cartographica. 1988. Vol. 25. No 3. P. 15-66.
- Pannekoek A.J. Generalization of coastlines contours//Internationales Jahrbuch für Kartographie, Bd. 2. Gutersloh: C.Bertelsmann Verlag, 1962. P. 55-75.
- Perkal J. Proba objektywnej generalizacji//Geodesia i Kartografia. 1958. T. 7. Z. 2. P. 130-142.
- Pincus H.J., Dobrin M.B. Geological application of optical data processing//J. Geophys. Res. 1966. Vol. 71. No 20. P. 4961-4969.
- Raisz E. Principles of cartography. N.Y.-San Francisco-Toronto-L.: McGraw-Hill Book Company, 1962. 315 p.
- Robinson J.E., Charlesworth H.A.K., Ellis M.J. Structural analysis using spatial filtering in interior

plains of South-Central Alberta//Amer. Association of Petroleum Geologists Bull. 1969. Vol. 53. No 11. P. 2341-2367.

Sirco M. Rozwóy badań nad generalizacją kartograficzną//Czasopismo geograficzne, 1988. T. 59. Z. 1. P. 51-65.

Smka E. The analytical solution of regular generalization in cartography//Int. Jahrbuch für Kartographie, Bd. 10. Gütersloh: Kartographisches Institut Bertelsmann, 1970. S. 48-62.

Thapa K.A. Review of critical points detection and line generalization algorithms//Surveying and Mapping, 1988a. Vol. 48, No 3. P. 185-205.

Thapa K.A. Automatic line generalization using zero-crossings//Photogram. Eng. and Remote Sensing 1988b. Vol. 54. No 4. P. 511-517.

Tobler W.R. Automation in the preparation of thematic maps//Cartogr. J. 1965. Vol. 2, No 1. P. 32-38.

Tobler W.R. Numerical map generalization//Michigan Inter-University Community of Mathemat. Geographers. Discuss. Paper. 1966. No 8, P. 1-27.

Töpfer F., Pillewizer W. The principles of selection//Cartogr.J. 1966, Vol. 3. No 1, P. 10-16.

Vanicek P., Woolnough D.F. Reduction of linear cartographic data based on generation of pseudo-hyperbolae//Cartogr.J. 1975. Vol. 12. No 2. P. 112-119.

Weber W. Optimal approximation in automated cartography//Optimal Estimation in Approximation Theory. The IBM Research Symposia Series. N.Y.-L.: Plenum Press, 1977. P. 201-213.

Wolf G.W. A mathematical model of cartographic generalization//Geo-Processing. 1984. Vol. 2, No 3. P. 271-286.

О ВОЗМОЖНОЙ РОЛИ ПЕРКОЛЯЦИИ ДОЛИН В ГИДРОГЕОЛОГИИ

П.А.Шарый, Г.А.Курякова, И.В.Флоринский

Представим себе картографическую генерализацию как сглаживание топографической поверхности. Прежде всего заметим, что эта генерализация способна соединять (см. рис.) ранее разъединенные долины (в более точном определении – области конвергенции, где происходит сближение линий тока. Последнее доказано в статье Шарого П.А. в данном сборнике).

Такое соединение может приводить к визуализации инфраструктур земной поверхности, под которыми здесь понимаются приповерхностные потоковые структуры, возникающие как результат прекра-

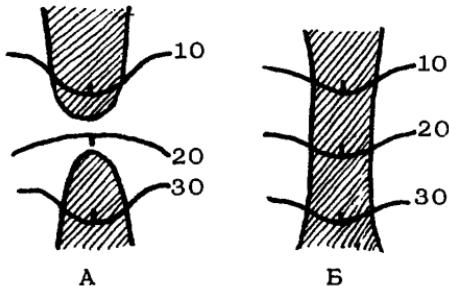


Рис. Иллюстрация слияния областей конвергенции линий тока (заштрихованы) в результате сглаживания топографической поверхности. А – поверхность до сглаживания; Б – поверхность после сглаживания

шения учета мелких деталей рельефа воспроизводимым методом. Топографический метод вторых производных ("пластика рельефа") по отношению к инфраструктурам выявляется бассейновым методом; в то же время в гидрогеологии "наиболее значимый территориальный уровень... – речной бассейн" /Пряжинская, 1985; с. 7/.

В этой работе мы рассматриваем случаи, когда подземные воды в целом следуют земной поверхности. Ясно, что первый водный горизонт повторяет рельеф лишь в общих чертах. Речь идет, по существу, о физическом механизме сглаживания топографической поверхности в определенных ситуациях (достаточно слабая гетерогенность водопроводящих и подстилающих пород). Отметим еще то важное обстоятельство, что увеличение рассматриваемых объемов приповерхностных слоев при переходе к более мелким масштабам нередко способно приводить к уменьшению влияния гетерогенности на направление перемещения подземных вод вследствие фактического усреднения по объему. Мы приходим к интересному результату: генерализация выявляет в рассматриваемых ситуациях инфраструктуры несущие информацию о направленности движения подземных вод.

Наличие связной инфраструктуры из "клasterов" (в данном случае, областей конвергенции, то есть долин) называется в физике фазовых переходов и зародышеобразования перколоцией /Мюллер-Крумбхаар, 1982; Кестен, 1986/. Например, слияние сверхпроводящих областей при понижении температуры дает сверхпроводимость металлах.

Обратим внимание на скачкообразный характер изменения водного режима региона при возникновении перколоции (кстати, этот термин означает "просачивание"): происходит сравнительно быстрого переключение характера движения подземных – но возможно, и поверхностных вод. Отметим также явно нелокальную природу перколоции: связность долин есть свойство определенного региона как целого, в отличие от обычно используемых в топогра-

фии величин (высота, крутизна, кривизна и др.) – локальных характеристик местности.

Переключение водного режима региона может представлять собой реальный процесс в двух основных случаях: 1) в результате создания гидротехнических сооружений (каналов, водохранилищ, переброски части стока рек и т.п.); 2) в результате естественных природных процессов.

В первом случае возникновение перколяции не является необходимой предпосылкой переключения водного режима: например, связность долин могла существовать до сооружения канала (водохранилищ и т.п.). В такой ситуации пуск канала в действие может привести к подтоплению (заболачиванию), казалось бы, не связанных с этим каналом территорий из-за имеющейся перколяции.

Во втором случае перколяция может представлять собой реальность по отношению к областям конвергенции: например, при малой активности тектонических процессов по сравнению с денудацией /Пенк, 1961/, когда стягивание есть реальный процесс. Возникновение новых переколирующих кластеров в этой ситуации способно приводить к скачкообразному изменению водного режима региона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кестен Х. Теория просачивания для математиков. М.: Мир, 1986, 392 с.
2. Мицлер-Крумбхаар Х. Моделирование роста кристаллов методом Монте-Карло//Методы Монте-Карло в статистической физике. М.: Мир, 1982. С. 287-328.
3. Пенк В. Морфологический анализ. М.: Географгиз, 2961. 360 с.
4. Пряжинская В.Г. Математическое моделирование в водном хозяйстве. М.: Наука, 1985. 113 с.

К ПОСТРОЕНИЮ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ЛАНДШАФТНЫХ РИСУНКОВ В ЛИНЕЙНЫХ СЕЧЕНИЯХ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ТЕМАТИЧЕСКОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ

А.С.Викторов

Анализ рисунков изображения космических снимков (а также аэроснимков) является одним из наиболее важных источников геологической, сельскохозяйственной, географической информации /1, 2, 3/; в основе формирования рисунков изображения лежит природная мозаика, образованная на земной поверхности природно-территориальными комплексами, – ландшафтный рисунок территории /6/. Особенно важным представляется развитие количественного анализа рисунков изображения как одной из основ автоматизации дешифровочного процесса.

Актуальным вопросом анализа рисунков изображений аэро- и космофотоснимков, в основе которых лежит ландшафтный рисунок территории, является изучение параметров, получаемых при пересечении рисунков прямыми линиями. На решении этого вопроса базируются использование сканирования изображений, большой круг

задач автоматизации дешифрирования и некоторые количественные приемы индикации.

Закономерности строения сечений рисунков затрагивались в ряде исследований /4-6/. Наиболее существенным результатом их изучения явилось установление того, что статистическое распределение длин отрезков-пересечений какой-либо составляющей ландшафтного рисунка хорошо описывается, как правило, логнормальным распределением.

Целью настоящей работы является построение модели, теоретически описывающей формирование статистических распределений отрезков пересечений для некоторых генетических типов территорий. Такая модель позволит объяснить наблюдающуюся картину и предсказать некоторые теоретически и практически важные свойства таких распределений.

Рассмотрим схематизированные представления о развитии на однородной территории определенного класса процессов. Пусть идущие процессы изменения ландшафтного строения привели к возникновению некоторой составляющей рисунка и удовлетворяют следующим предположениям ("модель слияния"):

- изменения рисунка происходят на рассматриваемой стадии за счет роста размеров и слияния контуров, уже возникших под влиянием рассматриваемых процессов, новые контуры практически не возникают;

- слияния каждой пары соседних контуров носят вероятностный характер, имеют постоянную вероятность и статистически независимы.

Подобным условиям могут отвечать процессы изменения ландшафтного строения, связанные с повышением уровня грунтовых вод, с затоплением поверхностными водами, и другие процессы, развивающиеся с тенденцией к росту "от имеющихся очагов" на однородной территории (рис. 1).

Конечно, предположения обладают определенной долей схематизма. Особенно это относится к представлению об отсутствии возникновения контуров, а все сводится к изменениям размеров уже существующих контуров. Однако на стадиях, когда процесс достиг значительного развития, подобные предположения представляются в целом оправданными.

Рассмотрим, какие изменения происходят на случайной трансекте под влиянием описываемых выше трансформаций ландшафтных контуров, возникших под действием изучаемого процесса (рис. 2).

Пусть в начальный момент длины отрезков-пересечений расширяющейся составляющей ландшафтного рисунка распределены по некоторому закону $F_0(x)$ и ему соответствует характеристическая функция

$$\varphi_0(t) = 1 + M'_0 i t + \dots, \quad (1)$$

где M'_0 - момент первого порядка (среднее значение). Обозначим

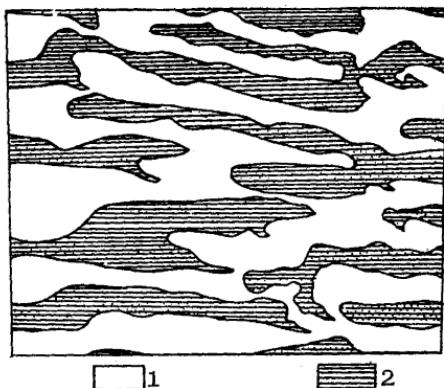


Рис. 1. Пример ландшафтного рисунка, удовлетворяющего условиям "модели слияния" (Прикаспий): 1 – супесчаная равнина, закрепленная серопольинно-биокргуновой растительностью на бурых пустынно-степных почвах, 2 – мокрый солончак, лишенный растительности, с окаймлением полосой солероса

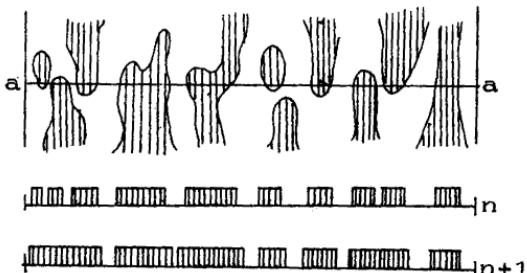


Рис. 2. Схема изменений на трансекте за последовательные сроки (n -й и $n+1$ -й) под влиянием процессов, охватываемых "моделью слияния"; штриховкой выделена составляющая рисунка, возникшая под действием рассматриваемых процессов

распределение пересечений, которое формируется через n единиц времени (например, десятилетий), как $F_n(x)$ и характеристическую функцию

$$\varphi_n(t) = 1 + M_n^1 t - M_n^2 \frac{t^2}{2} + \dots, \quad (2)$$

где M_n^l – моменты l -го порядка. Наконец, пусть за едини-

ци в времени каждый отрезок-пересечение увеличивается на некоторое случайное приращение с законом распределения $F_\varepsilon(x)$ и характеристической функцией

$$\varphi_\varepsilon(t) = 1 + \varepsilon i t + \dots, \quad (3)$$

где ε – соответственно момент первого порядка для приращений.

За ту же единицу времени может произойти слияние каждой пары соседних пересечений с некоторой вероятностью p . Очевидно, учитывая начальные предположения, число сливающихся отрезков-пересечений подчиняется геометрическому распределению с параметром p . Это позволяет, пользуясь тождеством Вальда, определить среднее

$$M_{n+1}^1 = \frac{M_n^1}{1-p} + \varepsilon \quad (4)$$

и соответственно нетрудно получить, что

$$M_n^1 = \frac{M_0^1 + \frac{\varepsilon(1-p)}{p}}{(1-p)^n} + \frac{\varepsilon(1-p)}{p}. \quad (5)$$

Для распределений пересечений в последовательные моменты времени n и $(n+1)$ оказывается справедливым следующее соотношение:

$$F_{n+1}(x) = (1-p) \sum_{k=1}^{\infty} p^{k-1} \prod_{i=0}^{k-1} F_n(x) * F_\varepsilon(x), \quad (6)$$

где знаком $*$ обозначена свертка соответствующих распределений, а знаком \prod – свертка K одинаковых распределений.

Очевидно, что с каждым шагом распределение меняется. Рассмотрим его проведение для больших n . Для этого воспользуемся аппаратом характеристических функций. Из (6) и известных теорем (см. например, [7]) следует, что для характеристических функций справедливо соотношение

$$\varphi_{n+1}(t) = (1-p) \sum_{k=1}^{\infty} p^{k-1} \varphi_n^{(k)}(t) \varphi_\varepsilon(t). \quad (7)$$

Суммируя ряд – его сходимость обеспечена соотношениями, –

$$p < 1, |\varphi(t)| < 1, \quad (8)$$

получаем

$$\varphi_{n+1}(t) = \frac{(1-p)\varphi_n(t)\varphi_\varepsilon(t)}{1 - p\varphi_n(t)}. \quad (9)$$

Используя метод математической индукции, нетрудно показать,

что

$$\varphi_n(t) = \frac{(1-p)^n \varphi_e(t) \varphi_e^n(t)}{1 - p \varphi_e(t) \frac{1 - (1-p)^n \varphi_e^n(t)}{1 - (1-p) \varphi_e(t)}}. \quad (10)$$

Нормируя величину отрезка-пересечения по среднему M_n^1 , определяемому формулой (5), используя представление характеристических функций (1) и (3) и выражение для среднего (4) и выделяя члены порядка не больше n/M_n^1 , получаем для характеристической функции нормированной величины $\varphi_n^o(t)$ выражение

$$\varphi_n^o(t) = \frac{1 + \frac{n\varepsilon}{M_n^1} it + o_1\left(\frac{n}{M_n^1}\right)}{1 - \left(1 - \frac{n\varepsilon}{M_n^1}\right)it + o_2\left(\frac{n}{M_n^1}\right)} = \frac{e^{\frac{n\varepsilon}{M_n^1} it}}{1 - \left(1 - \frac{n\varepsilon}{M_n^1}\right)it} + o\left(\frac{n}{M_n^1}\right). \quad (11)$$

Последнее выражение позволяет сделать ряд выводов. Прежде всего при $n \rightarrow \infty$, $\frac{n}{M_n^1} \rightarrow 0$ и $\varphi_n^o(t) \rightarrow \frac{1}{1-2t}$,

то есть

$$F_n^o(x) \rightarrow 1 - e^{-x}, \quad (12)$$

где $F_n^o(x)$ — закон распределения нормированной величины.

Таким образом, в результате слияния, идущего достаточно большое время, распределение стремится к экспоненциальному независимо от исходного начального распределения длин отрезков-пересечений.

Отсюда же следует другой вывод: при больших n стандарт приближается к среднему значению, а если говорить о моментах любого порядка, то

$$M_n^n = n! / (M_\infty^1)^n. \quad (13)$$

Наконец, проведенные построения позволяют сделать вывод о характере, которое приобретает изучаемое распределение при больших n . Из выражения (12) следует, что при больших n распределение пересечений близко к экспоненциальному со сдвигом вправо на величину $n\varepsilon/M_n^1 / 7$. Таким образом, при достаточно большом времени развития процесса распределение длин отрезков-пересечений имеет вид

$$F_n(x) \approx 1 - e^{-\lambda(x-\lambda)}, \quad \lambda > 0 \quad (14)$$

приближаясь с увеличением времени к экспоненциальному

$$F_\infty(x) \approx 1 - e^{-\lambda_\infty x}, \quad (15)$$

где $\alpha, \lambda, \lambda_\infty$ - параметры распределений.

Экспоненциальное распределение с правым сдвигом близко по форме кривой к логнормальному распределению, поэтому представляется естественным, что в ситуациях, подпадающих под данную модель, хорошим приближением эмпирического распределения служит, как установлено, логнормальное.

Предлагаемая модель позволяет объяснить некоторые особенности наблюдаемых распределений. При использовании логнормального распределения стандарт логарифма (один из параметров распределения) изменяется, как показывает опыт /6/, в узких пределах.

Рассматриваемая модель дает объяснение этой странности, по крайней мере для рассматриваемой группы процессов. Действительно, за оценку названного стандарта принимается обычно /8/

$$\hat{\sigma}_n = \sqrt{\ln\left(\frac{M_n^2}{(M_n^1)^2}\right)}. \quad (16)$$

Однако, учитывая соотношение (13), при больших n , получаем

$$\frac{M_n^2}{(M_n^1)^2} \rightarrow 2, \quad n \rightarrow \infty. \quad (17)$$

Поэтому стандарт логарифма будет близок к $\sqrt{\ln 2}$, т.е. к 0,83. При этом, как показывает анализ, стремление к пределу происходит снизу; таким образом, указанное количественное значение должно служить ограничением сверху изменений исследуемого параметра. Это согласуется с опытными данными.

Для эмпирической проверки модели выбраны три эталонных участка, расположенных в северном Прикаспии и юго-восточном Приаралье. На них исследовалось распределение длин отрезков-пересечений трансектами одной из составляющих рисунка. Все участки относятся к территориям, где существенную роль в ландшафтной дифференциации сыграли поверхностные или подземные воды. В результате их воздействия значительное распространение получили солончаки - на тех участках, где капиллярная кайма достигает поверхности, и водоемы - там, где речь идет о поверхностных водах. В обоих случаях развитие указанных составляющих рисунков шло в значительной мере за счет роста и слияния уже имеющихся солончаков (или водоемов). Таким образом, для изучаемых участков есть основания предполагать справедливость положений, лежащих в основе рассматриваемой модели слияния.

С помощью статистического критерия Пирсона было проверено соответствие эмпирических распределений длин отрезков-пересечений рассматриваемых составляющих распределению Пуассона со сдвигом. Параметры распределения определяются по формулам

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{\hat{c}}, \quad \hat{\alpha} = \hat{a} - \hat{c},$$

где $\hat{\alpha}$ и $\hat{\lambda}$ - соответственно оценки среднего и стандарта. Анализ результатов проверки показывает, что эмпирические распределения в значительной мере согласуются с предлагаемой моделью слияния (таблица).

Значения критерия согласия χ^2 эмпирического распределения длин отрезков-пересечений с теоретическими

Вид ПТК	N	α	λ	χ^2	$\chi^2_{0,01}$	$\hat{\sigma}_\epsilon$
Солончаки, лишенные растительности (Прикаспий)	168	17,9	0,00334	9,63	16,81	0,59
Водная поверхность (Приаралье)	60	165,4	0,00391	3,77	6,35	0,70
Солончаки, лишенные растительности (Прикаспий)	155	28,0	0,02584	12,55	16,81	0,58

Обоснованная выше модель может служить основой для предсказания поведения любых показателей, базирующихся на измерениях по трансектам. В частности, она может быть использована для оценки значимости различий двух изображений на основе данных сканирования, что представляется весьма важным для автоматизации процесса дешифрирования, а также для индикационного истолкования подобных данных. Так, например, в ряде задач распознавания и индикации используют среднюю длину отрезка-пересечения трансектой какой-либо составляющей. Теперь, зная закономерность строения пересечений для изученного класса процессов, можно сделать вывод, что средняя длина (ℓ) подчиняется гамма-распределению (точнее, эрланговскому) с правым сдвигом, т.е. плотность распределения средней длины дается формулой

$$f_\ell(x) = \frac{\lambda^n}{n!} (x-\alpha)^{n-1} e^{-\lambda(x-\alpha)},$$

где α, λ, n - значения параметров.

Это позволяет построить количественные критерии значимости отличий исследуемых рисунков по данному параметру.

Проведенное рассмотрение позволяет заключить, что создание аналитических моделей ландшафтных рисунков - один из наиболее перспективных путей развития их теории, позволяющих получать в настоящее время и практически важные результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Космическая съемка и тематическое картографирование. М.: МГУ, 1979. 232 с.
2. Antrop M. Inventoring and monitoring of landscape as a natural and cultural resources//Proc. EARSeL/ESA Symp: Remote Sensing Appl. Environ. Studies, Brussels, 26–28 Apr. 1983. Paris, 1983. P. 105–113.
3. Бострем В.Г. Картографирование структуры почвенного покрова таежных территорий севера Европейской части СССР с использованием аэрокосмических снимков (на примере Архангельской области) Автореф. канд. дис. М. 1988. 19 с.
4. Григорьев А.А. Некоторые статистические критерии степени аналогичности природных комплексов//Аэрофотографическое эталонирование и экстраполяция. Л.: Наука, 1967. С. 41–49.
5. Виноградов Б.В. Иерархия топологических единиц растительного покрова//Биогеография и география почв/Труды 23-го Международного географического конгресса. Секция 4. М., 1976. С. 115–118.
6. Викторов А.С. Рисунок ландшафта. М.: Мысль, 1986, 179 с
7. Справочник по теории вероятности и математической статистике. М.: Наука, 1985, 640 с.
8. Кендалл М.Д., Стюарт А. Статистические выводы и связи. М., Наука, 1973, 900 с.

ГАЛОГЕОХИМИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ НОРМАЛИЗАЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ АРАЛЬСКОГО РЕГИОНА

И.Н.Степанов

Введение

Экологический анализ любой территории начинается с составления тематических карт (геологических, ландшафтных и др.), требующих математически точных обоснований. В последних особенно нуждаются карты, на базе которых проводятся проектирование, строительство, с.-х. освоение водохозяйственных объектов. Тематические карты обычно составляются на топографической основе, которая является континуальной математической моделью земной поверхности. В поле специалист проводит по топокарте почвенную съемку, при которой континуум изогипс превращается в совокупность дискретных почвенных выделов. Это превращение не имеет научных объяснений осуществляется без правил, произвольно, отчего значимость топокарты как математической модели теряется, и топокарта практически используется лишь для глазомерной привязки почвенных ям и границ к местности. Точность, заложенная в топосовине, исчезает, и тематическая карта становится приблизительной, произвольно соэ-

даваемой. Для сохранения математической точности топоосновы нами предложен метод геометрического преобразования континуума изогипс топоосновы в аналогичные им формы, но уже дискретные; с последними тесно связано содержание тематических карт (почвенных, ландшафтных и др.).

Геометрическое преобразование изогипс проводится топографическим методом вторых производных. Точки перегибов изогипс с одинаковой кривизной соединяются линией, названной морфоизографой. Последняя следует по точкам нулевой кривизны. Морфоизографа делит континуум изогипс на области повышений и понижений (дивергенции и конвергенции); при этом графически обособляются водоразделы, склоны разной крутизны, экспозиции и протяженности. Такая карта названа картой пластики рельефа; ее узор подобен узору аэрокосмоснимков, что позволяет более эффективно использовать последние при составлении тематических карт, а затем и при их анализе. Описываемый метод обогащает дифференциальную геометрию и внедряет геодезические методы в тематическую картографию.

Исходный картографический материал, его качество, прежние результаты

На базе нового метода составлена и опубликована серия тематических карт среднего масштаба (1:500000, 1:600000) по Туркменистану и Западному Узбекистану (почвенные, солевые, гидрологические, подстилающих горных пород, геоморфологические, геоботанические, механического состава, районирования, рекомендаций по охране и рациональному использованию водных и земельных ресурсов и др.), а также мелкомасштабные карты: "Карта систем земной поверхности и почвенного покрова части Средней Азии" (М., ГУГК СССР, 1989. М 1:1,5 млн., гл. ред. И.Н.Степанов), "Галогеохимическая карта Аральского региона" (М. - Пущино, 1989. М 1:1,5 млн., фонды ИПФС АН СССР, института "Союзгипроводхоз"). Эти и другие материалы послужили основой для разработки концепции нормализации экологической обстановки в Аральском регионе, базирующейся на галогеохимических представлениях, и позволили сделать выводы о том, что метод пластики (картографический метод вторых производных) имеет следующие преимущества и результаты:

1. Метод пластики сохраняет в изолиниях плановой кривизны (морфоизографах) геометрическую достоверность форм земной поверхности, изображенных на топоосновах изогипсами, т.е. внедряет в тематическое картографирование точный по содержанию геодезический метод. Ранее многими отрицалась даже постановка такой проблемы (формально-логический переход от топоосновы к тематической карте), так как считалось, что составление и генерализация тематических карт - это еще не наука, а лишь искусство, тогда как составление и генерализация топографических карт - это капитальная научная разработка. Метод пластики, преобразив изогипсы

в морфоизографы, решил это противоречие: сделал картографическую процедуру составления и генерализации тематических карт на базе топооснов непрерывной, целостной, единой, полностью математизированной. Тем самым выполнен количественный сравнительно-географический анализ путем группировки сходных качественных признаков в математически однородные изолинии, изоповерхности, изообъемы.

Если на прежних тематических картах выдел представлял собой искусственно создаваемые за счет слияния повышений и понижений рельефа поверхности (нульмерные, где все значения приведены к нулю), то на новых картах разделяемые морфоизографом повышения и понижения образуют ориентированные гравитационным полем поверхности (двумерные, где значения параметров распределены по длине и ширине потоковой структуры). Последние можно рассматривать как кластеры или домены, например, почвенный кластер. Совокупность почвенных кластеров образует кластерную инфраструктуру почвенного пространства. Почвенные и рельефные кластеры при генерализации образуют соответствующие переколяции. Граница, оконтуривающая ту или иную инфраструктуру, названа изогенографой. Последние создают клеточную (ячеистую) структуру земной коры и почвенного покрова в виде симметричной, периодически повторяющейся совокупности окружностей, эллипсов, спиралей, полигонов; границы последних – изолинии (морфоизографы) нулевой вертикальной кривизны. Все эти формы – результат генерализации древовидной системы рельефа (или почв, наносов и др.).

2. Метод пластики продолжает традиции преобразования изогипс, начатые П.К.Соболевским /1932/. Его можно, видимо, назвать сравнительно-географическим, так как он объединяет в изолинии точки (значения) с одинаковыми величинами: высота места, крутизна, кривизна, количество гумуса, карбонатов и т.п. Однако почвенные и ландшафтно-геохимические карты не строятся на изолиниях, хотя составители таких карт декларируют приверженность к сравнительно-географическому методу. На самом деле традиции сравнительно-географического метода сохраняются только на картах, построенных методом пластики; морфоизографа, изучая геометрию топографической поверхности, является, по П.К.Соболевскому, прямым следствием общего анализа геохимического поля.

В настоящей работе сделана попытка развить метод изолиний (континуальной поверхности) до метода натурных аналогов /Степанов, 1978/, который имеет дело с обособленными в пространстве почвенно-геохимическими телами (кластерами, доменами, инфраструктурами), т.е. с дискретными образованиями.

3. Метод пластики выявляет на топокартах, описывающих изолиниями даже очень плоские территории, бассейны стока по следам бывшей гидрографической сети с областями формирования, транзита и аккумуляции воды, солей и мелкозема. Сопряженный анализ структурных узоров мелиоративных систем и рельефа пока-

зывает, что дренажная сеть не вписывается в систему естественных литодинамических потоков и зачастую построена вопреки им. Такая асимметрия природных и антропогенных систем отрицательна для территорий: заболачивание, засоление, силитизация, эрозия. Необходимо их симметричное сопряжение, погружение антропогенных систем в природные.

4. Метод пластики даже на совершенно ровных территориях позволяет картографически выделить систему бассейнов стока, которые внешне напоминают горные долины. В их пределах четко прослеживаются области формирования, транзита и аккумуляции солевого, водного и твердого органо-минерального стока. На картах показано геохимическое сопряжение дивергентных и конвергентных территорий. с первых (повышений) сток расходится по склонам по транзитным каналам, во вторые (понижения) эти потоки сходятся, переувлажня и засоля почвы. Области дивергенции (система повышений) – автономные, легко рассоляющиеся территории, области конвергенции (система понижений) – подчиненные, легко засоляющиеся территории, естественные солеприемники. На традиционных тематических картах эти области не выделяются, они показываются одним выделом, а буквенными или цифровыми индексами иногда указывается частота встречаемости почв и ландшафтов повышенний и понижений. Если по аэрокосмоснимкам отрисовать пашни по областям дивергенции и конвергенции, то можно увидеть их приуроченность к рассоляющим или засоляющим территориям и даже указать степень того или другого процесса: нижние, средние, верхние части склонов, их крутизна, экспозиция, степень изрезанности каналами стока разной глубины и т.п. Орошение полей сохраняет геохимическую направленность засоления или рассоления по понижениям и повышениям, но значительно убывает процессы.

5. Метод пластики позволяет находить черты сходств и различий рельефа, почв и наносов не только суши, но и дна морей, озер. Так, узор рельефа современных пустынь оказался подобен узору рельефа дна Арала. После частичного высыхания его дно представит в виде лопастей конусов выноса (преимущественно Сырдарьи); если зайдут около 30% понижений, где создадут плотную корку, трудно поддающуюся дефляции. Имеются данные, показывающие, что с акватории морей вместе с брызгами, подхватываемыми ветром, в атмосферу уносится больше солей, чем с пылью солончаков суши. Об этом свидетельствует и тот факт, что за последние 20 лет солевой состав снегов и льдов гор Средней Азии и Кавказа остался неизменным, несмотря на быстрое усыхание Арала и якобы усиливающийся вынос солей с обсохших его берегов.

5. Метод пластики обнаруживает соответствие между характером узора рельефа на картах пластики и подвижностью территорий, их способностью перераспределять постоянно водные и солевые ресурсы /Орлов, Соколов, 1989/. Периодически возникающие на Земле едва заметные поднятия и опускания суши и моря только за исто-

рическое время произвели коренную перестройку гидрографической сети. Так, дельта Сырдарьи, по нашим данным, видимо, больше соответствует дельте р. Чу, которая в недавнем прошлом была более полноводной за счет включения бассейна оз. Иссык-Куль. Опускание дна Иссык-куля привело к его отчленению от бассейна р. Чу, резко уменьшило водный сток этой реки, что заставило население забросить обширнейшие орошаемые массивы в между-речье Сырдарьи и Амударьи. Площадь Арала резко сократилась, его пресные воды стали минерализованными, прекратился сток по руслу Узбоя из Арала в Каспийское море. Сама Сырдарья до не-давнего геологического прошлого (в голоцене) имела сток через Арнасайское понижение в сторону среднего течения Амударьи.

Возможны колебания дна Аральского озера, которые, как и для Каспия, могут давать непредсказуемые, не связанные ни с климатом, ни с хозяйственной деятельностью человека, колебания уровней воды. К сожалению, миграции воды и солей, связанные с колебаниями земной поверхности, слабо изучены, а потому не учитываются при мелиоративном проектировании.

6. Метод пластики выявляет почвенные узоры, которые свидетельствуют о стадиальности их эволюции, связанной с изменениями климата. Только в течение верхнего плейстоцена-голоцена зафиксировано несколько почвенно-геоморфологических генераций, обусловленных увлажнением территорий за счет повышенного количества атмосферных осадков в регионе /Степанов, Абдуназаров, 1977; и др./. Заметное сокращение размеров конусов выноса свидетельствует о резкой аридизации климата региона за последние тысячелетия, а уменьшение от древнего к современному времени мощности древних погребенных почв и увеличение в них солей и следов денудации подтверждают мнение, что аридизация усиливается и в последние столетия. Мощные и частые климатические изменения – характерная черта Аральского региона, однако неизвестны их направленность и глубина изменений в будущем. Большинство склоняется к мысли о дальнейшем усилении аридизации в ближайшие 100 лет. Если такой прогноз осуществится, то население региона окажется на грани экологической катастрофы, так как произойдет замена одного, современного, природного пояса другим, более аридным и губительным для населения.

7. Топографический метод вторых производных в сочетании с аэрометодами позволил выявить законы, раскрывающие роль человека в эволюции природы. На карту пластики наносились по аэрокосмоснимкам разных лет орошаемые пашни. Выяснилось, что вначале они занимали территории, благоприятные в мелиоративном отношении, – верхние части конусов выноса. Позже, по мере роста площадей пашен, стали осваиваться неблагоприятные в мелиоративном отношении пространства: засоленные, солонцеватые, каменисто-галечниковые почвы, болота, почвы межконусных понижений. До 1970-х годов орошаемые массивы располагались "островами" по мезоповы-

шениям; геохимические процессы ограничивались ими и прилегающими к ним понижениями, куда сбрасывались вместе с возвратными водами огромные массы солей. Но эти соли оставались на месте или мигрировали недалеко от мест аккумуляции. Такому природному мелиоративному состоянию, характеризующемуся статикой геохимических процессов, соответствовали и методы полевых изысканий, проектирования и строительства, которые были статическими. Отсюда традиционное картографирование почв, подземных вод и наносов с их "лоскутным" статичным изображением территории и происходящих на них замкнутых процессов; отсюда и математическая статистическая обработка получаемых данных, сводящая все к средневзвешенному состоянию, а затем редуцирующая разнобразие процессов к точке, к одному значению.

8. Новые карты позволяют по ним делать прогнозы изменений среды, призывают к замене прежних статистических методов исследований новыми динамическими.

Расширение орошаемых площадей привело к слиянию "островов" и образованию обширных массивов, в которых геохимические процессы оказались столь активными, что стали выходить далеко за их пределы, достигая центральных районов пустынь. Этому способствовали поверхностные и грунтовые воды, которые растворили огромные массы солей и увлекли их за собой не только в глубинные толщи земной коры, но и далеко по простиранию, оживляя древние русла и озерные впадины. Возникла угроза появления новых озер, подобных Саракамышу и даже Аралу, в местах, представляющих угрозу памятникам древней цивилизации и ценнейшим кормовым угодьям. Бывшие статические процессы стали динамическими с широкимхватом территорий. Однако методы изысканий, проектирования и строительство остались прежними, ориентированными на статику и на локальные объекты. Недавно возникшая крупнейшая в мире солевая миграция на территории региона продолжает фиксироваться прежними статическими методами, что искажает действительность, дает недостоверные сведения о характере и масштабах галогеохимических процессов. Тончайшие динамические процессы солепроявления должны фиксироваться тонкими изыскательскими методами, основанными на изучении динамики процессов; к ним должны приспособиться проектировщики и строители, которым также следует изменить статическое мировоззрение на динамическое, масштабное, системное. Изыскания предложено проводить методом пластики, который выявляет динамику галогеохимических процессов. В таком случае строительство дрен должно вестись с учетом особенностей рельефа древней гидрографической сети, которая на равнинах едва проглядывается. Для выявления последней и использования в проектировании нами составлена методика рисовки потоковых структур по топососновам (метод пластики); разработан бассейновый ландшафтно-геохимический анализ мелиорируемых территорий /Степанов, Чембарисов, 1978/, на основе которого даны расчеты по

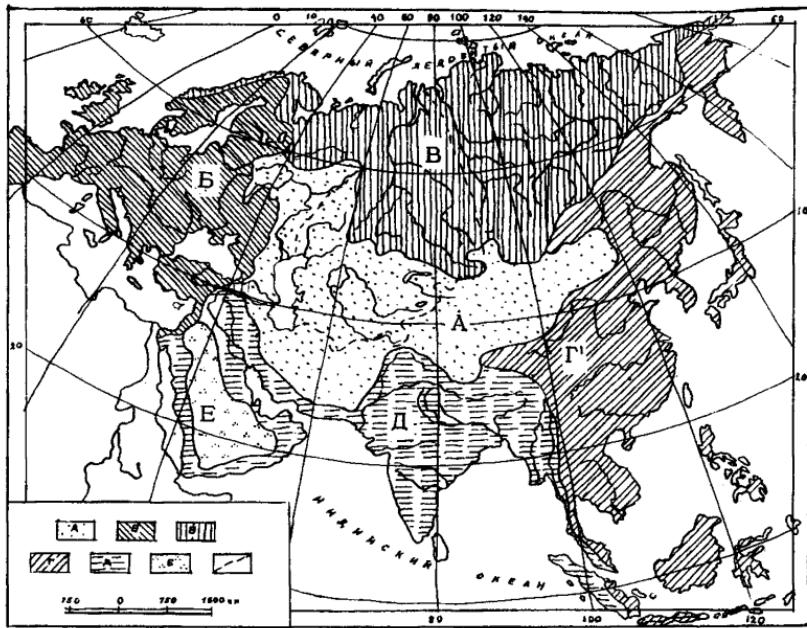


Рис. 1. Районирование Евразии по бассейнам водно-солевого стока: А - Арало-Каспийский, внутренний, бессточный; Б - Атлантический, сточный; В - Арктический, сточный; Г - Тихоокеанский, сточный; Д - Индоокеанский, сточный; Е - Аравийский, внутренний, бессточный

мелиоративной гидрохимии /Горев, Пелешенко, 1984/; создана теория почвенных прогнозов на базе концепции натурного подобия /Степанов, 1979/.

Бассейновое галогеохимическое районирование

Территория Евразии, куда входит Аральский регион, состоит из нескольких бассейнов стока (рис. 1). Большинство (Б-Д) имеет открытый сток в океан и лишь Арало-Каспийский бассейн (А) бессточен. Поэтому все соли, собираемые с его обширной территории, аккумулируются в малых и больших замкнутых понижениях, накапливая здесь километровые толщи солевых масс разного химического состава. Одно из таких понижений - Арал. По характеру его донных осадков установлено, что за последние 10000 лет (голоцен) море 10 раз пополнялось водами и иногда высыхало за счет естественных процессов (изменения климата, поднятия и опускания дна озера). Современное обмеление озера также связано с

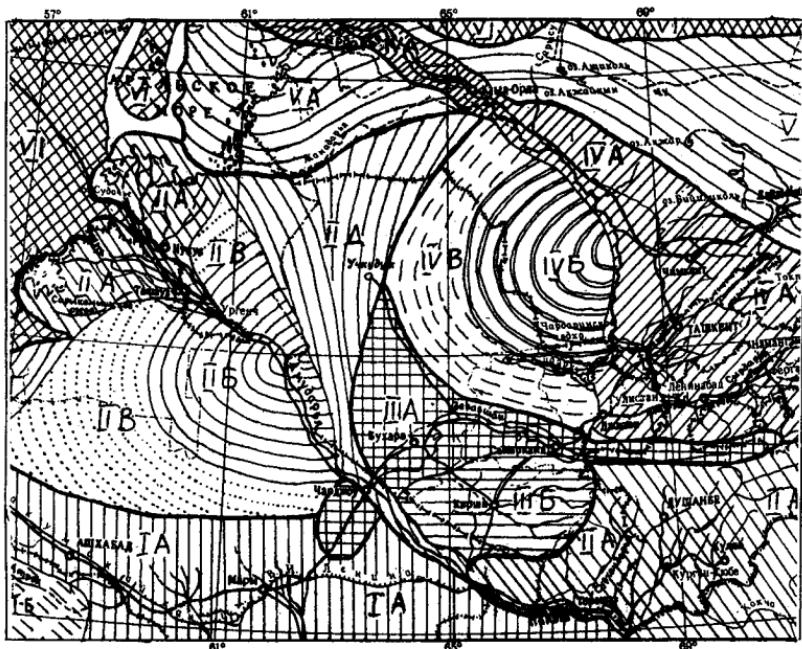


Рис. 2. Районирование Аральского региона по бассейнам водно-солевого стока. М 1:10 млн. Римскими цифрами обозначены районы, буквами - подрайоны. I. Прикаспийский: А - Теджен-Мургабский, бессточный, Б - Кызыларатрекский, сточный; II. Амударинский: А - современный, сточный, Б - палеоген-неогеновый, бессточный; В, Д - нижне-среднеплейстоценовый, бессточный; Г - верхнеплейстоцен-голоценовый, бессточный; III. Кашкадарья-Зеравшанский: А - Зеравшанский, верхнеплейстоценовый, сточный; Б - Кашдаринский, голоценовый, бессточный; IV. Сырдаринский: А - современный, сточный; Б - неоген-плиоценовый, бессточный; V. Чу-Таласский: А - верхнеплейстоцен-голоценовый, бессточный; VI. Плато Устюрт-Мангышлак-Бетпакдала, бессточное

усилением аридизации и динамикой земной поверхности, но оно ускорено хозяйственной деятельностью человека. За последние 40 лет в регионе построено более 90 водохранилищ с общим объемом воды при полном их заполнении в 70 км^3 . Только в Узбекистане за 1970-1986 гг. площадь орошения возросла в 1,5 раза, почти вдвое возросло безвозвратное водопотребление.

Ориентация бассейнов к странам света значима в получении и перераспределении солнечной энергии и атмосферных осадков. Аридность Арало-Каспийского региона обусловлена тем, что он обращен к югу, его южной экспозицией, а гумидность Сибирского региона – ориентацией его склонов к северу, северной экспозицией. Север и юг – две взаимно дополняющие противоположности и это надо использовать при регулировании природных ресурсов, особенно водных. Экономические и экологические проблемы сухого юга (с тенденцией современной ускоренной аридизации) не могут быть решены за счет его внутренних резервов; это межнациональная проблема в основе которой лежит взаимовыгодная помощь: главное богатство России – колоссальные запасы пресной воды могут быть частично перераспределены на юг. Избыточное увлажнение сибирских почв мешает сельскохозяйственному освоению территорий.

На территории Аральского региона составлена "Галогеохимическая карта" (Институт почвоведения и фотосинтеза АН СССР, 1989 г. М 1:1,5 млн., отв. ред. И.Н.Степанов, рукопись). На ее основе выделены галогеохимические бассейны стока (рис. 2): I – Каспийского моря, II – Амударья, III – Кашкадарья и Зеравшана, которые имеют некоторую самостоятельность, хотя в разные геологические эпохи их гидрографическая сеть примыкала то к Амударье, то к Сырдарье, IV – Сырдарьи, V – Чу-Таласа, VI – Плато Устюрт-Мангышлак-Бетпакдала.

Бассейн Каспийского моря. Пустынная песчано-такырная равнина Низменных Каракумов сформирована за счет стока рек Копетдага и Сафедкох. Водно-солевой режим территории связан с недавним прошлым Теджена и Мургаба; активизация последних за счет вод Каракумского канала приводит к реконструкции на обширных прикопетдагских равнинах локальных заболоченностей, подъему грунтовых вод. Имеются основания полагать, что в ближайшие 10–20 лет равнинная часть района 1А (рис. 2) превратится в озерно-солончаковую территорию, непригодную для каракулеводства. В связи со своевременной реализацией проекта межбассейнового перераспределения стока (из бассейна Арала в бассейн Каспия) район оказался наиболее обеспеченным водными ресурсами. Сочетание этого фактора с субтропическим климатом может способствовать эффективному производству продуктов питания.

Бассейн Амударьи. Орошением занимаются в горах таджики, в среднем течении узбеки и туркмены, в нижнем каракалпаки. На значительный объем воды по праву претендуют афганцы. Туркмены забрали свою долю амударьинской воды для орошения плодородных земель Мургабского и Тедженского оазисов и лессовых сероземных почв подгорных равнин Копетдага. Орошение почв юга Туркменистана более целесообразно, чем орошение почв современной дельты Амударьи. Последние весьма неблагоприятны для орошения по водно-физическим свойствам, а также из-за сильного загрязнения ядови-

тыми веществами. По мелиоративным и экологическим соображениям их следует целиком исключить из с.-х. освоения (ниже г. Нукуса), а жителям выделить земли на юго-западе Туркменистана в районе берега Каспийского моря и Каракумского канала. В свое время (в начале XIX в.) каракалпаки были переселены из дельты Сырдарьи в дельту Амударьи. Современное проживание каракалпаков на бывшем дне Аральского моря, где веками аккумулировались всевозможные, в том числе и вредные для здоровья вещества, недопустимо. Оздоровить обстановку притоком пресной воды невозможно в течение ближайших десятилетий. Каракалпаки имеют юридическое право на экономическую помощь со стороны Таджикистана, Узбекистана, Туркменистана, которые привели амударинские воды в непригодное для использования состояние.

Литература неверно освещает проблему фильтрации воды из Каракумского канала, приписывая ей колоссальные потери – до 40–60%. В качестве примера приводят головную часть канала. Галогеохимический анализ показал, что повышенное увлажнение прикаспийских территорий связано не с фильтрацией, а с выклиниванием вдоль этой части канала пресных возвратных вод североафганских оазисов. Заметим, что афганские крестьяне не применяют ядохимикатов, а потому чистые возвратные воды Северного Афганистана могут быть повторно использованы на орошение в пределах Туркменистана.

Бассейны Зеравшана-Кашкадарья имеют обширную разновозрастную сеть конусов выноса. Современные образования занимают лишь небольшую их часть, приуроченную к верхним и средним поясам, наиболее благополучным в галогеохимическом отношении. Возвратные воды с орошаемых массивов проникают вглубь пустынь, вызывая обширное сульфатно-хлоридно-натриевое засоление почв.

Бассейн Сырдарьи имеет небольшую по площади современную дельту. То, что считалось дельтой Сырдарьи, видимо, является дельтой рек Чу и Талас. В историческом прошлом здесь орошалось до 10 млн. га пашен. Однако в результате гидрографической перестройки, связанной преимущественно с колебаниями земной поверхности, р. Чу иссякла, что привело к гибели цветущие оазисы и к резкому падению уровня Аракса. Жившие здесь каракалпаки в начале XIX в. вынуждены были переселиться в низовья Амударьи. Но и здесь, спустя примерно 200 лет, их постигла экологическая неудача, но уже осложненная деятельностью человека. Такова судьба приморских народов: они или борются с наводнением, сооружая дамбы, или следуют за отступающими водами, спешно осваивая освободившиеся из-под воды земли, пока они не потеряли плодородие, или покидают родные места временно или навсегда. В настоящем случае для освоения прибрежных земель необходимо очень много пресной воды, которая может быть получена только за счет части стока сибирских рек – другого альтернативного варианта источника воды нет. Предлагаемые планы массированного изъятия грунтовых и подземных вод, а также

Общие сведения о галогеохимических барьерах Аральского
М 1:1,5 млн.

Иерархия барьёров	Барьер выделяется на карте линией, которая разделяет	Морфологическая выраженность барьера на местности, по которой он распознается	Генезис барьёров, приводящий к обособлению геохимических потоков бассейнов
I	Бассейн Каспийского моря и бассейн Аральского моря	Контактное сопряжение бассейнов стока по характеру лито-динамических потоков	Геолого-тектонический, приведший к разобщению бассейнов
II	Бассейны поверхности и подземного стоков по видимым подземным водо-разделам	Водоразделы, представляемые в горах хребтами, на равнине перегибами склонов. Подземные бассейны имеют древний погребенный рельеф	Геолого-геоморфологический, бассейновый осложненный климатическими и гидро-геологическими факторами
III	Совокупность бассейнов горных территорий и бассейнов равнинных территорий	Линия (полоса), отделяющая сильно фрагментированные дendirации горы от плоских аккумулятивных форм равнин	Литолого-геоморфологический, выделяющий сотно-поясной, денудационно-аккумулятивный
IV	Один галогеохимический поток от другого соседнего	Один конус выноса (дельта) или бассейн отделяется от другого по депрессии (хребту)	Литолого-фашиальный, связанный с ориентацией потоков
V	Лопасти потоков	Повышения и понижения	Литологический
VI	Правобережье и левобережье	Русла рек, балки, овраги	Денудационный

Т а б л и ц а 1

региона, отображенных на "Галогеохимической карте"

Галогеохимическая роль барьеров

Развитие в плиоцене в бассейне Каспия дельтовых залегающих толщ, перемещающихся с плотными известняками, песчаниками, глинами. Развитие в плейстоцене мощных конусов выноса, аллювиально-пролювиальных, а позже песков, незасоленных

Пестрый литологический состав расчлененных горных водоразделов-барьеров: базальтовых, гранитных, известковистых, песчаниковых, сланцевых – создает геохимическое разнообразие с выносом Ca и SO_4 . Однородность лессовых толщ плоских водоразделов приводит к выносу Na и Cl, а из древних погребенных почв Mg

В горах обилие воды образует слабоконцентрированные солевые $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$ растворы, при переходе на равнины эти воды приобретают состав: $\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$ с образованием солончаков по бывшим речным руслам и озерным впадинам. Горы и прилегающие к ним равнины – геохимически сопряженные геосистемы

Каждый горный бассейн, конус выноса, дельта рассматриваются как геохимически самостоятельное природное тело со своими законами пространственно-временного перераспределения солей. Они – элементарные геохимические целостности

Места активной естественной аккумуляции солей состава $\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$, иногда Mg

Места естественного активного транзита воды, солей и твердых органо-минеральных частиц, переход от автономных геохимических ландшафтов к подчиненным

	1	2	3	4
VII	Верхние древние террасовые уровни от более молодых средних и нижних вплоть до надпойменной террасы и поймы	Террасы неоген-нижнеплейстоценовые	Озерно-аллювиальный, влажный, теплый климат	
VIII		Террасы среднеплейстоценовые	Аллювиальный с участием озер, влажно	
IX		Террасы среднеплейстоценголоценовые	Аллювиально-эоловый, аридный климат	
X	Одну гидротехническую систему от другой по оросителям, коллекторам, дренам, или багарных пашен, валикам, чекам, лесным полосам	Геометрически правильные полигоны (клетки) полей орошаемых массивов	Антropогенный. Деятельность человека может совпадать или не совпадать с барьераами (естественными)	

Правда, в некоторых случаях встречаются поля и в понижениях: но судя по полигональной структуре это результат освоения последних десятилетий, когда мелиораторы перестали считаться с пластикой рельефа. Понижения, как правило, занимают 40–60% площади орошаемого массива. Это и обусловило оптимальный коэффициент полезного действия (КПД) сельскохозяйственного освоения земель, который равен 0,4–0,6. Увеличение площади пашен выше КПД 0,6 не рекомендуется, так как при этом в с.-х. оборот вовлекаются солончаковые понижения. Тогда человек выходит за экологические рамки, обозначенные самой природой, нарушает установленное ею равновесие и его пределы.

Структура пашен внутри повышений мезорельефа (по литодинамическим потокам) также отличается своеобразием. Как видно из рис. 5, пашни образуют концентрические ряды, следующие ярусами один над другим (Тахта, Калинин, Ташауз). Своим положением они фиксируют линии равной крутизны (уклонов) местности, которой строго следовали древние земледельцы; при этом равномерное распределение воды по площади поля препятствует эрозии и способствует быстрому промыванию почв от солей. Концентрическая структура пашен – показатель высокой земледельческой культуры Средней Азии в далеком и близком прошлом. После присоединения Туркестана к России русские специалисты впервые близко ознакомились со

Территории преимущественно незасоленные ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$), или с карбонатно-гипсовым соленакоплением озерного происхождения, много крупных конкреций глинистых

Территории слабо- и среднезасоленные с сульфатно-натриевым, реже хлоридным засолением, преимущественно лесовые с погребенными почвами и конкрециями

Территории сильнозасоленные, состав $\text{SO}_4\text{-Cl-Na-Mg}$, песчаные пустыни незасоленные

Пашни выполняют роль барьеров, способствующих выносу солей из пашен повышений в пашни понижений с оросительными и промывными водами. По коллекторам соли выносятся за пределы оазисов в пустыни, где образуют на больших площадях мощные аккумуляции состава $\text{SO}_4\text{-Cl-Na-Ca}$, на севере региона – с участием соды.

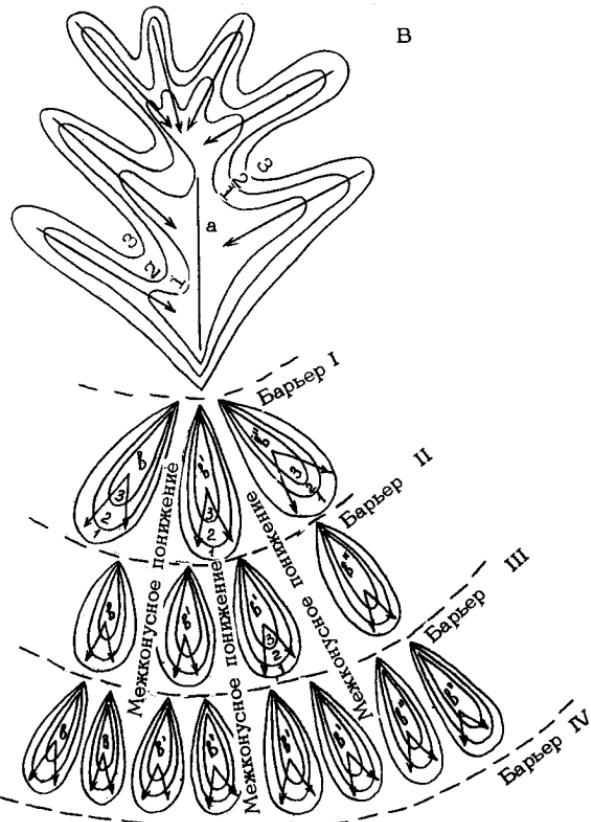
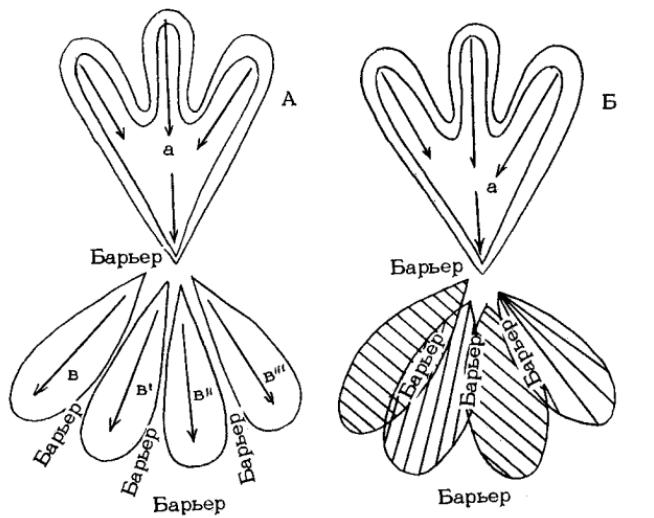
среднеазиатскими мелиоративными системами. Они пришли к выводу о нецелесообразности вводить какие-либо новшества в сложившуюся веками практику использования орошаемых земель. Тем не менее, как видно из рис. 6, при освоении целинных земель Голодной степи Узбекистана современные мелиораторы полностью игнорировали древний опыт: они построили геометрически правильную систему, которая не вписывается в естественную структуру рельефа (а следует вопреки ей). Неровности рельефа, оправдываются наши мелиораторы, уничтожены, выровнены капитальными планировками, а потому не было надобности располагать пашни по линиям равной крутизны и кривизны. Однако с их мнением нельзя согласиться, так как мезорельеф с перепадами высот в 1–2 м на плоских равнинах нельзя выровнять никакими антропогенными преобразованиями. Даже после очень крупных планировок под толщей наносов рельеф сохраняет свою первоначальную структуру, которая определяет свойства галогеохимических потоков. Непонимание этого явления привело к возникновению обширного вторичного засоления на новоорошаемых землях Голодной степи.

Обоснование изъятия из с.-х. использования части орошаемых пашен. С галогеохимических позиций нецелесообразно в условиях дефицита поливной воды продолжать орошение пашен, расположенных в контактных мезонижениях и по периферии конусов выноса и дельт. Рас-

четы показали, что сокращение норм воды для полива и промывок почв от солей приведут к еще более отрицательным экологическим последствиям, чем межбассейновая переброска. Галогеохимические барьеры – это видимые и невидимые геоморфологические, геологические, гидрогеологические, тектонические, почвенные, геоботанические, инженерные и другие объекты, которые образуют динамические контакты на поверхности (террасы, уступы, обрывы, повышения, понижения, цепи солончаков, озер и т.п.) или в толще земли (разломы, литологическая или водная смена толщ, слоистость горных пород, каналы, коллекторы, шахтные выработки и т.п.). Количество видов барьеров не ограничивается данными табл. 1, а их геохимическая роль может быть противоположной в зависимости от знака движения земной поверхности, состава горных пород и почв, характера хозяйственной деятельности. На "Галогеохимической карте Аральского региона" (М 1:1,5 млн., 1989, ИПФС АН СССР, рукопись) барьеры показаны особыми знаками. Однако выявление их роли в природно-мелиоративных процессах требует научного анализа (рис. 3). Примером служат гидромелиоративные системы, включающие помимо оросителей, дрен и коллекторов структурный узор пашен. Их размеры, формы и расположение по элементам рельефа определяют качество геохимических барьеров. По этому признаку выделено несколько типов структур орошаемых пашен, отрисованных по аэрокосмическим снимкам (рис. 4). Анализ осуществлялся по галогеохимическим картам М 1:500000. Как видно, орошаемые массивы располагаются по конусам выносов ("сухим дельтам"), которые составляют значительную часть площади современных пустынь региона. Орошаемые массивы могут занимать современные и древние конуса выносов, их верхние, средние и нижние части, повышения или понижения рельефа, или то и другое одновременно; они могут быть крупными по размерам или мелкими, вписываться в рельеф по его естественным перегибам или игнорировать структурные особенности рельефа и т.д. Все это оказывается на галогеохимической обстановке орошаемых массивов: или способствует их нормальному функционированию или приводит к деградации и гибели.

Анализ расположения мелиоративных систем по элементам рельефа

Наложив структурные узоры орошаемых пашен (рис. 4) на карту пластики, можно проследить характер их связи с рельефом такого массива древнего орошения, как низовья Амударьи (рис. 5). Здесь пашни строго приурочены к повышениям (зачернено), а понижения в значительной степени свободны от них. Местные жители, имея многовековой опыт орошения, усвоили, что повышения и понижения геохимически сопряжены: с повышениями соли выносятся, а в понижениях они накапливаются. Поэтому неразумно тратить энергию и время на освоение понижений – естественных солеприемников.



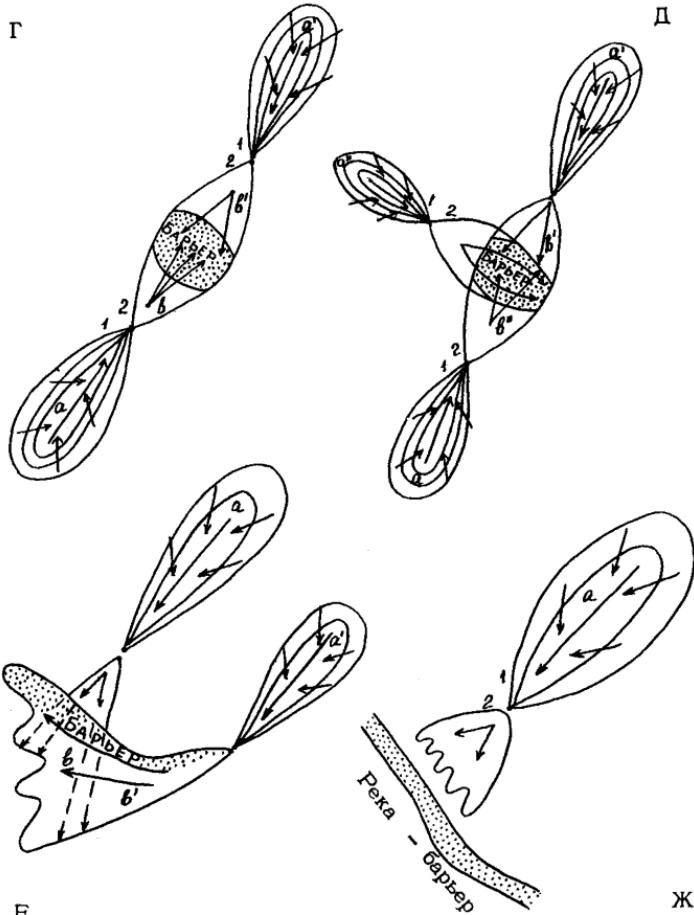


Рис. 3. Схематические изображения некоторых видов геохимических барьеров. а, а' - горные бассейны; в, в^I, в^{II}, в^{III} - подгорные конусы выноса; стрелки - направление стока; А - простые барьеры с разделенными лопастями; Б - сложные барьеры с наложеннымными лопастями; В - многоярусный конус выноса со сложной структурой барьеров: I-II - верхних, II-III - средних, III-IV - нижних уровней; лопасти (в) имеют несколько ярусов террас (1, 2, 3...); Г - сочетание встречных лопастей (конусов выноса); Д - сочетание трех конусов выноса, спускающихся с трех различно ориентированных хребтов; Е - боковое перекрытие одного конуса выноса (в) другим (в'); Ж - подрезка конусов выноса рекой. Все эти виды барьеров показаны на "Галогеохимической карте Аральского региона" (М 1:1,5 млн., 1989 г.)



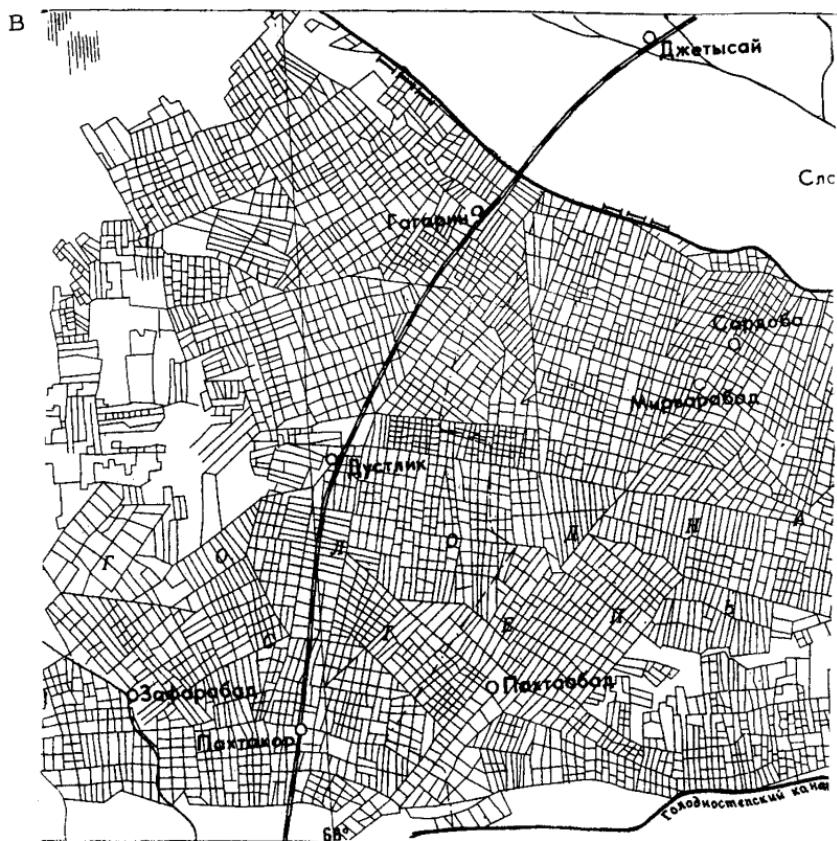


Рис. 4. Типы структурных узоров орошаемых массивов, определяемые характером взаиморасположения элементарных пространственно-геометрических единиц – пашен и создающие неодинаковые специфические геохимические барьера: А – естественно вписанный древовидно-спиральный узор пашен; структура пашен целиком погружена в естественную структуру рельефа и тесно сопряжена с ней функционально; симметрия узора пашен трансляционная, спиральная, местами на землях нового освоения – полигональная (Каршинская степь); Б – естественно вписанный концентрический узор пашен местами хаотический, бесструктурный, симметрия узоров пашен радиальная (Бухарский оазис), В – неестественный, искусственный, геометрически правильный, полигональный узор пашен, не связанный с естественной структурой рельефа, симметрия плоской кристаллографической решетки: прямоугольная, квадратная, ромбическая, местами (на старых землях) концентрическая (Голодная степь)



Рис. 5. Структурный узор орошаемых площадей низовьев Аму-дарьи, полученный в результате дешифрирования аэрокосмоснимков и совмещенный с повышениями (затемнено) и понижениями "Галогеохимической карты низовьев Амударьи" М 1:500000

что в каждом оазисе подвергается постоянному естественному засолению 10–30% таких пашен. Никакие мелиорации не могут сделать их плодородными, так как они лежат в зонах отрицательных геохимических барьеров с постоянным и мощным привносом солей, а также ядохимикатов. Если даже и удастся рассолить земли понижений, то это недолго, засоление почв быстро восстанавливается; затраты на мелиорацию не оправдывают-ся. В целях улучшения экологической обстановки в регионе можно рекомендовать поэтапный вывод из с.-х. использования земель, склонных к быстрому восстановлению засоления. В течение 1991–1993 гг. изымается 5–10% таких земель, а в 1994–1998 гг. 10–20% от площади оазиса (табл. 2). Таким образом, на первом этапе можно изъять в бассейне Амударьи 460 тыс. га или 8,6% от общей площади орошаемых земель (5305,6 тыс. га), а в бассейне Сырдарьи 230 тыс. га или 5,5% от общей орошающей пло-щади 4136,9 тыс. га; на втором этапе (1994–1998 гг.) в бас-сейне Амударьи выборочно, преимущественно по засоляющимся ме-зопонижениям, извлекаются из орошения 940 тыс. га, или 17,7% от первоначальной общей площади 5305,6 тыс. га, а в бас-сейне Сырдарьи 630 тыс. га, или 15,2%. Изъятию земель должны пред-шествовать более детальные обследования оазисов, а также широ-кое обсуждение предложения в печати, учитывающее и обществен-ное мнение. Ведь дело касается коренного преобразования структу-ры орошаемых земель региона: на первом этапе в течение 1991–1993 гг. должно быть изъято 690 тыс. га пашен, преимущественно занятых хлопчатником, а в 1994–1998 гг. дополнительно 1 млн. 570 тыс. га пашен. Всего к 2000 г. в Аральском регионе, по нашему предложению, должно быть сокращено более 2 млн. га ороша-емых площадей или около 20% от современной орошающей пло-щади. Тем-пы сокращения должны составить 200 тыс. га в год. Только в таком случае может произойти некоторое улучшение экологической обстанов-ки в Аральском регионе. Галогеохимическая среда при этом сохра-нится напряженной, так как начавшие миграцию соли продолжат ее, образуя в местах контактных депрессий мощные солевые аккумуля-ции, которые могут затронуть гражданские и промышленные объек-ты, исторические памятники. Необходимо организовать постоянную службу наблюдений за миграционными галогеохимическими потока-ми в пределах активной зоны Аральского региона.



Рис. 6. Структурный узор орошаемых площадей Голодной степи Узбекистана, полученный в результате дешифрирования аэрокосмоснимков и совмещенный с повышениями (затемнено) и понижениями "Галогеохимической карты Голодной степи" М 1:500000

Таблица 2

Площади орошаемых земель, которые предлагается изъять по мезопонижениям рельефа из дальнейшего использования в целях улучшения экологической обстановки в бассейне Аральского региона

№ районов	Водохозяйственные районы	Общая орошаемая площадь, тыс. га.	Вывод площадей из орошаемого земледелия, тыс./га/% от площади бассейна	
			1991-1993 (5-10%)	1994-1998 (10-20%)
I.	Пянджский	134,3	5,0	10,0
	Вахшский	273,0	10,0	20,0
	Кафирниганская	152,0	5,0	10,0
	Сурхандарьинский	392,7	30,0	50,0
II.	Кашкадарьинский	514,1	20,0	50,0
III.	Каршинский			
IV.	Бухарский	314,7	30,0	60,0
V.	Туркменский прибрежный	356,3	35,0	90,0
VI.	Заравшанский	667,3	35,0	70,0
VII.	Низовья Амуудары	1151,0	150,0	300,0
VIII.	Каракумский	1350,2	140,0	280,0
Итого в бассейне Амуудары:		5305,6	460/8,6	940/17,7
I (1)	Верховья р. Нарын	216,9	5,0	10,0
(2)	Ферганский	1711,9	90,0	200,0
II (2)	Чакир	579,7	20,0	100,0
III (3)	Среднее течение Сырдарьи	853,1	40,0	160,0
IV (4)	Арысь-Туркестанский (Артур)	217,0	20,0	40,0
V (5)	Низовья Сырдарьи	558,3	55,0	120,0
Итого в бассейне Сырдарьи:		4136,9	230/5,5	630/15,2
Всего:		9442,5	690/7	1570/16

Оценка и программа перспектив использования орошаемых земель

Оценка будет зависеть от общественно-политических и социально-экономических сил, которые неизвестно как проявят себя в ближайшие годы. Чтобы быть независимыми от предстоящих событий, мелиораторам следует выработать свои политические и экономические убеждения, согласно которым они будут проводить дальнейшие изыскания, проектирование и строительство. Для этого создается программный документ, в котором прежде всего признаются главные ошибки прежней травматической эпохи в мелиорации (последние 30 лет), выявляются их истоки. Так, необходимо признать, что экономический спад в Аральском регионе связан не с быстрым ростом населения, а с безответственным расточительством природных ресурсов, возникшим на базе полной зависимости специалистов от власти. Программа независимой партии мелиораторов строится после всеобщего научного обсуждения, а затем и выбора главной политической цели. Или общество приспособливается к среде подобно животному, следуя лозунгу: "Назад к природе!", или же оно преобразует природу, приспособливая ее себе умело, со знанием дела. Нам ближе второй путь – преобразование природы, но не варварское, а милосердное, гуманное, использующее принцип полного погружения (вписывания) инженерных мелиоративных систем, их структур и функций в соответствующие структуры и функции природных объектов. Это, например, означает отказ от строительства геометрически правильных мелиоративных систем, следящих часто вопреки рельефу и галогеохимическим потокам, переход к древовидным мелиоративным системам, оросительная и дренажная сеть которых повторяет естественные формы рельефа, вписывается в них, усиливая тем самым отток солей при меньших энергетических затратах и образуя экологически чистые орошаемые массивы.

После этого следует обсудить проблему выбора отношений к мелиоративному преобразованию природы: оно может быть либеральным, основанным на частичных ее изменениях, или радикальным, приводящим к крупным, коренным изменениям среды. При этом, конечно, необходимо провести большие научные исследования по прогнозам возможных колебаний климата, локальных движений земной поверхности, трансформации почв и растительности, динамики уровней морей и озер, расходов воды в реках, подземных водоносных толщах. Следует признать, что знания по этим вопросам ничтожны, противоречивы и недостоверны. Прогнозы не только по региону, но и по стране практически отсутствуют. Особенную тревогу вызывает слабая разработка прогнозов миграции галогеохимических потоков, их природы, свойств, мощности, направлений. Разбушевавшиеся за последние годы галогеохимические потоки должны стать предметом особого изучения, так как именно они определят природно-мелиоративную обстановку в регионе и все гидротехничес-

кие мероприятия будут направлены на управление ими. Переход солевых масс Аральского региона из статического состояния в динамическое требует незамедлительного применения новой, динамической методологии изысканий, проектирования и строительства в мелиоративной науке и практике.

ВЫВОДЫ

1. Плановое развитие сельского хозяйства региона привело в последние годы к резкому увеличению орошаемых площадей. Для обеспечения их водой завершен поворот рек Амударья и Сырдарья из бассейна Арала через пустыни в бассейн Каспия. В результате Арал стал высыхать, а пустыни обводняться, что активизировало в регионе галогеохимические процессы, отрицательное влияние которых на окружающую среду более опасно, чем обмеление Арала.

2. Экологический кризис возник не из-за бесхозяйственности мелиораторов, как это сейчас представляют, а по причине низкого уровня научных разработок 1950–60-х годов, когда, ратуя за развитие орошения, ученые не смогли предсказать его негативные последствия. Минводхоз лишь реализовывал идеи ученых, финансируемые правительством.

3. Неподготовленность науки в решении крупных водохозяйственных проблем сказалась в отсутствии альтернативных концепций развития орошения на перспективу, их ответственной экспертизы. Множество наук о Земле оказалось мнимым. Лишь благодаря коллективным разработкам в 1971–1984 гг. схемы межбассейнового перераспределения стока рек выявлена слабая подготовка ученых и инженеров в решении количественных прогнозов. Этому способствовало отсутствие специальных карт, составляемых на количественной основе с учетом динамических процессов. Предложения по их разработке не были тогда приняты научной общественностью, что отрицательно сказалось на качестве всех проектов. Только сейчас эти картографические методы стали признаваться (см. статьи И.Н.Степанова и др., П.А.Шарого и др. в данном сборнике).

4. Анализ региона по галогеохимическим картам позволяет сделать следующие предложения по оптимизации экологической среды:

- для ослабления и стабилизации геохимического стока изъять из орошения в ближайшие годы за счет исключения замкнутых понижений около 1,5 млн.га (примерно 15% от всей орошаемой площади региона) (рис. 7, табл. 2);

- считать концевые части низовьев Амударья естественными вечными приемниками загрязнителей, поступающих сюда со всего бассейна реки, а потому признать их непригодными для проживания человека. Целесообразно переселить часть населения низовьев (200–300 тыс. человек) на юго-восточное побережье Каспийского моря, обеспечив его пресными водами Каракумского канала;

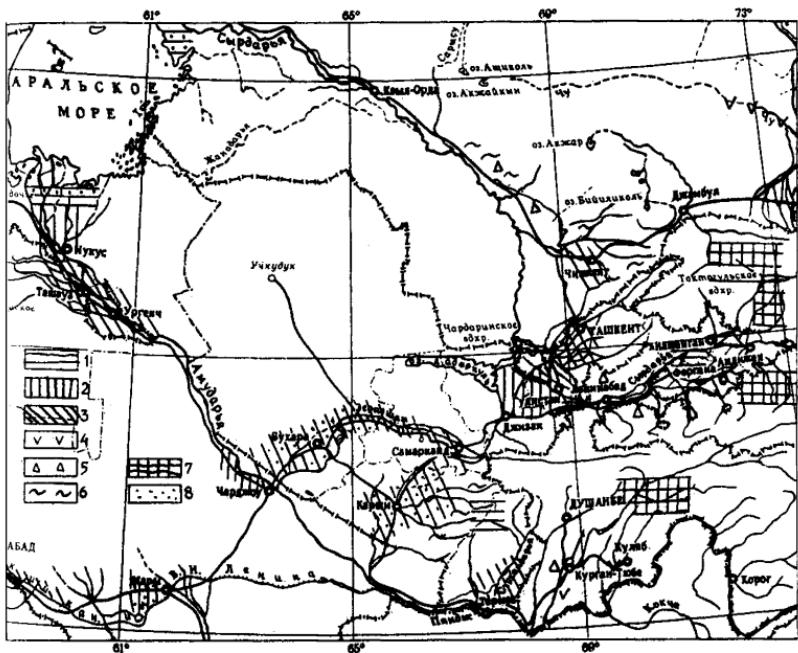


Рис. 7. Схема изъятия орошаемых земель из сельскохозяйственного освоения: 1 – полное изъятие (100%) трудномелиорируемых засоленных и заболоченных дельтовых почв, в том числе рисовыхников, ввиду их сильного загрязнения поверхностными и грунтовыми водами; переселение жителей в другие места, 2 – среднее изъятие (20–40%) почв понижений и нижних частей конусов выноса, являющихся местами активного естественного соленакопления; замена с.-х. культур на солевыносливые и менее требовательные к воде, создание пастбищ, сенокосов, 3 – частичное, выборочное изъятие (5–20%) засоленных почв замкнутых и полузамкнутых понижений; места для хозяйственных застроек, пастбища, 4 – изъятие маломощных щебнистых и галечниковых почв (5%), замена хлопчатника садами, виноградниками, 5 – полное изъятие содовозасоленных почв (3%) ввиду больших энергетических затрат на их освоение, 6 – изъятие почв, залегающих на гипсонасosных породах неоген–палеогена предгорий (5%) и служащих источником широкой поверхности и подпочвенной миграции солей, которые загрязняют нижерасположенные с.-х. угодья, 7 – превращение орошаемых почв высокогорий (5%), особенно содовозасоленных, а также хлоридных в пастбища, 8 – площади первоочередного изъятия земель

– улучшить экологическую среду Западной Сибири, так как ее речные воды вскоре понадобятся для продажи республикам Средней Азии, Казахстану, а также зарубежным странам. На юг страны по трубопроводам и каналам можно ежегодно транспортировать из Западной Сибири около 25 км³ пресной воды высокого качества. Она может быть использована для питья, промышленности и частично для орошения, так как местные воды для этого во многих местах уже непригодны;

– организовать в пределах региона мониторинг для изучения динамики галогеохимических явлений. При этом заменить статические тематические карты на динамические, качественный анализ на количественный, глазомерные наблюдения на математически достоверные, генетический анализ на физико-геометрический, сравнительно-географический метод на теорию физического подобия. В этом деле поможет системный картографический метод пластики рельефа; (см. статью В.Н.Орешкина и др. в данном сборнике);

– заменить существующие методы проектирования мелиоративных систем, в которых коллекторно-дренажная сеть проводится без учета влияния на сток рельефа, на методы, учитывающие рельеф (см. статью Н.А.Шкилевой в данном сборнике).

ЛИТЕРАТУРА

Горев Л.Н., Пелешенко В.И. Мелиоративная гидрохимия. Киев: Вища школа, 1984.

Карта систем земной поверхности и почвенного покрова части Средней Азии/Глав. ред. И.Н.Степанов. М 1:1500000. М. ГУТК СМ СССР.

Метод пластики рельефа в тематическом картографировании Сб. научн. труд. Пущино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1987.

Орлов В.И., Соколова Н.В. Развитие болот Западной Сибири// География и природные ресурсы. 1989. № 2.

Соболевский П.К. Современная горная геометрия//Соц. реконструкция и наука. 1932. Вып. 7.

Степанов И.Н. Почвенные прогнозы. М.: Наука, 1979.

Степанов И.Н. Выявление по топокартам и аэрофотоснимкам форм естественных почвенно-геоморфологических тел. Методические рекомендации. Пущино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1983.

Степанов И.Н. Формы в мире почв. М.: Наука, 1986.

Степанов И.Н., Абдуназаров У.К. Погребенные почвы в лесах Средней Азии и их палеогеографическое значение. М.: Недра, 1977.

Степанов И.Н., Чембарисов И.Н. Влияние орошения на минерализацию речных вод. М.: Наука, 1978.

МЕТОД ПЛАСТИКИ РЕЛЬЕФА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ *

Н.А.Шкилева

Разработанный в лаборатории картографии почв (ИПФС АН СССР) метод пластики рельефа перерастает в методологию научных исследований, захватывая и области практического применения почвенных, гидрогеологических, географических, агротехнических знаний. Составлена программа использования методологии пластики рельефа при мелиоративных изысканиях, проектировании, строительстве, с.-х. освоении территории и для экологического контроля. С начала 1989 г. методология проверяется на конкретной территории – части совхоза "Ялгинский" Гунибского района Дагестана, совхоза им. Ленина Кировского района Махачкалы: по договору с "Дагрисводстром" на площади в 300 га проходит производственную проверку методологии "пластика рельефа". Работы рассчитаны на 5 лет. В настоящем сообщении приводятся результаты первого 1989 года наблюдений.

Общая задача – на основе метода пластики /1/ составить исходные топографические материалы, которые могли бы послужить базой для проектирования ирригационной и коллекторно-дренажной сети. Прежний традиционный метод построения геометрически правильной мелиоративной водохозяйственной сети заменяются сетью типа "елочка", когда коллекторы и дрены прокладываются строго по тальвегам, а ирригационная сеть – по водоразделам. При этом изменяется структура строительных работ и пашен, которые отражают конкретные особенности строения рельефа. Ставятся более благоприятными условия для контроля за состоянием природной и измененной деятельностью человека природно-водохозяйственной средой.

Топографические работы. Топокарта местности М 1:2000 составляется общепринятым методом. Сечение горизонталей через 0,25 м не дает необходимого представления о характере рельефа. Пока вопрос о проведении высокоточной топосъемки не ставится, однако проблема разреженности горизонталей затруднила дешифрирование топокарты. Пошли по пути отрисовки дополнительных горизонталей. Это позволило помимо горизонталей иметь систему линий – морфоизограф /2/, проведенных по точкам нулевой кривизны изогипс. Сочетание горизонталей с морфоизографами создает топографическую поверхность с четким отображением выпуклостей и вогнутостей рельефа. Такая карта называется картой пластики рельефа и ее составление рекомендовано всем научным и проектным организациям Минводхоза НТС В/О "Союзводпроект" (июнь 1989 г.) для работ, проводимых в масштабах от детальных до 1:25000 включительно.

* Работа выполнена под руководством проф. И.Н.Степанова.

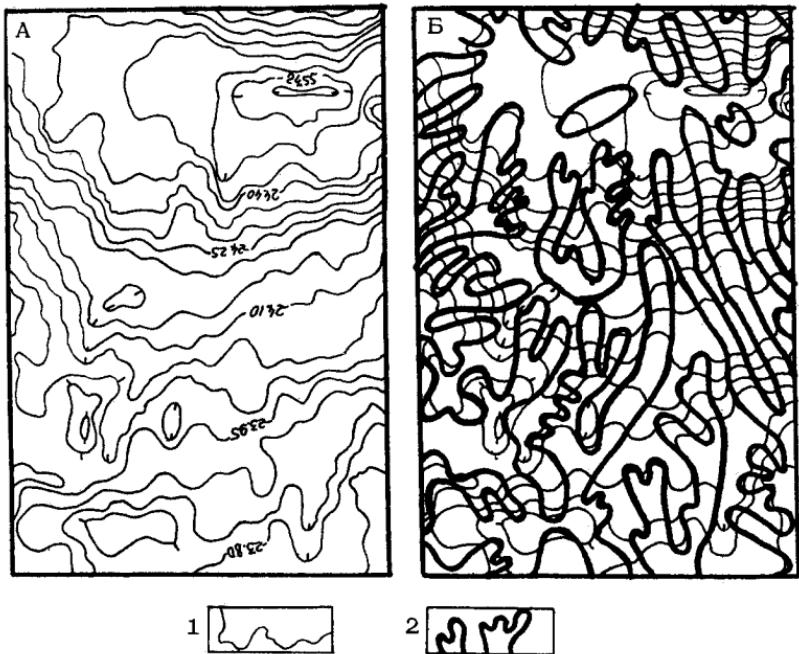


Рис. 1. Схемы рельефа части территории совхоза "Ялгинский" в форме изогипс (А) и в форме карты пластики, сочетающей изогипсы и морфоизографы (Б): 1 – изогипсы, 2 – морфоизографы

Таким образом, вся проектная документация должна проходить через карту пластики рельефа. Такая карта (рис. 1, Б) на основании топографической основы (рис. 1, А) составлена нами в том же масштабе, согласно предлагаемой инструкции В/О "Союзводпроект".

Карта бассейнов стока. На основе карты пластики рельефа (рис. 1, Б) составляется карта бассейнов стока территории (рис. 2). Хотя территория изучаемого участка почти абсолютно плоская (Прикаспийская низменность с abs. отметками -23, -25), все же на ней виден отпечаток недавних прошлых речных долин. Последние едва заметны на глаз, так как замыты мелкоземистым делювием, осложнены различными экзогенными процессами. Тем не менее, как видно из рис. 1, Б, 2, Прикаспийская низменность, представленная в нашем случае детально изученным участком, имеет вид, напоминающий рельефный узор горной территории: извилистые долины переходят в расчлененные склоны, последние сменяются водо-

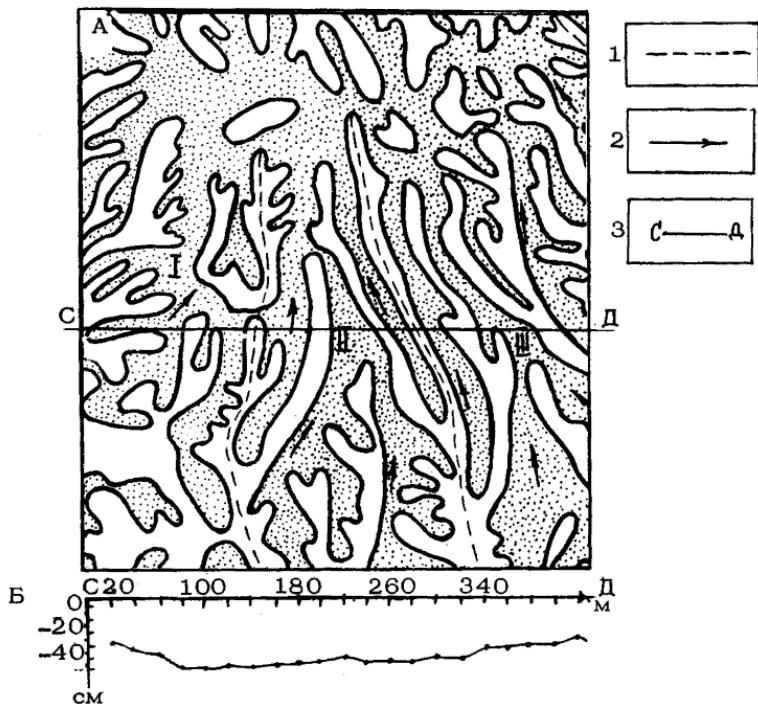


Рис. 2. Фрагмент карты бассейнов стока, составленный на основе пластики рельефа (А), профиль рельефа по линии СД (Б): 1 – границы бассейнов I, II, III; 2 – направление потоков; 3 – продольный профиль

разделами, один бассейн отделен от другого водоразделом. И хотя участок имеет общий уклон к Каспийскому морю, тем не менее он содержит внутренние бассейны стока противоположного направления.

На территории участка выделено 7 изолированных бассейнов стока. Каждый из них характеризуется своими особенностями гидрологического и гидрогеологического режимов: скоростью потоков, их направленностью, глубиной залегания, степенью дренированности, литолого-фильтрационными свойствами и т.п. Обычно такие карты при проектировании не составляются, что значительно обедняет представления проектировщиков об особенностях строения рельефа и структуры поверхностного и подземного стока воды, солей, тонких органо-минеральных частиц.

Карта глубины залегания грунтовых вод. Карта в масштабе 1:5000, основой для составления которой послужила пластика

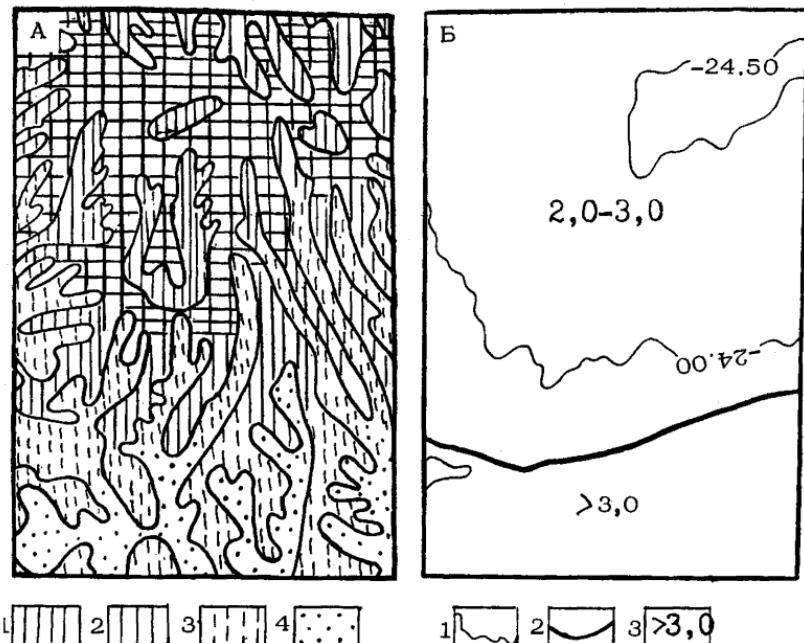


Рис. 3. Фрагменты карт глубины залегания грунтовых вод М 1:2000 (уменьшено), составленных методом пластики (А) и традиционным методом (Б). Глубины залегания грунтовых вод, м: 1) 2-2,5; 2) 2,5-3, 3) 3,0-3,5, 4) более 3,5. Условные обозначения рис. Б: 1) изогипсы; 2 - граница между участками с разной глубиной залегания грунтовых вод; 3 - глубины залегания грунтовых вод

рельефа, создана по данным 30 скважин глубиной не более 4 м. Как видно из карты (рис. 3, А), глубины залегания грунтовых вод соответствуют элементам рельефа: на повышениях они больше, чем на склонах, и меньше в понижениях. Использование карты пластики рельефа значительно обогатило информацией по ориентированным потокам карту грунтовых вод. Преимущество новой карты заключается в том, что она является картой естественных потоков грунтовых вод. Поверхностные бассейны стока на ней совпадают с внутрипочвенными бассейнами стока, на которых закономерности погружения и выклинивания грунтовых вод проявляются во всей своей полноте. Формируется принципиально иной подход к регулированию водного режима: не за счет снижения депрессионной кривой грунтовых вод путем сооружения глубоких (до 3-4 м) дрен и кол-

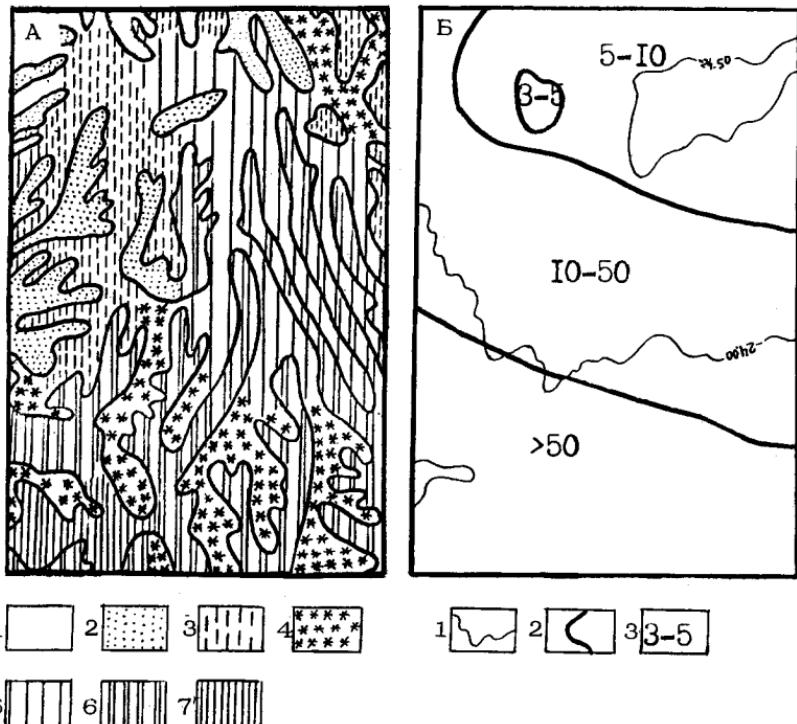


Рис. 4. Фрагменты карт минерализации грунтовых вод М 1:2000 (уменьшено) методом пластики (А) и традиционным методом (Б). Для А: (минерализация, г/л) 1 - 3-4; 2 - 4-5; 3 - 5-7; 4 - 7-10; 5 - 10-30; 6 - 30-50; 7 - 50-55; 8 - 55-60. Для Б: 1 - изогипсы; 2 - границы участков с различной минерализацией; 3 - значения минерализации

лекторов, а за счет отсасывания грунтовых вод из зоны аэрации многочисленной, но неглубокой сетью дрен, проведенных по тальвегам местных бассейнов стока.

На данную территорию, на основе тех же 30 скважин по традиционной методике составлена карта глубин залегания грунтовых вод (рис. 3, Б). Как видно, эта традиционная карта на фоне карты грунтовых вод, составленной методом пластики рельефа, является картой районирования грунтовых вод по глубине их залегания. На основе скудной информации о свойствах и структуре потоков грунтовых вод традиционной карты трудно провести объективное проектирование коллекторно-дренажной сети, тогда как карта грунтовых вод (рис. 3, А) дает достаточно полную и объективную информацию,

которая позволяет иначе, с других методологических позиций проектировать и строить мелиоративную сеть, о чем будет сказано ниже.

Карта минерализации грунтовых вод. Один вариант ее составлен на основе карты пластики рельефа (рис. 4, А), а другой – по традиции (рис. 4, Б). Из сопоставления этих карт, видно, что на рис. 4, Б представлена по сути карта районирования минерализации грунтовых вод, тогда как карта на рис. 4, А свидетельствует о связях величин минерализации и химизма грунтовых вод с элементами рельефа местности: на понижениях минерализации ниже, а в состав грунтовых вод меньше ионов хлора и натрия, чем на повышенных элементах.

В понижениях, особенно замкнутых, происходит концентрация солей за счет близкого залегания грунтовых вод и их упаривания. В местах с относительно хорошим оттоком минерализация грунтовых вод ниже. Видимо, за счет усиления отточности грунтовых вод (строительство неглубоких дрен по древним естественным каналам стока) можно заметно уменьшить минерализацию и содержание токсичных солей – хлоридов натрия.

Минерализация грунтовых вод в среднем равна 30 г/л, колебляясь от 2 до 77 г/л. Воды с относительно низкой минерализацией (2–9 г/л) занимают около 20% площади – это повышения с уклонами местности, способствующими быстрому оттоку, почвы и наносы здесь легкого механического состава. Примерно такую же площадь занимают грунтовые воды с минерализацией 10–20 г/л. Наибольшую площадь (60%) охватывают грунтовые воды с минерализацией 40–60 г/л.

Состав грунтовых вод преимущественно хлоридно-сульфатно-магниево-натриевый (преобладает последний ион). Величина pH 7,2–7,6, реже 7,0 и 7,8. В зависимости от литологического строения зоны аэрации и места ее расположения заметно меняются минерализация и химический состав. Территории с хорошей отточностью имеют равное соотношение хлоридов и сульфатов с появлением в катионной части магния и кальция. На повышениях в грунтовых водах доминируют сульфаты кальция, в понижениях – хлориды натрия при высокой минерализации.

Галогеохимическая карта. Необходимо дифференцированно подходить к характеристике качества почв и наносов мелиорируемой территории. В одном случае достаточно проведение почвенно-мелиоративной съемки, в другом – целесообразнее составить галогеохимическую карту, например, для небольшой (300 га) территории совхоза "Ялгинский" рекомендуется не почвенная, а галогеохимическая карта. Последняя отображает структуру и свойства ареалов распределения солевых масс зоны аэрации или искусственно ограниченной толщи, например 0–2 м. В нашем случае дана характеристика толши 0–2 м. Составленная нами галогеохимическая карта использует традиционные показатели почвенно-мелиоративной карты: засоление по пол-

ному остатку водной вытяжки 1:5, состав анионов и катионов водной вытяжки, рН, поглощенные основания, механический состав, коэффициенты фильтрации и т.п. Однако на традиционных картах показатели засоления сильно обобщаются и характеризуют некую искусственно созданную плоскую поверхность, не учитывающую изменения солевого состава по элементам рельефа. В новой галогеохимической карте, построенной на основе карты пластики, солевые и прочие характеристики даются по естественным элементам рельефа: выпуклостям, склонам, понижениям, склонам разной крутизны и экспозиции. На такой карте солевая картина становится как бы динамической: она показывает существующие, прошлые и будущие пути миграции солевых масс, места их концентрации, рассеяния и возникновения.

При составлении карты учитываются многие дополнительные показатели: среднегодовая температура воздуха территории ($11,6^{\circ}\text{C}$), продолжительность безморозного периода (234 дня), среднегодовое количество осадков (430 мм), испарение влаги за год (893 мм), гидротермический коэффициент (0,75).

На территории выделены следующие группы почв: 1) луговые маломоющие карбонатные (засоленные и незасоленные); 2) солончики луговые; 3) солонцы (выделен лишь один контур).

Почвы и наносы территории совхоза преимущественно сильнозасоленные с доминированием солончакового типа засоления, т.е. накопление солей происходит в поверхностных горизонтах почв. Содержание солей в почвах (%): в верхних горизонтах на глубине 0–30 см в среднем 1,3 при колебаниях от 0,8 до 2,5, в нижних горизонтах на глубине 100–200 см в среднем 0,7 при колебаниях от 0,1 до 1,7, единично – до 2,4.

Распределение солей по почвенному профилю на глубинах 0–2 м не всегда имеет солончаковый характер. Встречаются однородные по засолению толщи, а также с пиками максимума на различных глубинах, что зависит от частоты смены литологического состава.

Пространственное распределение солей закономерно: их минимум, как правило, приурочен к почвам повышений с легкосуглинистыми и песчаными почвами, а максимум – к понижениям с тяжелыми суглинками и глинами.

По характеру засоления наносы и почвы характеризуются доминированием сульфатно-кальциево-натриевого (на последнем месте преобладающий ион) состава с повышенным содержанием магния. Однако имеются почвы с повышенным содержанием хлора; примерно равное соотношение хлора и сульфатов наблюдается в нижних толщах почв. Многие почвы содержат одинаковые количества кальция, натрия и магния, однако содержание кальция чаще повышенное. Тенденция к уменьшению кальция замечена в нижних толщах почв. Присутствие соды не обнаружено. Отмечается повышенное содержание хлора и натрия по понижениям рельефа, а сульфатов, кальция, магния – по повышениям.

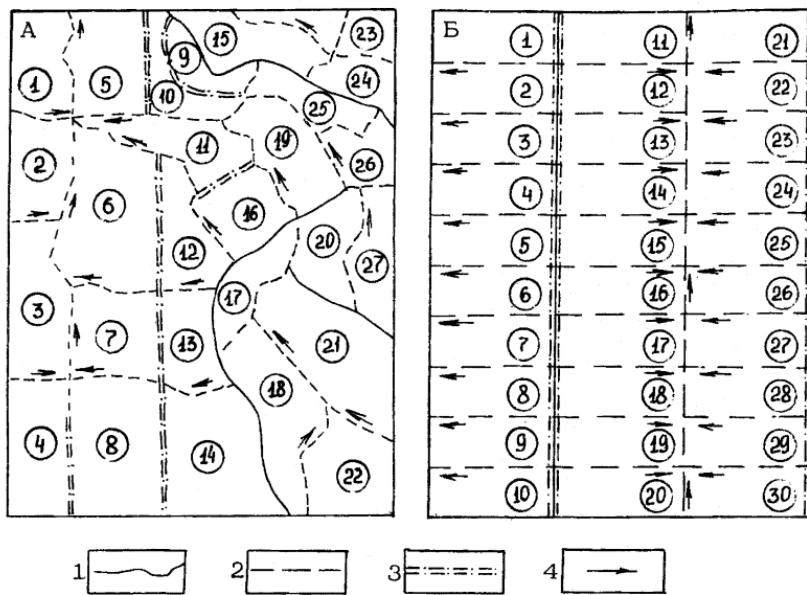
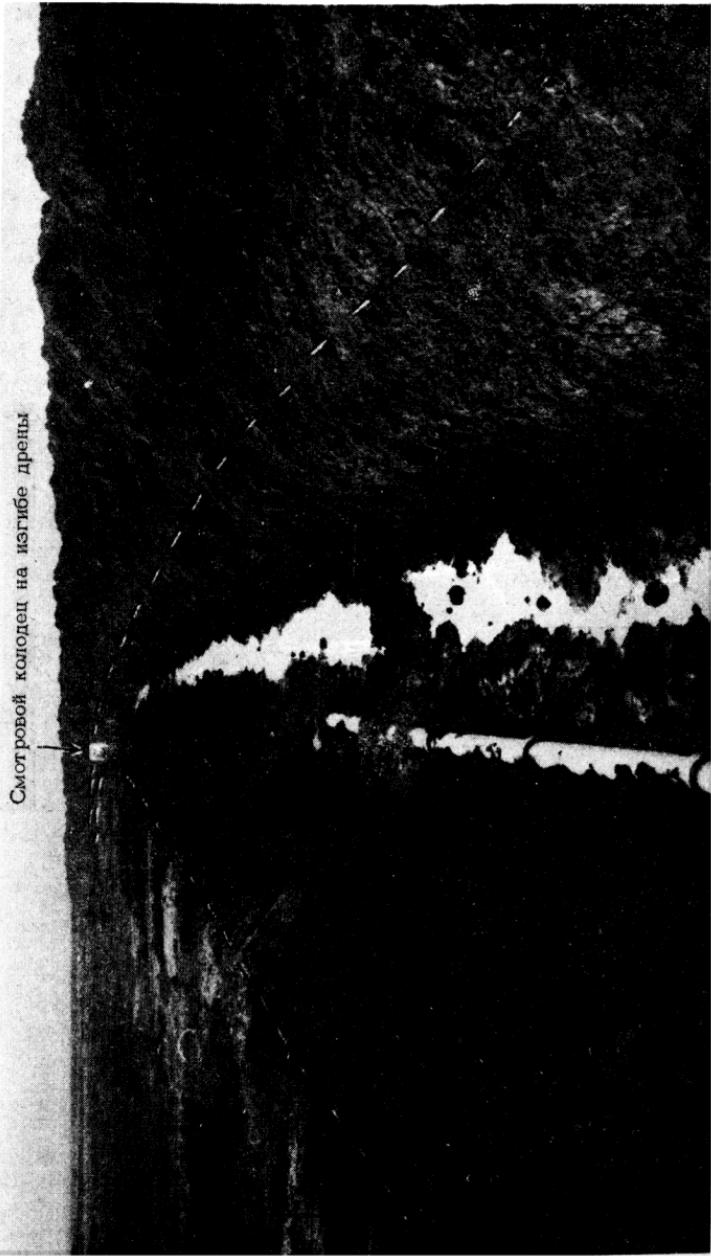


Рис. 5. Поля севооборота совхоза "Ялгинский", разбитые на чеки (1-30) разными способами: А - контурный, по карте пластики рельефа, участок АН ССР; Б - традиционный, по геометрически правильной сетке, участок Даггипроводхоза; М 1:2000 (уменьшено). 1 - оросители, 2 - коллекторы, 3 - валики, 4 - направление водно-солевого стока

Проектирование коллекторно-дренажной сети (КДС). Коллекторы и дрены занимают самые низкие элементы рельефа – понижения, повторяя естественный древовидный узор древней гидрографической сети территории (рис. 5). Задача такой КДС – не только опустить уровень грунтовых минерализованных вод территории, но и обеспечить их постоянный свободный отток за счет включения в работу почвенно-гидрологического режима всей площади древних микробассейнов. Последние сформировались за счет деятельности текучих вод в недалеком прошлом; за последние столетия сток воды прекратился и древние русла и их микробассейны были замаскированы процессами денудации и аккумуляции. Однако в прошлом их высокая водопроводящая способность и единная структурная целостность, а также механизм взаимодействия отдельных участков микробассейнов с крупными и мелкими руслами сохранились, хотя и "отключены" от воды. Это напоминает погребенную в толще наносов древнюю заброшенную людьми водопроводную сеть, которую вновь обнаружили и пустили в действие, так как структура сети осталась



Смотровой колодец на изгибе дрены

Рис. 6. Криволинейная дрена, построенная на опытном участке в совхозе им. Ленина Кировского р-на Мехачевы в 1990 году

нетронутой, слабоизмененной. С помощью метода пластики эти древние русла и подчиненные им площади микробассейнов восстановлены на картах, проектировщики провели по этим древним руслам коллекторы и дрены, как бы реконструировав древнюю гидросеть, подчистив ее с тем, чтобы отток грунтовых вод был максимальным и охватывал всю площадь микробассейна.

И.Н.Степанов разработал модель, которая дает возможность проектирования КДС в соответствии с естественной геометрической структурой топографического и геохимического пространства. Структурный скелет КДС, по его мнению, следует "погрузить", "вписать" в структурный математически точно описанный рельеф топографического пространства, т.е. должно произойти идеальное совмещение двух пространственных систем: естественной топографической и искусственно создаваемой мелиоративной. Лишь в таком случае возможна гармония человеческой деятельности с жизнью природы.

На рис. 5 (слева) показано поле севооборота (около 100 га), которое спроектировано по древовидной системе: оросители (сплошная линия) проведены по водоразделам микробассейнов, коллекторы и дрены (пунктир) – по понижениям. Стрелками показано направление по древней гидрографической сети поверхностного и подземного стока. Как видно по направлению стрелок, этот сток различно ориентирован и иногда имеет противоположный характер. Номера чеков даны в кружочках; их 27 в древовидной мелиоративной системе (А) и 30 в традиционной (Б). Площадь каждого чека 3–4 га, длина и ширина чеков около 200 м (А) и 100x200 м (Б). В древовидной системе конфигурация чеков сложная, что затруднит строительство, а также уход за с.-х. культурами. Предполагается первые три года промывка почв чеков от солей на фоне риса с последующим выращиванием трав для нужд животноводческого совхоза. На чеках традиционной системы (Б) освоение территории, с точки зрения использования механизации, будет проще, чем в системе (А). Однако по нашему мнению, расселение в чеках системы А будет проходить быстрее, полнее и эффективнее. Кроме того чеки системы А спроектированы по изогипсам и морфоизографам таким образом, что маломощный почвенный покров сохранится, тогда как в системе Б намечены планировки.

Более детальное описание проектирования древовидной системы, ее строительство, освоение и экологический контроль за качеством земель и вод будут опубликованы в специальных статьях по мере проведения научно-производственного опыта в совхозах "Ялгинский" и им. Ленина Махачкалы в течение 1990–1993 гг. В совхозе им. Ленина Кировского района Махачкалы построена мелиоративная система с криволинейными дренами переменной глубины (от 1,5 до 3,0 м), на изгибах которых устанавливаются смотровые колодцы (рис. 6).

ЛИТЕРАТУРА

1. Временная методика по составлению карт пластики рельефа крупного и среднего масштаба. Пущино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1984, 20 с.
2. Метод пластики рельефа в тематическом картографировании/ Сб. науч. трудов. Пущино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1987, 160 с.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОЧВЕННЫХ КАРТ КАЗАХСТАНА

А.Е.Ковалева

В ряде работ /Метод пластики..., 1987; Степанов, 1990/ показано, что существует два типа почвенных карт: традиционные, идущие от почвенной карты Европейской части России В.И.Чаславского, и системно-структурные, идущие от аналогичной карты В.В.Докучаева.

На системных картах выявлены два структурных пространственных элемента: повышение и понижение рельефа. Понижения чередуются с повышениями и образуют системы земной поверхности или педосистемы, если к изображениям этих элементов рельефа привязана информация о свойствах почв.

Традиционная тематическая картография не учитывает характеристики и их влияния на свойства почв. Понижения, повышения и связанные с ними почвы сливаются в один выдел неестественной конфигурации; по традиционным картам невозможно выявлять потоковые структуры, визуализируемые системными картами, имеющими большое значение для изучения почв, строительства мелиоративных систем, экологического прогноза.

Проведем сравнительный анализ двух направлений в почвенном картировании на примере Казахстана.

На фрагменте Почвенной карты Казахстана под редакцией профессора А.А.Соколова /1959/ (рис. 1, А) обозначен крупный выдел с сочетанием почв Глк₁+Глс₁^{оп}. Лишь в русле крупной реки показаны аллювиально-луговые оподзоленные почвы. На системной карте (рис. 1, Б), составленной нами методом пластики рельефа, масштаб позволяет выделить не сплошной "лоскутный" контур, где почвенная ситуация обезличена, а два контура – повышения (затемнено) со своими почвами, видимо, Глк₁, и понижения, видимо, с почвами Глс₁^{оп}. Такая дифференциация почвенного покрова не затрудняет чтение карты, повышает ее информативность, выявляя естественные структуры рельефа и почвенного покрова для данного уровня организации территории, определяемого здесь масштабом 1:200000.

На рис. 2, А представлен фрагмент почвенной карты, составленной В.М.Стародубцевым /1988/. Тема его диссертации посвящена

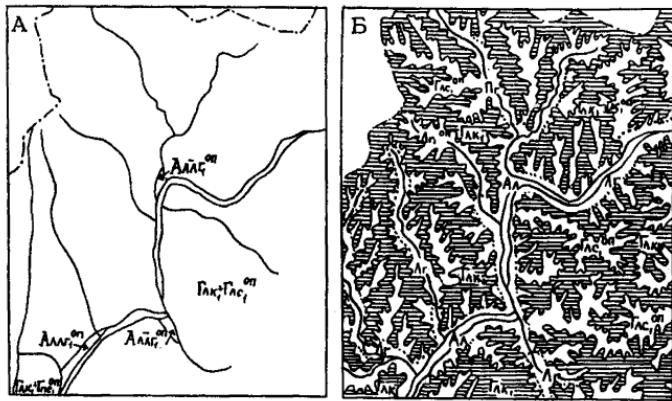


Рис. 1. Фрагменты почвенных карт (М 1:200000), составленных: А - А.А.Соколовым /1959/; Б - И.Н.Степановым /Почвенная карта Казахстана, 1987/

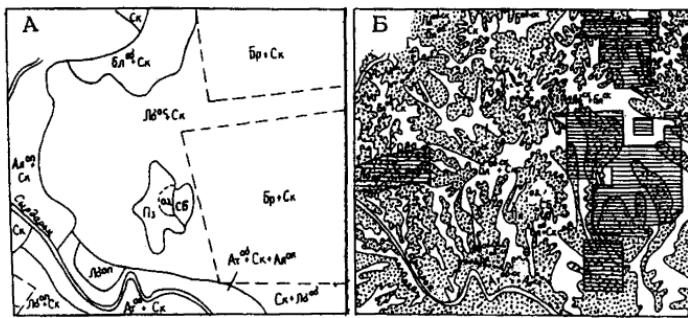


Рис. 2. Сравнение контурности почвенных карт ($M 1:200000$), составленных: А - В.М.Стародубцевым /1986/; Б - И.Н.Степановым /Почвенная карта Казахстана, 1987/

влиянию бассейнов стока на мелиоративное почвообразование. Однако бассейны стока, отображаемые на топокарте с помощью изогипс, не нашли отражения на карте В.М.Стародубцева. Основной фон составляет выдел с индексами $D_{B^0C}+Sk$, в котором пунктиром отбиты границы рисовников. Низкая информативность этой карты объясняется тем, что при картировании проигнорированы различия в характеристиках рельефа.

Если эту же территорию в том же масштабе закартировать методом пластики (рис. 2, Б), будут визуализированы повышения, понижения рельефа, а также бассейны стока, открытые и замкнутые.

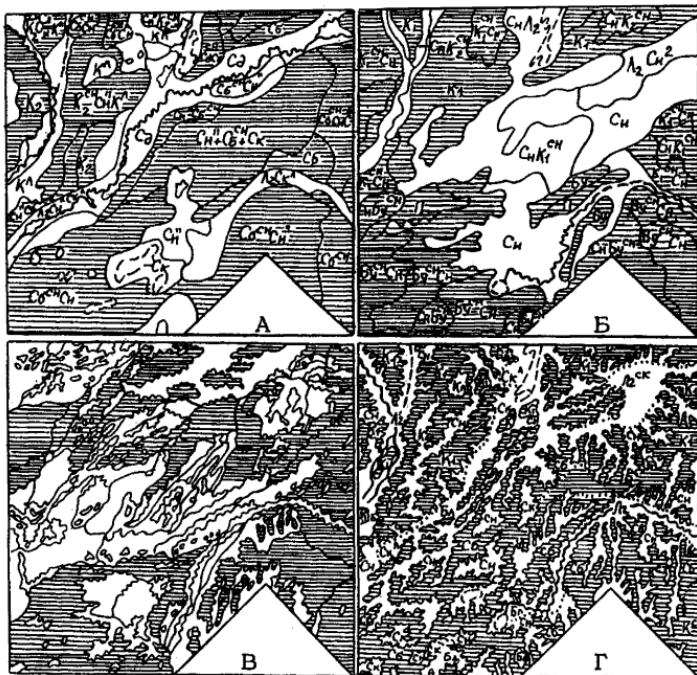


Рис. 3. Сравнение узоров почвенных выделов на почвенных картах КаэССР (М1:2,5 млн.): А и Б - карты, составленные по традиции без учета форм рельефа /Лобова, 1946; Успанов, 1976/; В - дешифрированный космоснимок /Викторов, 1989/; Г - методом пластики рельефа /Почвенная карта Казахстана, 1990/

Естественно, условия почвообразования на повышениях будут отличаться от процессов в понижениях мезорельефа.

Карта пластики (рис. 2, Б) отображает площадь и конфигурацию бассейнов водосбора, транзита и аккумуляции воды и солей. Видно, как по элементам рельефа расположены рисовые чеки: часть из них занимают повышения, где процессы рассоления более интенсивны, нежели в чеках, расположенных по понижениям, которые по природе являются солеприемниками с иным водно-солевым режимом.

Интересно сравнить почвенные карты Казахстана одного масштаба, составленные в разные годы: Е.В.Лобовой /1946/, У.У.Успановым /1976/, А.С.Викторовым /1989/ и А.Е.Ковалевой /Почвенная карта Казахстана, 1990/ (рис. 3 А, Б, В, Г, соответственно). Карты (рис. 3, А, Б) составлены традиционным способом. На них с большим трудом приблизительно удалось выделить почвы повы-

шений (затемнены), объединенных в обширные выделы на уровне районов. Отсутствует изображение выпуклостей и вогнутостей рельефа, автономных и подчиненных почв. Карта (рис. 3, В), составленная на основе дешифрирования космоснимков, несколько информативнее предыдущих, но и она сохраняет традиционный стиль отображения почв, являясь как бы переходом от традиционных карт (рис. 3, А, Б) к системной карте (рис. 3, Г).

На карте (рис. 3, Г) почвы повышений закономерно чередуются с почвами понижений, а переходные склоны, водоразделы и поймы, если они укладываются в масштаб карты, выделяются границами, обозначаемыми точками, пунктиром и т.п. Таким образом, на почвенных картах, составленных по методу пластики, существует иерархия границ, выделяются не только почвы повышений и понижений, но и других элементов рельефа.

В результате краткого анализа можно сделать вывод, что повышение информативности почвенных карт при их составлении и корректировке возможно на основе метода пластики рельефа с применением аэрокосмоснимков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Викторов А.С. Ландшафтный рисунок полупустынь и северных пустынь (анализ и практическое использование). Автореф. докт. дисс. М.: 1988, 41 с.
2. Метод пластики рельефа в тематическом картографировании. Сборник научных трудов. Пущино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1987. 160 с.
3. Почвенная карта Казахской ССР. М 1:200000, листы, рукопись/ Под ред. А.А.Соколова, 1959. Фонды АН СССР.
4. Почвенная карта Казахской ССР, М 1:2500000. Составлена Е.В.Лобовой под ред. акад. Л.И.Прасолова и чл.-кор. АН СССР И.П.Герасимова. М.: Почвенный институт им. Докучаева, 1946.
5. Почвенная карта Казахской ССР, М 1:2500000/Под. ред. У.У.Успанова. ГУГК СМ СССР, 1976.
6. Почвенная карта Казахстана. М 1:200000, листы, рукопись. Составил И.Н.Степанов, Фонды ИПФС АН СССР, 1987.
7. Почвенная карта Казахстана. М 1:2500000. Составила А.Е.Ковалева под рук. И.Н.Степанова. Рукопись, фонды ИПФС АН СССР, 1990.
8. Стародубцев В.М. Изменение почвенно-мелиоративных условий в бассейнах рек при водохозяйственном строительстве. Докт. дисс. Новосибирск, 1988.
9. Степанов И.Н. Истинные и ложные линии на почвенных картах//Почвоведение, 1990. № 3. С. 128–146.

СПИРАЛЬНАЯ ПОЧВЕННАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ МАЛОГО КАВКАЗА

Г.Ш.Мамедов, Г.М.Гаджиев

Модельное представление структур почвенного пространства зависит от правильного отражения реальных почвенных выделов на карте. Институтом почвоведения и агрохимии АН АзССР в 1989 году составлена почвенная карта АзССР методом пластики рельефа в масштабе 1:2000000. Структура почвенного пространства на этой карте представлена в каркасно-дреновидной форме, что отличает ее от традиционных карт с "лоскутными" почвенными вы-

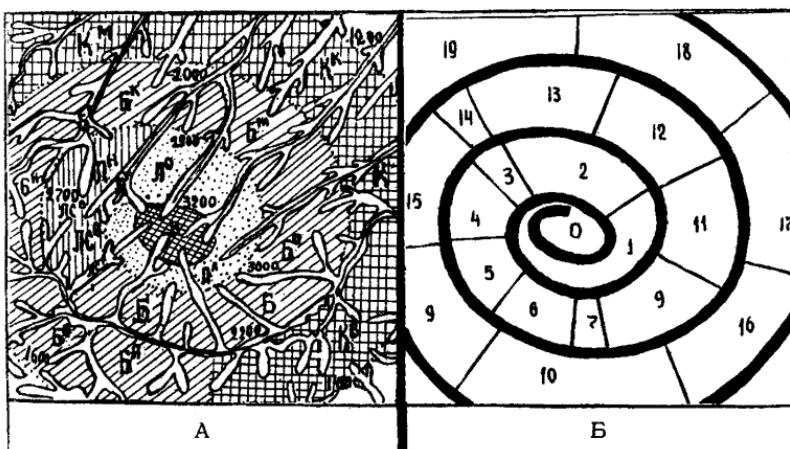


Рис. Спиральная зональность в центре Малого Кавказа. А - фрагмент почвенной карты АзССР. Б - схема спиральной зональности почв, составленная на основе фрагмента почвенной карты АзССР. О - Н - почвы нивального пояса; 1 - Л^D - горно-луговые дерновые; 2 - Л^O - горно-луговые остаточно карбонатные; 3 - Л^T - лугово-торфянистые; 4 - Л^H - луговые неполноразвитые; 5 - ЛС^B - лугово-степная выщелоченная; 6 - ЛС^O - лугово-степная ост. карбонатная; 7 - ЛС^T - лугово-степная торфянистая; 9 - Б - бурые горно-лесные типичные; 10 - Б^D - бурые лесные дерново-карбонатные; 11 - Б^O - бурые лесные остаточно-карбонатные; 12 - Б^M - бурые лесные типичные маломощные; 13 - Б^K - бурые лесные карбонатные; 14 - Б^B - бурые лесные выщелоченные; 15 - Б^H - неполноразвитые; 16 - К^B - коричнево-лесные выщелоченные; 17 - К - коричнево-лесные типичные мощные; 18 - К^X - коричнево-лесные карбонатные; 19 - К^M - коричнево-лесные типичные маломощные

делами. На карте отражена системная общность почвенного пространства, выявлен ряд закономерностей в географической смене почвенных типов, подтипов, родов и т.д.

Оказалось, что вертикальная поясность является частным случаем более общей криволинейной структуры почвенного пространства, ранее отмеченной И.Н.Степановым /Метод пластики..., 1987/. Так, смена почвенных типов происходит не только при изменении биоклиматических условий по высотам, но и в зависимости от форм земной поверхности и экспозиции склона. В результате получается почвенная спираль (рисунок, А). Если представить почвенные узоры в виде геометрических фигур путем абстрагирования, то получим идеальную спиральную структуру (рисунок, Б). Это подтверждено данными аэрокосмических снимков и полевыми исследованиями. В центре объекта на абс. высотах 3000–3200 м расположены нивальные почвы на скальных обнажениях. С востока от центра залегают горно-луговые дерновые почвы (высота 3000–3200 м), далее они заменяются по спирали, против движения часовой стрелки, горно-луговыми остаточно-карбонатными почвами (2900–3100 м), горными лугово-степными выщелоченными (2700–2900 м), горными лугово-степными черноземно-остаточно-карбонатными (2400–2800 м) почвами. Вторые и третьи "пояса" по спирали соответственно занимают горно-лесные бурые и горно-лесные коричневые почвы.

ЛИТЕРАТУРА

Метод пластики рельефа в тематическом картографировании. Сборник научных трудов. Пущино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1987. 160 с.

О "КАРТЕ СИСТЕМ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ЧАСТИ СРЕДНЕЙ АЗИИ"

З.Ф.Поветухина

Вышла в свет многокрасочная "Карта систем земной поверхности и почвенного покрова части Средней Азии" /1989/ масштаба 1:1500000 под редакцией д.с.-х.н., проф. И.Н.Степанова. Карта является результатом многолетнего экспедиционного и лабораторного труда большого коллектива ученых и инженеров – З.Ф.Поветухиной, Н.Ф.Деевой, М.Н.Брынских, А.А.Ильиной, Ф.И.Хакимова, Н.И.Сабитовой, У.К.Абдуназарова, Л.П.Пейдо, Э.У.Асымбековой. Она продолжает традиции системного подхода в почвенной картографии, открытые серией среднемасштабных (М 1:600000) карт по Туркменской ССР (почвенная, эрозионно-дефляционная, глубины залегания и химизма грунтовых вод, засоления почв, геоботанская с элементами геоиндикации, геоморфологическая, литолого-фильтрационная, механического состава, водохозяйственных соору-

жений, природно-мелиоративного районирования, рекомендаций по рациональному использованию водных и земельных ресурсов и др.) и по западной части Узбекистана. Первой мелкомасштабной картой подобного рода была "Карта систем почвенного покрова Туркменской ССР" /1984/, отображающая гомоструктурные и гомогенные почвенные системы – бассейны поверхностного и внутрипочвенного стока. Мировая практика картографии подобных карт ранее не знала.

При составлении "Карты..." /1989/, куда вошла часть информации "Карты..." /1984/, авторы пошли по пути типизации и идеализации элементов рельефа и почвенных тел с целью обеспечения возможности математического описания изображений почвенных систем. В результате идеализации информации выяснилось, что не только мелкие, но и крупные почвенные ареалы имеют упорядоченность, периодическую повторяемость в почвенном пространстве, их организация может быть описана с помощью аппарата теории симметрии. На "Карте..." /1989/ отображены полигональные и криволинейные структуры рельефа и почвенного покрова, демонстрируется тесная связь типов рельефа и почвенных комбинаций.

При классификации почв на "Карте систем..." /1989/ получили отражение три философско-методологические категории: время, пространство и движение. Возраст – как фоновая классификационная единица, пространство – как конфигурация почвенных тел, а также как характер взаиморасположения их; движение – как векторная направленность конфигурации почвенных тел. Вещественный состав и специфика почвенных тел определена традиционными классификационными понятиями: тип, подтип, род.

Контурность карты математически достоверна. Она составлена количественным картографическим методом пластики рельефа: по точкам перегибов изогипс топокарты М 1:300 000 проведена морфиозографа. Последняя соединяет точки нулевой кривизны. С помощью морфиозграфии получено ориентированное в гравитационном поле почвенное пространство, структурированное на области повышений (с нормальными почвами; этим восстановлен принцип показа нормальных почв по Докучаеву) и на области понижений (с наносными почвами и наносами по Докучаеву). Присутствие почв повышений и понижений сделало карту "объемной" в отличие от традиционных почвенных карт, на которых понижения и повышения рельефа объединены в один общий выдел, а различия в свойствах почв по элементам рельефа показаны знаками или индексами или вообще не показаны.

Специфика пространственного структурирования позволила показать на карте геохимическую сопряженность почв: автономные по повышениям, транзитные по склонам, подчиненные по понижениям. Эта сопряженность проявляется как по всему бассейну стока, так и на отдельных его частях. На каждом склоне можно обнаружить катенную связь: почвы верхних, средних и нижних частей склонов. В горах это структурное соотношение выражено четко, а на равнинах ввиду отсутствия фактического материала оно графически не показа-

Равнинные территории		Характеристика систем		Формы и литологический состав элементов	
		Сочетания элементов в системе			
		[6]	[5]	[4]	[3]
Биосфера	Трн				
Цветные единицы, характеризующие сочетания элементов в системе (табл. 1)					
1	2	3	4	5	6

Рис. Фрагмент из легенды к "Карте систем земной поверхности и почвенного покрова части Средней Азии" /1989/

но, хотя легко обнаруживается по формам земной поверхности, например, древние дельты и конуса выноса имеют четкую дифференциацию в рельефе – от высоких древних террас к более молодым низким террасам. Пространственно-геометрические совокупности почвенных ареалов и их аналогов явились основой для составления принципиально новой для картографической практики легенды. Впервые в легенде почвенное пространство было показано в виде блок-диаграмм, где нашли отражение и возраст, и генезис, и форма, и вещественный состав почвенного тела. На рис. представлены фрагменты легенд для подгорных покатых равнин и древних приподнятых выровненных поверхностей и останцов. Всего таких блоков-диаграмм 36. Они отражают многообразие почвенного покрова, геоморфологии и литологии картируемой части Средней Азии. В цветовой шкале на рис. штриховкой показаны почвы повышенных.

Своебразно решается проблема границ. Показаны два их вида: фундаментальная (сплошная линия), отделяющая мезо- и макроложения от соответствующих повышений; вспомогательная (точки), отделяющая склоны разной крутизны и экспозиции, нижние, средние и верхние части склонов: геоморфологические границы совпадают с почвенными.

Впервые на картах систем почвенного покрова показаны геохимические барьеры – контактные депрессии. Геохимические барьеры неизбежны на границе различных по возрасту и генезису отложений, например, как внутри дельты или конуса выноса, так и на контакте с сопряженными с ними территориями. В этих случаях геохимический барьер размещается по периферии этих отложений в пониженных частях и имеет четкую динамическую направленность к соленакоплению или заболачиванию. Геохимический барьер, не имеющий строго выраженных в рельефе границ и направленности, возникает, когда более молодые отложения перекрывают затухающий литодинамический поток. При определенных направлениях в природной среде или вмешательстве человека (мелиорация) геохимические барьеры в значительной мере могут ухудшить почвенно-мелиоративную обстановку далеко за пределами осваиваемой территории: просадки, инфильтрация, засоление и т.д. Поэтому авторы считают, что изданная карта заинтересует и геоморфологов, и гидрогеологов, и геоботаников. Настоящая карта как базисная, благодаря своей информативности, была использована при составлении "Карты галогеохимических потоков" и "Карты бассейново-галогеохимического районирования Приаралья" М 1:1500000 (рукописи).

"Карта систем..." /1989/ позволяет проследить историю развития почвенного покрова и прогнозировать динамику его изменения во времени и пространстве, независимость или взаимовлияние одной системы на другую, и при разумном сельскохозяйственном использовании предотвратить негативные последствия экологической обстановки. С помощью метода пластики реконструированы древние гидрографические сети, разновозрастные дельты и конуса выноса, тер-

расы, определена направленность их потоков. Получена разновозрастная потоковая система, возраст составляющих которой определен лабораторией картографии почв ИПФС АН СССР во время полевых и камеральных исследований 1971-1985 гг. В частности, использованы материалы /Степанов, Абдуназаров, 1977/ по возрасту погребенных почв, что помогло классифицировать почвенные тела с учетом временного аспекта.

В настоящее время лаборатория картографии почв ИПФС АН СССР завершает работы по составлению методом пластики рельефа системных почвенных карт по Уральскому региону (М 1:1500000), Казахстану (М 1:1500000) и Европейской части СССР (М 1:1000000).

ЛИТЕРАТУРА

1. Карта систем почвенного покрова Туркменской ССР. М 1:1500000. Институт почвоведения и фотосинтеза АН СССР/Гл. ред. И.Н.Степанов. М.: ГУГК СМ СССР, 1984.
2. Карта систем земной поверхности и почвенного покрова части Средней Азии, М 1:1500000. Институт почвоведения и фотосинтеза АН СССР/Гл. ред. И.Н.Степанов. М.: ГУГК СМ СССР, 1989.
3. Степанов И.Н., Абдуназаров У.К. Погребенные почвы в лесах Средней Азии и их палеогеографическое значение. М.: Недра. 1977.

СТРУКТУРНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОСАДКАХ АРАЛЬСКОГО МОРЯ

В.Н.Орешкин, Н.А.Лошакова, И.Г.Хайтов

Тяжелые металлы (кадмий, свинец, ртуть и др.) способны к значительному концентрированию в целом ряде осадочных образований дельтовых зон и морских бассейнов. Поведение этих металлов в процессах аридного седиментогенеза изучено крайне слабо. Например, до сих пор имеются лишь ограниченные сведения об их распространении в донных осадках Аральского моря – крупнейшего бассейна седиментации в аридной зоне. Для выявления степени концентрации тяжелых металлов в донных осадках Аральского моря и особенностей их распределения в связи со структурно-морфологическим строением рельефа дна нами было исследовано 128 образцов * поверхностного слоя, отобранных по всей акватории в период 1978-1979 гг. /Рубанов и др., 1987/. Аналитическое исследование ма-

*Авторы глубоко признательны И.В.Рубанову за предоставление образцов донных осадков для аналитического исследования.

териала проведено с помощью специально разработанных нами высокочувствительных методов атомной абсорбции и атомной флуоресценции /Орешкин и др., 1988; 1989/. Сведения об общем химическом составе осадков Аральского моря и их литолого-геохимическая характеристика приведены в работах Н.Г.Бродской /1952/, Ю.П.Хрусталева и др. /1977/, И.В.Рубанова и др. /1987/. В этих работах даны традиционные картосхемы распределения основных типов донных осадков, отдельных химических элементов в них и некоторых компонентов осадков (органическое вещество, сульфиды, карбонаты и др.). Контуры распространения основных типов осадков, по данным разных исследователей, практически совпадают, но внутри каждого из них имеются различия в содержании основных и особенно неосновных компонентов (металлов) в пробах. В рамках разрабатываемых зональных представлений об осадконакоплении показано кольцевое, поясное закономерное изменение состава осадков от прибрежной мелководной зоны к центральным глубоководным впадинам /Бродская, 1952; Хрусталев, 1977; Рубанов и др., 1987/. Согласно этим схемам, в центральных участках акватории Аральского моря и в западной глубоководной зоне, а также в Малом море преобладают тонкодисперсные карбонатные глины. Ближе к берегу эти глины сменяются алевролитами, а они в свою очередь – мелко- и крупнозернистыми песками.

Анализ распределения тяжелых металлов в поверхностном слое илов Аральского моря, очевидно, должен проводиться в соответствии с этими данными о распределении основных типов осадков. Вместе с тем мы исходим из предположения, что в настоящее время объяснение некоторых особенностей распределения металлов может быть дано на основе более подробного описания структурно-морфологического строения дна Аральского моря. Для этой цели была использована карта пластики рельефа, составленная по изобатам батиметрической карты /Хакимов, Брынских, 1987/ и откорректированная и дополненная нами (рис. 1). Такая карта дает геометрический образ выявленных ранее структур, показывает различия в их морфологическом строении. По существующим материалам территории Аральского моря делится на три основные части: на севере островом Какарал отделяется так называемое Малое море, а основная чаша асимметрично разделена Арабо-Кызылкумской грядой на большую (восточную) и меньшую (западную) части, в каждой из которых выделяется своя глубоководная зона.

Арабо-Кызылкумская гряда по карте пластики рельефа представляет собой автономную морфологическую структуру (рис. 1A), имеющую асимметричное строение относительно осевой водораздельной линии, делящей ее на два асимметричных склона. Склон восточной экспозиции короткий, более крутоий, менее изрезан, чем склон западной экспозиции, который практически достигает западной кромки берега моря, являющегося коренным уступом Устюрта. Характер изрезанности поверхности Арабо-Кызылкумской гряды, как показывает карта плас-

Содержание кальция и других элементов в донных осадках Аральского моря

Таблица

Элементы	Пески		Крупные алевриты	мелко-алевритовые	Илы		Источники
	мелко- и средне-зернистые	силитовые			глинистые северных эзаликов и Мал. моря	глинисто-известковые	
CaCO ₃ , %	13,83	45	15,48	24,73	15,21	38,99	11
Сорр, % на беск. в-во	0,12	1,0	0,45	0,67	1,28	1,91	"
P , " -	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,08	"
Fe , " -	1,38	2,36	3,11	3,33	3,9	3,72	"
Zn , 10 ⁻⁴ %, " -	41	78	84	94	114	131	"
Cd 10 ⁻⁴ %, ppm, на натур. сух. вес	0,012-0,15 0,051 (18)	0,055-0,24 0,15 (8)	0,04-0,24 0,16 (12)	0,14-0,34 0,22 (10)	0,020-0,25 0,086 (29)	0,10-0,66 0,23 (38)	данный работа
Cd 10 ⁻⁴ %, на беск. в-во	0,059	0,27	0,19	0,29	0,10	0,38	"
Cd/C _{опрг} (10 ⁵)	4,9	2,7	4,2	4,3	0,78	2,0	
Cd/Fe (10) ⁶	4,3	11,4	6,1	8,7	2,6	10,2	
Zn/Cd	695	289	442	324	1140	345	

Примечание. В числителе – предметы колебаний, в знаменателе – среднее значение, в скобках указано число проб.



Рис. 1. Структурно-морфологическое строение дна Аральского моря и сочетание его с традиционной схемой осадконакопления.

Условные обозначения: 1 - морские стальносерые, смытые и дельтовые буроватые глины; 2 - морские алевриты; 3 - дельтовые алевиты; 4 - прибрежные и дельтовые пески; 5 - оолитовые пески; 6 - границы морфологических структур, обозначенных в тексте буквами; 7 - границы основных типов донных отложений (по данным Ю.П.Хрусталева, И.В.Рубанова и др.); 8 - направление массопереноса в структурно-морфологической системе дна; 9 - повышения карты пластики рельефа

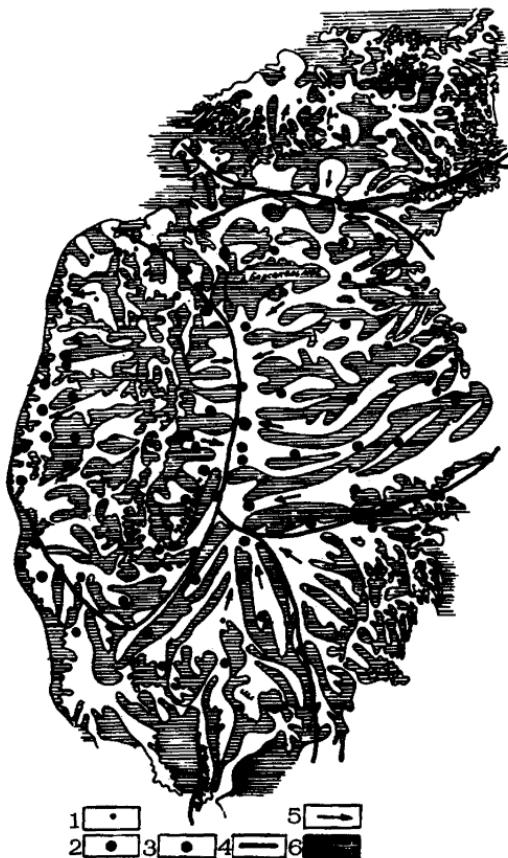


Рис. 2. Распределение содержания Cd в морфологических структурах дна Аральского моря. Условные обозначения: по содержанию Cd, мг/кг: 1 - $< 0,1$; 2 - 0,1-0,2; 3 - $> 0,2$; 4 - границы морфологических структур; 5 - направление массопереноса в структурно-морфологической системе; 6 - повышения карты пластики рельефа

тики, менее упорядочен, с высокой степенью крутизны. Геометрический рисунок гряды соответствует коренному западному берегу, т.е. характерен для Устюрга. Осевая водораздельная линия этой гряды на поверхности моря маркируется островами, наиболее крупные из которых Возрождения и Лазарева.

Дно чаши моря восточнее Арабо-Кызылкумской гряды по карте

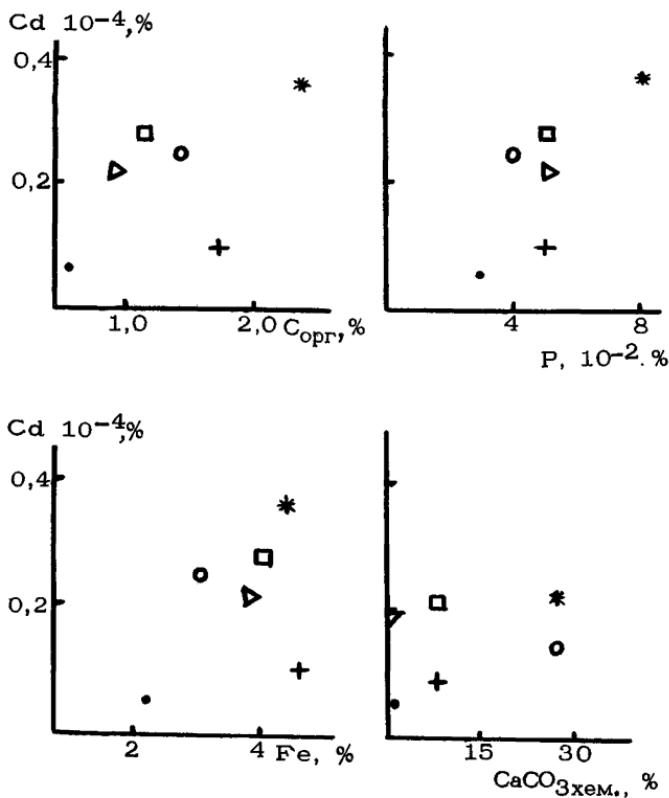


Рис. 3. Соотношение между кадмием и органическим углеродом, фосфором, железом, хемогенным карбонатом кальция в донных осадках Аральского моря. • - пески мелко- и среднезернистые; ○ - пески оолитовые; □ - крупные алевриты; △ - илы мелкоалевритовые; + - илы глинистые (северных заливов и Малого моря); * - илы глинисто-известковые

пластики имеет совершенно иной рисунок. Короткий восточный склон гряды резко опускается в центральную глубоководную впадину с ее западной стороны. С востока в эту чашу с постепенным пологим уклоном идут односторонние узкие, длинные, слабо изрезанные полосчатые структуры, характерные для конусов выноса крупных рек (в данном случае реки Сырдарьи). В юго-восточной и южной частях геометрический рисунок поверхности дна тоже присущ дельтовым образованиям, но в юго-восточной части (рис. 1, В) нет той полосчатости, что существует на востоке (рис. 1, Б) и юге

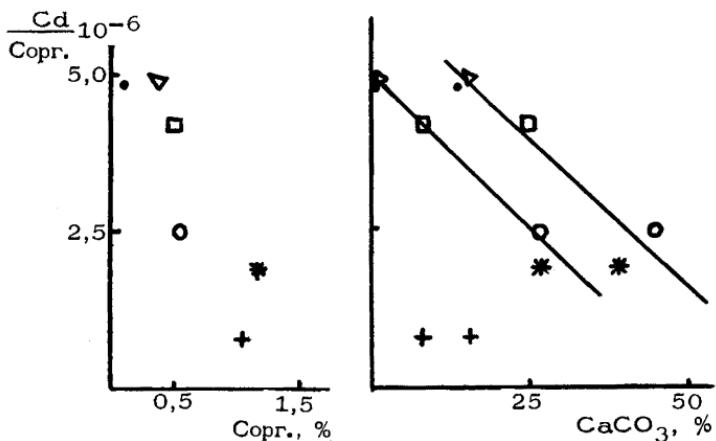


Рис. 4. Соотношение между величиной $\frac{Cd}{C_{\text{орг}}}$ (органическим углеродом) и карбонатом кальция в донных осадках Аральского моря. Условные обозначения см. на рис. 3. а - $\frac{Cd}{C_{\text{орг}}} - \text{CaCO}_3$ (общий); б - $\frac{Cd}{C_{\text{орг}}} - \text{CaCO}_3$ (хемогенный)

(рис. 1, Г), так как полосы уже распались на отдельные мелкие структуры, не характерные для активно живущих дельт. И действительно, эти мелкие конусы – результат деятельности пересыхающей реки Жанадары, в то время как восточные и южные полосчатые структуры принадлежат двум мощным источникам жизни Арала – рекам Сырдарье и Амударье, но южные, амударьинские, короче и уже, их меньше по количеству, чем на востоке. По карте пластики рельефа мы можем проследить вероятную векторную направленность динамики потоков вещества (на рис. 1 обозначено стрелками), не обязательно соответствующую современным гидродинамическим данным, а также выделить свои зоны формирования, транзита и аккумуляции веществ для каждой конкретной структуры. Так, Арабо-Кызылкумская гряда сама является дополнительной внутренней зоной формирования и выноса осадочного вещества, глубоководные впадины – зонами аккумуляции, а средние части подводных склонов и конусов выноса – преимущественно зонами транзита.

Малое море (рис. 1, Д) почти полностью отделено от основной акватории и живет своей автономной жизнью. Площадь его по сравнению с основным морем невелика, в несколько раз меньше. По карте пластики рельефа видно, что развитых донных структур в нем не сформировано. Это связано с отсутствием сколько-нибудь значительных внешних структурообразующих потоков. По характеру рисунка можно судить, что западная половина поверхности дна есть продолжение структур Устюрта, а восточная – Приаральских Караку-

мов. Из-за отсутствия впадающих в него рек не наблюдается типичных дельтовых структур конусов выноса.

Отображение рельефа дна Аральского моря по методу пластики показало, что традиционно выделяемые последовательные зоны осадконакопления (рис. 1) характеризуются определенным сочетанием повышений и понижений. Поэтому, например, прибрежный пояс мелко- и крупнозернистых песков распадается на повышения, в основе своей состоящие преимущественно из фракций крупнозернистого песка, и понижения — из мелкозернистого. Глубоководная же зона аккумуляции будет характеризоваться более тонкой фракцией карбонатных глин в понижениях и более крупных по размерам частиц повышений.

Таким образом, если сопоставить эту карту пластики рельефа дна моря и традиционные картосхемы распределения основных типов осадков, можно увидеть, что все пространства, занятые каким-либо одним типом осадков, имеют сложное структурно-морфологическое строение, представленное сочетанием повышений и понижений. Причем эти сочетания носят упорядоченный характер, индивидуальный для каждой части моря в зависимости от его геологического строения и истории развития. Соответственно, некоторые особенности пространственной дифференциации металлов, очевидно, обусловлены спецификой процессов осадконакопления в условиях этих реально существующих структур рельефа. Таким образом, в нашей работе рассматривается возможность учета именно этой "геометрии пространства осадконакопления".

Обратимся к некоторым геохимическим данным, например, по кадмию (рис. 2-4). В таблице приведены данные о содержании кадмия и других элементов в донных осадках моря. Установлено, что концентрация кадмия составляет 0,012–0,66 мг/кг (в среднем, с учетом распространения различных типов осадков — 0,16 мг/кг). Самые низкие концентрации элемента наблюдаются в прибрежных песках всего моря, а также глинистых илах Малого моря. В других типах донных осадков содержание кадмия возрастает: в оолитовых песках до 0,15 мг/кг, а в алевритовых и глинисто-известковых илах до 0,20–0,40 мг/кг. В пересчете на бескарбонатное вещество особенности локализации элемента проявляются четче. При этом выявляется относительно большее обогащение глубоководных глинисто-известковых илов, характеризующихся в то же время максимальным накоплением хемогенных карбонатов и сульфидов, а также органического вещества. Анализ этих данных показывает, что существует общая тенденция к возрастанию (в среднем в 6 раз) концентрации кадмия от прибрежных крупнозернистых песков к тонкодисперсным глинистым и глинисто-известковым илам глубоководных впадин. В этом отношении кадмий обнаруживает черты сходства с распределением органического вещества, железа, марганца, фосфора, цинка и др. элементов, содержание которых также возрастает в глубоководных тонкозернистых отложениях моря.

/Хрусталев и др., 1977/. Однако при детальном рассмотрении становится ясно, что кадмий не обнаруживает корреляции ни с хемогенным карбонатом кальция, ни с сульфидами (гидротроилит, пирит), ни с окислами и гидроокислами железа. Ожидаемая связь халькофильного кадмия с сульфидами, равно как и с хемогенным карбонатом кальция (за счет хемосорбции и вхождения в структуру кальцита), в Аральском море не реализуется, по-видимому, вследствие дефицита растворенной формы металла в водах. Судя по карте распределения пирита /Хрусталев и др., 1977/ в глинисто-известковых илах его содержание (в тяжелой фракции) во много раз выше, чем в оолитовых песках и алевритовых осадках. Но кадмий в распределении не показывает подобной пестроты. Кроме того не наблюдается обогащения элементом глинисто-известковых илов относительно железа (таблица). С другой стороны, максимальное обогащение глинистых илов северных заливов и Малого моря окислами и гидроокислами железа соответствует низким концентрациям кадмия. Совокупность прямых и косвенных данных о роли биогенных процессов в геохимии кадмия, а также его корреляция с органическим углеродом и фосфором (рис. 3, 4) позволяют заключить, что, по-видимому, относительно большую роль в концентрировании элемента в донных осадках играет органическое вещество, но при этом величина отношения кадмия к углероду (равно как и фосфора к углероду) в осадках имеет тенденцию уменьшаться при одновременном возрастании органического углерода и карбоната кальция, то есть процесс относительного концентрирования кадмия ограничен и слабее выражен в оолитовых и глинисто-известковых осадках. Такой характер поведения кадмия может быть связан с низкой биологической продуктивностью моря и ограниченностью поставки (дефицитом) металла с речным стоком (отметим установленную обедненность вод моря фосфором /Хрусталев и др., 1977/. Эти геохимические данные позволяют выявить общие черты поведения кадмия в осадконакоплении. Из таблицы видно, что концентрация кадмия в отдельных типах осадков изменяется в широком интервале, иногда более чем на порядок величины. Следовательно, использование при интерпретации средних величин концентраций имеет ограниченное значение, достаточное лишь для характеристики общих тенденций. По нашему мнению, анализ детальной картины распределения целесообразно проводить с учетом всего фактического материала, но на основе карты пластики рельефа.

Рис. 2 иллюстрирует распределение элемента в осадках моря в связи с выделенными геоморфологическими структурами дна. Хорошо видно, что всю акваторию моря можно разделить по геометрическому рисунку на несколько зон, характеризующихся наличием определенного количества элемента в донных осадках, причем области повышенных или пониженных концентраций (геохимические поля) могут быть соотнесены с конкретными структурами рельефа дна.

Самая большая область пониженных концентраций кадмия нахо-

дится в прибрежной юго-восточной части моря, не подверженной непосредственному влиянию потоков Сырдарьи и Амударьи и состоящей из отдельных мелких конусов выноса периодически действующей реки Жанадары. Затрудненность массопереноса вдоль осевых линий этих прибрежных структур (т.е. ограниченность поставки осадочного материала) способствует, вероятно, обедненности осадков структур элементов. Более того, можно констатировать, что эти прибрежные структуры, по-видимому, служат в свою очередь дополнительным источником осадочного материала и, соответственно, элемента (в составе компонента-носителя) для центральных структур. Область пониженной концентрации характерна и для глинистых осадков дельт северных заливов и Малого моря. Здесь прежде всего необходимо отметить два обстоятельства: первое – относительная изолированность этой части моря от основных внешних потоков осадочного материала в настоящее время и, следовательно, минимальное снабжение осадков металлами; второе – своеобразная структурная организация рельефа дна, отличающаяся от основной акватории моря. В частности, можно предполагать, что здесь морфологическая структура рельефа дна способствует скорее рассеиванию элемента в составе осадочного материала по всей акватории с последующей незначительной аккумуляцией в пределах многочисленных структур ловушечного типа, "разбросанных" по всей акватории Малого моря. Необходимо отметить, что отдельные повышенные значения концентраций приурочены к современной действующей дельте Сырдарьи и, очевидно, обусловлены привносом элемента с речными водами и взвесями. В остальных частях акватории Малого моря подобного концентрирования не наблюдается.

Область пониженных концентраций элемента в осадках местами соответствует (данных недостаточно) также морфологической структуре рельефа дна моря, сформированной Арабо-Кызылкумской грядой. Как видно из рис. 1, эта гряда является асимметричной структурой, представляющей, очевидно, область преимущественного выноса наиболее тонкого аутогенного и терригенного осадочного материала в восточном и западном от нее направлениях, то есть сама по себе служит источником элемента в составе носителей для других зон моря. Эта структура, кроме того, находится в области пониженного влияния терригенного материала, выносимого Амударьей. Других каких-либо существенных постоянных внешних источников осадочного материала в западной и северо-западной части моря нет (роль абразии берегов не может быть существенной).

Средние значения концентраций кадмия наблюдаются в разных частях морфоструктур, где происходят и аккумуляция и перенос осадочного материала. В отличие от зон преимущественного выноса эти морфоструктурные участки играют как бы двоякую роль: с одной стороны, способствуют определенному концентрированию элемента в осадках, а с другой – представляют собой зону транзита и дифференциации компонентов-носителей и, таким образом, могут

служить источником металла. Причем, если обратить внимание на изменение конкретных величин вдоль осевых зон повышений, то можно отметить тенденцию возрастания концентраций вдоль этих структур по понижениям в направлении от периферии к центрам глубоководных впадин. Подобная ситуация прослеживается в отношении большинства микроструктур, обрамляющих глубоководные впадины моря. Различие заключается, по-видимому, только в изменении роли того или иного источника элемента: либо, как мы отмечали выше, это будет терригенный осадочный материал, в основном выносимый реками, либо тонкий хемогенный и биогенный материал, в том числе и надвершинной дифференциации в структурно-морфологических зонах восточной прибрежной части моря и Арабо-Кызылкумской гряды. При этом интересно отметить, что наивысшая концентрация металла установлена в западной глубоководной впадине моря, имеющей относительно небольшую площадь, но морфоструктурно связанный с обширной областью дифференциации материала в виде Арабо-Кызылкумской гряды (ее западных склонов и восточной окраины Устюрта).

В центральной глубоководной впадине моря установлена значительная область повышенного содержания элемента, формирующаяся, очевидно, за счет смешанных различных источников, но при условии, что ее образование также благоприятствует (опосредованно через носителей) геометрия структур поверхности дна, способствующая, по-видимому, возникновению своеобразного повышенного градиента концентрации элемента в осадках в ряду: прибрежные терригенные осадки — глинисто-известковые илы впадин. Действительно, если коэффициент концентрации в подобном ряду осадков дна Малого моря равен 1,5–2,0, то Большого моря 4,0–6,0. Это тем более вероятно, что в целом Аральское море характеризуется крайне низкой биологической продуктивностью. Роль биогенного осадочного материала в Араве значительно уступает не только терригенному, но и хемогенному материалу, роль эолового материала также невелика /Хрусталев и др., 1977/. Этот материал подвергается дифференциации в реальном (структурно-организованном) "пространстве осадконакопления", и поэтому анализ схемы распределения расщепленного подвижного и неконсервативного кадмия в осадках показывает упорядоченную картину. Наличие этих геометрических структур в областях распространения того или иного типа осадков, по-видимому, и способствует дополнительной "микродифференциации" материала носителей кадмия и, в конечном счете, обуславливает основные флюктуации в содержании элемента от минимальных значений до максимальных. Таким образом, поля распределения тяжелых металлов в основных типах осадков заведомо неоднородны, если подходить к их рассмотрению с вышеизложенных позиций. Интересно отметить, что корреляция между элементом и основными компонентами-носителями неоднозначна для литологически близких типов осадков в пределах различных структурных зон дна моря. По-видимому,

это лишь косвенное подтверждение правильности высказываемого положения. Очевидно, необходимы дальнейшие исследования (в частности, мы не затронули вопрос о гидродинамическом факторе дифференциации материала в системе выделенных структур).

Таким образом, анализ рис. 2 показывает, что подобные структурно-геометрические схемы рельефа дна, по-видимому, могут способствовать пониманию явлений пространственного рассеивания-концентрирования тяжелых металлов в поверхностном слое донных осадков. В плане практического использования развивающегося подхода можно отметить, что в пространственном распределении выделяется целый ряд структур-ловушек, которые по существу представляют собой зоны, потенциально опасные с точки зрения накопления тяжелых металлов. Особенно большие масштабы аккумуляции металлов в этих структурах-ловушках может принять при наличии источников антропогенных выбросов. Таким образом, можно выделить зоны морских бассейнов, потенциально опасных загрязнением тяжелыми токсичными металлами.

ЛИТЕРАТУРА

Бродская Н.Г. Донные отложения и процессы осадкообразования в Аральском море//Тр. Ин-та геологических наук АН СССР. Вып. 115, геол. серия (57), 1952.

Орешкин В.Н., Беляев Ю.И., Внуковская Г.Л. Повышение чувствительности и точности прямого непламенного атомно-абсорбционного определения кадмия, свинца, серебра и таллия в морской, речной и золовой взвеси//Океанология. 1985. Т. 25. Вып. 6. С. 1034-1039.

Орешкин В.Н., Внуковская Г.Л., Беляев Ю.И. Атомно-абсорбционный анализ веществ с усовершенствованными электротермическими атомизаторами порошков//Новое в практике химического анализа веществ. М.: Изд-во МДНТП, 1989. С. 44-50.

Рубанов И.В., Ишниязов Д.П., Баскакова Н.А. Геология Аральского моря. Ташкент. Изд-во ФАН, 1987.

Хакимов Ф.И., Брынских М.Н. Форма и узор контуров на карте пластики рельефа как индикационный признак типов территорий//Метод пластики рельефа в тематическом картографировании. Пущино: ОНТИ НЦБИ АН СССР. 1987.

Хрусталев Ю.П., Резников С.А., Туровский Д.С. Литология и геохимия донных осадков Аральского моря. Ростов. РГУ, 1977.

СОВРЕМЕННАЯ ГОРНАЯ ГЕОМЕТРИЯ*

П.К.Соболевский

Так называемая Современная Горная Геометрия получила на Урале весьма широкое промышленно-практическое применение, как строгая физико-математическая методика промышленной характеристики разведываемых недр. Общее количество работающих в этом направлении инженеров и техников, ведущих геометризацию Урала, давно перевалило за сотню, а общее количество произведенных ими работ исчисляется не одной сотней листов специальных график – и все-таки о сущности наших уральских горногеометрических работ широкие круги технических кадров Республики знают весьма мало или, что еще хуже, имеют о наших работах совершенно неправильное представление¹. Неправильное представление о сущности наших работ является естественным следствием сочетания двух факторов, – с одной стороны, недостаточной осведомленности о наших производственных работах, и с другой – появления в печати ряда книг под названием "Горная Геометрия", которые либо трактуют о совершенно иных предметах, либо, если и есть в них некоторые общие точки соприкосновения с объектами наших работ, имеют иные конечные цели и методы анализа.

В настоящей статье я ставлю перед собой задачу дать краткую характеристику как теоретической, так и прикладной части развиваемой на Урале (ВТУЗ, научно-исследовательский институт, промышленность) новой научной дисциплины, именуемой здесь Современной Горной Геометрией.

Введение

Объект, т.е. основной предмет, который находится в поле зрения Современной Горной Геометрии, может быть определен двояко, в зависимости от того, будем ли мы иметь в виду теоретическую или практическую часть Современной Горной Геометрии.

В своей теоретической части это – физико-математический или, если угодно, геометрический анализ геохимического

¹ По не зависящим от нас обстоятельствам мы не опубликовывали до сих пор наших работ ввиду отсутствия соответствующего издательского аппарата и ввиду большой технической сложности таких изданий, требующих красочного выполнения в натуральном масштабе весьма сложных многочисленных график. Есть надежда, что в ближайшее время издательский аппарат будет наложен.

*Перепечатка из журнала "Социалистическая реконструкция и наука", 1932, Вып. 7, С. 42–78.

п о л я в связи с целым рядом следствий, вытекающих из этого анализа.

В своей прикладной части Современная Горная Геометрия может иметь своим объектом и промышленно-геологическую разведку недр, и соответствующие задачи горного искусства, и рационализацию проектирования по горному искусству и др.

Конкретно-теоретическая часть особенно останавливается на геометрическом анализе топографической поверхности, теоретическое значение которой является прямым следствием общего анализа геохимического поля [1]. Далее теоретическая часть особенно останавливается на различных математических действиях над топографическими поверхностями, ввиду особенного прикладного значения производных топографических поверхностей.

В прикладной части Современная Горная Геометрия останавливается главным образом на рационализации промышленного анализа недр, на рационализации общей постановки промышленных разведок, на рационализации отчетных разведочных карт и планов.

Прикладная часть уделяет подобающее внимание и гидрогеологии.

В поле зрения прикладной части включаются и вопросы горного искусства, которые могут быть рассматриваемы как иллюстрации громадного практического значения современных разведочных геометрических пластовых карт.

Основной метод, которым пользуется Современная Горная Геометрия в освещении и разрешении промышленно-производственных вопросов, есть метод изолиний, теоретическое и практическое значение которого вытекает из общего теоретического анализа геохимического поля.

Часть теоретическая

А. Сущностью теоретической части Современной Горной Геометрии является теория геохимического поля недр Земли. Тут необходимо сейчас же оговориться, что теория геохимического поля имеет реальный смысл лишь постольку, поскольку она находится в полном согласии с наблюдениями и соответствующими опытами.

Итак, допустим установленным, что недра Земли – сложный комплекс геохимических полей и форм залеганий, включая сюда и формы (поверхности) нарушения (первоначальных форм).

Далее примем, как исходное положение для дальнейшего, что геохимическое поле вообще является полным аналогом геофизического поля, т.е. если характерные свойства этого поля выразить для любой точки соответствующим числом V , то эти свойства могут быть рассматриваемы как функции точки и времени, т.е.

$$V = (x, y, z, t).$$

Причем функция V удовлетворяет следующим четырем условиям:

1) условию конечности, т.е. значение V не может быть равно ∞ .

2) условию однозначности, т.е. для данной произвольной точки поля (x, y, z) и для данной эпохи t функция V имеет только одно определенное значение;

3) условию непрерывности, согласно которому с незначительным (бесконечно убывающим) перемещением точки наблюдения соответственно незначительно (т.е. тоже порядка бесконечно убывающей) изменится и количественная характеристика поля;

4) условию плавности, согласно которому поверхности одинаковых значений для V не имеют ни острых углов, ни особых точек.

Б. Если геохимическое поле, или точнее, функция V выражающая количественную характеристику этого поля, удовлетворяет вышеприведенным условиям, то такое поле, как то доказывается в общей теории силового поля, имеет слоисто-струйчатую структуру (рис. 1).

Это первое интересующее нас следствие говорит нам, что характеризуемые определенным числом геохимические свойства поля вообще могут быть соединены в систему непрерывных поверхностей, изоповерхностей, и что эти изоповерхности или яснее – изо- V -поверхности не пересекаются между собою (как бы близко они друг к другу ни подходили) и равным образом они не могут и касаться друг друга. Геометрическое место нормалей к названным изоповерхностям составляет своего рода геохимический поток (что является полным аналогом соответствующего физического силового поля) [2].

Второе следствие, имеющее для нас особенно важное значение, заключается в том, что любое плоское сечение геохимического поля приводит к системе непересекающихся изо- V -линий, т.е. линий одинаковых геохимических или иных соответствующих (например, промышленных) свойств этого поля (рис. 2).

В. Совершенно ясно, что если рассматриваемую нами плоскость сечения принять за плоскость XOY , то числовые значения V , как расположенные в плоскости XOY , будут зависеть только от

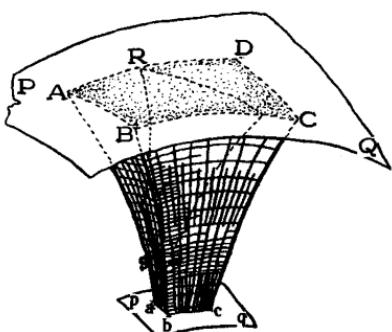


Рис. 1. Изображение модели слоисто-струйчатого геохимического поля. PQ и pq части двух изохимических поверхностей, которые в сечении с системой нормально к ним направленных струек образуют соответствующие системы точек $ABCD$ и $abcd$. RS – произвольное плоское сечение модели (на рисунке изображен контур этого сечения).

Рис. 2. Плоское сечение геохимического поля. $5' 5''$, $6' 6''$... $12' 12''$, $13' 13''$ – система непересекающихся изолиний одинаковых количественных показателей свойств исследуемого геохимического поля. Цифры – соответствующие ступенчатые отметки.

координат точек этой плоскости, т.е. только от них, и прежнее уравнение для V перепишется так:

$$V = \varphi(x, y);$$

при этом функция V сохранит, очевидно, все свои основные свойства – конечности, однозначности, непрерывности и плавности – и для данного плоского сечения. С другой стороны, функция

$$z = \varphi(x, y)$$

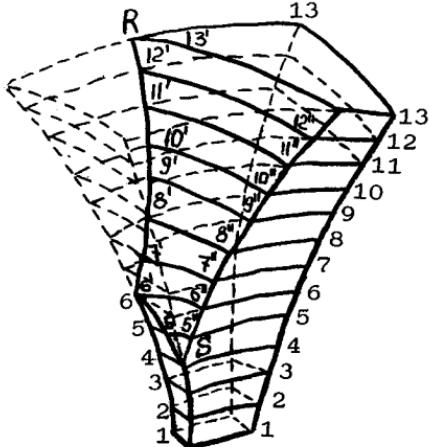
есть общее выражение для некоторой поверхности в пространстве [3]. Полагая таким образом $V = z$ и принимая во внимание все четыре условия, которым должно удовлетворять z , распределенные в плоскости сечения изо свойства геохимического поля мы отождествим с некоторой поверхностью $z = \varphi(x, y)$, или, другими словами, изо V отождествляются с изозетами. Нетрудно понять, что удовлетворяющая всем четырем вышеприведенным условиям поверхность есть поверхность топографическая, а изо V или изозеты – известные нам хорошо изогипсы.

Отнесенные к топографической поверхности и ее изображению в изогипсах четыре основные свойства геохимического поля могут быть перефразированы (освещены) следующим образом.

1. Условие конечности. Интерпретирующий свойства геохимического поля, рельеф соответствующей топографической поверхности не может иметь ни бесконечно высоких гор, ни бесконечно глубоких впадин.

2. Условие однозначности. Для данных произвольных в пределах плана x, y – координата z может иметь только одно значение. Как следствие – непересекаемость изогипс [4].

3. Условие непрерывности. Бесконечно малому перемещению точки (x, y) по плану отвечает и бесконечно малая перемена координаты r [5].



4. Условие плавности, имеющее в прикладной части особо важное значение, на планах в изогипсах выражается двояко: А) плавностью течения каждой отдельно взятой кривой (изогипс) и Б) плавностью изменения профилей между целой системой изогипс (плавность скатов).

Несколько подробнее об этом – ниже.

В рассматриваемом случае поверхность, аналогичная топографической поверхности, или просто, скажем, топографическая поверхность приобретает в анализе геохимического поля недр совершенно особое значение – значение особого математического алгоритма, аналогичного тому, чем в математическом анализе является уравнение.

Рассматриваемая под этим углом зрения система изолиний приобретает совершенно особый смысл графо-математического метода изображения определенного класса математических уравнений, приводящих к системе непересекающихся изолиний. Такой, например, смысл имеет графо-математический метод начертательной геометрии, – это не рисунок, не чертеж в обычно принятом смысле этого слова, это – определенный математический метод изображения функций. Эта мысль особенно подчеркнута математиком Маннгеймом в его безосной начертательной геометрии. И если начертательная геометрия, играющая столь важную роль в инженерно-строительном деле, является универсальным и незаменимым методом точного изображения форм, то метод изолиний, понимаемый в вышеуказанном смысле, является графо-математическим методом изображения пространства, заполняющей данную форму.

Итак, топографическая поверхность, рассматриваемая в ее целом под углом зрения ее геометрических свойств, является тем простейшим элементом, сочетание которых вообще рисует нам свойства массы, заполняющей рассматриваемое пространство или короче (условно) – свойства рассматриваемого пространства [6].

Г1. Остановимся несколько на геометрическом анализе топографической поверхности. Хочется предварить этот анализ некоторыми словами о руководящих мною при этом соображениях. Анализ основных свойств определенного класса геометрических поверхностей, казалось бы, естественнее всего вести, пользуясь методами анализа бесконечно малых, но возможен и другой путь – путь образов, путь ряда геометрических образов, находящихся в известной логической зависимости между собою^[7]. И этот второй путь ни в какой мере не стоит в противоречии с чисто аналитическим методом исследования, даже больше – геометрический образ или соответствующий комплекс образов в большинстве случаев является руководящим в исследованиях чистого математика, переводящего эти образы на язык дифференциальных уравнений и вытекающих из них, характеризующих рассматриваемые геометрические образы, выражений – уравнений и формул. Читатели, знакомящиеся шаг за шагом с приводимыми мною положениями и соответствующими об-

разами, без труда найдут чисто аналитическое освещение отдельных моментов рисуемой мною геометрической картины в специальных математических работах Бертрана, Серре и др., в соответствующих главах об интегрировании дифференциальных уравнений в отделе теории траекторий на плоскости и в пространстве.

Г₂. Общее и геометрически вполне правильное представление о топографической поверхности Земли мы получим, если несколько проанализируем лежащую перед нами топографическую карту, на которой нанесены целые системы водных бассейнов. Фиксируем наше внимание на каком-нибудь отдельном водном бассейне отдельной речной системы. Мы без труда наметим главное русло речной системы, без труда наметим ряд притоков этого главного русла, и без особого труда наметим дальнейшие ряды более мелких притоков во взаимном их соподчинении друг другу. Если представим себе ряд поперечных сечений русла реки в связи с ближайшими окрестностями, то русло реки в каждом таком сечении занимает наиболее низкое положение. Другими словами – русло реки в каждом произвольном его сечении занимает наименьшую высоту, если условиться все высоты для данной топографической поверхности вообще считать от некоторого достаточно глубоко расположенного уровня. Таким образом ясно, что русло реки с целой системой ее притоков является не чем иным, как геометрическим местом каких-то минимумов данной топографической поверхности. Нетрудно понять, что эти геометрические места минимумов, с которыми в рассматриваемом примере совпадают оси русла нашей реки и целой сети ее притоков, являются для данной поверхности единственными в своем роде линиями: направленная на такую поверхность вода сейчас же займет соответствующие наиболее низкие места, потечет сверху вниз, и таким образом обнаружит все эти геометрические места своего рода минимумов данной поверхности. Поскольку такие геометрические места являются неизменными и вполне определеными для данной топографической поверхности, то мы условимся называть их геометрическими и инвариантами, или короче – синими линиями данной топографической поверхности (синий цвет, лазурь – обыкновенное условное обозначение воды на топографических планах).

Для дальнейшего анализа представим себе, что мы построили модель рассматриваемой данной топографической поверхности, и чтобы в дальнейшем мы могли мыслить себе поверхность этой модели, как что-то возможно осязательное, представим себе, что вся видимая нами поверхность модели покрыта сплошь особой оболочкой. Пусть эта весьма тонкая оболочка-пленка, тщательно

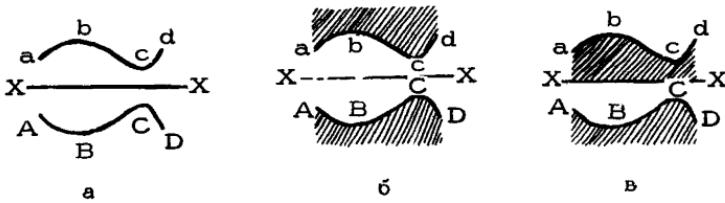


Рис. 3. К теории поверхностей правых, левых и обратной кривизны. Полная характеристика поверхностей предполагает сочетание трех смежных вертикальных сечений. На рисунке изображено только среднее из этих трех сечений. а - XX - ось симметрии, — — зеркало; А, В, С, Д - данная линия профильного сечения; а, б, с, д ее зеркальное отражение; б - правая и левая поверхности; в - поверхность обратной кривизны

покрывающая² поверхность модели, а следовательно, и повторяющая все формы ее рельефа, а вместе с тем все наши геометрические места минимумов, свободно отделяется от массива модели и удовлетворяет условию абсолютной жесткости [8]. Снимем нашу пленку и повернем изнанкой вверх так, чтобы воображаемая отвесная линия, пересекающая пленку, приняла бы опять отвесное направление, тогда совершенно очевидно, — отрицательные вдавленные синие инварианты, отвечающие речной системе, обратятся в соответствующую систему выпуклых инвариантов, которые являются не чем иным, как осями горных цепей; система минимумов обратится в систему максимумов [9].

Заметим, что полученная нами вначале негативная поверхность (матрица) может быть рассматриваема, как зеркальное изображение поверхности обратной кривизны (рис. 3). Случай поверхности обратной кривизны прекрасно и просто может быть продемонстрирован при помощи стереоскопа или при помощи весьма простого прибора, позволяющего правому глазу видеть то, что обычно видит левый глаз, а в это же время левому глазу видеть то, что обычно видит правый глаз. Подробно об этом — в другом месте.

Если топографическую поверхность земли можно определить, как поверхность, которая от отвесно падающих на нее лучей света

² Для наглядного демонстрирования рассматриваемого образа мы могли бы топографическую поверхность данной модели покрыть (облить) колодиумом или изготовить негативный отпечаток на манер того, как это делают скульпторы (глина — подлинник, клей столярный или желатин-глицерин-матрица, гипс — копия с подлинника). Аналогичная пленка может быть получена гальванопластически.

(например, солнца в зените) не дает тени (или, что все равно, для данных X , Y функция Z имеет лишь одно значение) [10] то в этом отношении очевидно прямая и обратная топографическая поверхность (негатив) являются тождественными. Вторую систему инвариантных линий условимся называть положительными или для краткости, где это бывает целесообразно – красными линиями. Синие линии в специальной литературе называются водосоединительными, а красные водораздельными линиями [11]. Обе системы наклонных инвариантных линий – синих и красных – должны быть пополнены инвариантными горизонтальными площадками [12] – красными и синими, которые могут в соответствующем пределе превратиться в инвариантные горизонтальные линии и инвариантные точки. Своебразной горизонтальной инвариантной площадкой является площадка, отвечающая пересечению красной и синей инвариантных, – так называемая седловинная площадка.

Г3. Реальный практический и теоретический смысл приведенного выше геометрического анализа топографической поверхности (инварианты и скаты) может быть показан на анализе вопросов по построению достаточно точной модели этой поверхности. Остановимся несколько на этом вопросе, тем более, что это имеет для нас еще следующее значение. Во-первых, пространственный образ "достаточно точной модели" топографической поверхности есть наиболее простая пространственная концепция некоторой отвлеченной идеи об определении и изображении данной топографической поверхности. Во-вторых, такая "достаточно точная инвариантно-скатная модель" может быть рассматриваема, как наиболее простая и естественная своего рода графическая система координат, с которой естественно могут быть сравниваемы и другие аналогичные графические системы. В-третьих, "достаточно точная модель", поставленная в связь с методом смежных изосечений (в частности изозет или изогипс), позволит установить надежный и весьма простой контроль о необходимом и достаточном количестве исходных точек наблюдений.

Пусть перед нами имеется топографическая поверхность и пусть требуется сделать достаточно точную модель – копию этой поверхности. При этом копировщику разрешается брать только координаты (X , Y , Z) отдельных точек данной топографической поверхности, другими словами, копировщику разрешается перенос отдельных точек данной поверхности на его копию делать только при помощи измерения координат. Очевидно, что при такой постановке вопроса (достаточная точность), этот вопрос сводится к тому, чтобы взять какое-то необходимое и достаточное количество точек, и вот это "необходимое и достаточное" может быть сделано различными способами при одной и той же допустимой погрешности в смысле отступления копии от подлинника.

Приступая к построению модели, прежде всего строим как бы два каркаса: один каркас, отвечающий системе синих линий, дру-

гой – системе красных линий, строим соответствующие инвариантные горизонтальные площадки, линии и точки, седловинные площадки. Когда каркас построен, необходимо промежутки между синими и красными линиями заполнить наклонными и поверхностями, для чего, очевидно, остается взять необходимое и достаточное количество соответствующих линий ската. Теперь, полагаю, довольно ясно, что вопрос о необходимом и достаточном числе точек переноса (наблюдений) расчленится так: во-первых, необходимое и достаточное число точек должно быть обеспечено для инвариантных линий – синих и красных, и для инвариантных горизонтальных элементов и во-вторых, предварительно должно быть выбрано (взято) необходимое и достаточное количество линий ската (необязательно линий наибольшего ската), а на каждый из них необходимое и достаточное число точек, с таким расчетом, чтобы каждая ломаная не уклонялась от соответствующей кривой более заданной или допустимой степени точности.

На других методах (метод вписанных или описанных многогранников, метод профилей) подобной копировки я останавливаюсь не буду, ограничусь только указанием, что эти методы с успехом могут быть применены там, где инвариантные элементы и линии ската не выделяются достаточно резко, или тогда, когда требуемую копию приходится строить, если можно так выразиться, вслепую, не видя самой модели или самого подлинника.

Положительные и отрицательные инварианты и линии ската являются наиболее характерными элементами топографической поверхности.

Поскольку топографическая поверхность является основным объектом (исходным образом), на котором в сущности построена теоретическая часть Современной Горной Геометрии [13], я позволяю себе несколько остановиться на некоторых соображениях, весьма тесно связанных с теорией топографической поверхности.

Г4. Геометрический анализ вопроса о построении "достаточно точной модели-копии" данной топографической поверхности приводит к логической необходимости введения определенного понятия "графогеометрической, структурно-графической или просто графической системы координат", как вполне определенной системы учета точек данной топографической поверхности. Это понятие включает в себя два существенных момента, – первый – вполне определенная система выбора основных (исходных) точек, с заданной степенью точности определяющих данную в натуре топографическую поверхность, и другой – вполне определенный метод (система) определения всех прочих точек этой поверхности на основе исходных. При этом конкретная группа исходных точек вообще является совершенно произвольной, определенной (неизменной) сохраняется лишь самая система выбора этих точек, в равной мере сохраняется неизменной и определенная

система перехода от этой исходной группы точек к произвольным точкам данной топографической поверхности. Так например, система инвариантно-скатная при совершенно определенных инвариантах данной топографической поверхности ни в какой мере не ограничивает наблюдателя в свободном выборе необходимого и достаточного количества наблюдательных пунктов. Или вот еще такая система для определения топографической поверхности: многогранник, грани которого для простоты представим себе плоскими треугольниками³, вершины которых совпадают с данной топографической поверхностью. Аналогичный многогранник мы можем мыслить себе составленным из граней, касательных к данной топографической поверхности. И та и другая системы многогранной поверхности могут определить данную топографическую поверхность с заданной степенью точности. Многогранник – это с одной стороны совершенно определенная система учета необходимого и достаточного количества наблюдательных точек, позволяющая с заданной степенью точности определение координат \mathbf{x} этой топографической поверхности по двум остальным, с другой стороны – определенность самой системы учета исходных точек ни в какой мере не ограничивает наблюдателя в свободном выборе необходимых ему точек, лишь бы каждый треугольный элемент поверхности с заданной (или допускаемой) степенью точности мог быть отождествлен с плоскостью. Выраженная в такой многогранной системе данная топографическая поверхность допускает совершенно свободное с заданной степенью точности определение координат произвольно взятой на данной поверхности точки.

Из целого ряда возможных структурно-геометрических систем для определения топографической поверхности совершенно особое место занимают системы смежных параллельных сечений с постоянным интервалом между секущими плоскостями, это прежде всего, система сечений параллельных горизонтальной плоскости XOY или система сечений изоэзет, или просто – система горизонтальных изосечений (например, изоикс сечений, изоигрик сечений, и вообще произвольных изовертикальных азимутальных сечений) и произвольных наклонных изосечений^[4]. Система изогоризонтальных смежных сечений занимает среди изосекущих систем совершенно особое место, исключительное место в том отношении, что это единственная система параллельных и смежных изосечений (изолиний) изогипсы, изозеты которой в проекции на горизонтальную плоскость никогда не пересекаются.

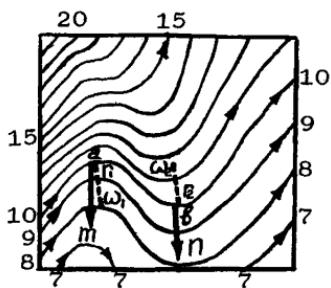
³ Вообще же грани рассматриваемого эквивалентного данной топографической поверхности многогранника могут представлять сочетание самых разнообразных по числу сторон и по площади прямолинейных плоских фигур.

Все перечисленные системы с точки зрения точности определения по ним координат произвольной точки данной топографической поверхности являются совершенно эквивалентными (равноценными) друг другу.

Если данная топографическая поверхность выражена в одной какой-нибудь системе, например, в системе инвариант-скатов, то переход к любой другой системе, например к системе изогипс, – дело чисто механического порядка: нужно только определенно знать зависимость между исходной системой и той другой, через которую мы желаем выразить данную топографическую поверхность. Из изложенного выше должна быть совершенно ясна полная аналогия между аналитическими системами координат и рассмотренными мною графическими или структурно-графическими системами. В связи с изложенным существенно важно усвоить, что перемена систем координат графических, так же как и аналитических, не может дать большей точности в определении координат точек самой топографической поверхности, и если мы вводим перемену одной системы на другую, то это делается исключительно из удобств определения самих координат. Так инвариантно-скатная система заключает минимальное (необходимое и достаточное) количество геометрических элементов, определяющих топографическую поверхность, но определение по ней самих координат произвольной точки топографической поверхности значительно сложнее, чем это может быть определено в системе изогипс (изозет). Поэтому система изогипс вытеснила все другие системы там, где нужна простота в определении координат точек топографической поверхности, достаточная точность и к тому еще и наглядность.

Г5. Система изогипс обладает еще целым рядом особых качеств, которые делают эту систему совершенно незаменимой, а именно – эта система служит надежным, наиболее простым и вполне естественным критерием (контролем) правильного соотношения между заданной степенью точности и количеством необходимых для этого наблюдений (наблюденных точек). Основываясь на изложенном, я ограничусь лишь окончательной формулировкой этого самоконтроля, напомнив читателю, что из четырех основных условий, которым должна удовлетворять топографическая поверхность в пространстве (часть теоретическая, п.в.), а вместе с тем и ее изображение в изогипсах, главную роль критерия в рассматриваемом случае играет условие плавности [15]. Если наблюдения, подчиненные той или иной исходной графической системе координат (системе инвариантов-скатов, системе эквивалентного многогранника, системе профилей или системе несвязанных между собой точек), будучи нанесены на план в определенном масштабе, приводят к системе изоступенчатых точек, которые в порядке интерполяции без всякой настяжки могут быть соединены в систему кривых линий, удовлетво-

Рис. 4. Относительное направление изогипс и линий наибольшего ската. Сплошные линии – изогипсы (изозеты). Цифры – ступенчатые отметки изогипс. ω_m , ω_n – направление падения поверхности, направление линий наибольшего ската. $\omega_1, r_1, \omega_2, r_2$ – радиусы кривизны изогипсы с отметкой 10. Направление падения всегда лежит справа в плане от направления соответствующей изогипсы



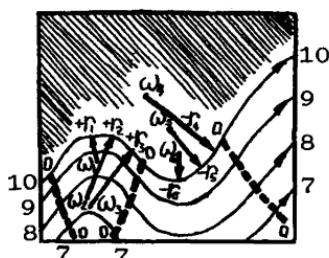
рающих условию плавности, как в отношении каждой отдельной изогипсы, так и в отношении последовательного изменения промежутков между ними (горизонтальных заложений), то мы имеем дело с необходимым и достаточным количеством точек наблюдений (и руководящих скатов и инвариантов).

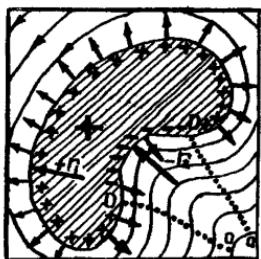
В случае излишних точек наблюдения – в процессе проведения изогипс совершенно отчетливо обнаруживается, что та же кривая с той же степенью плавности могла бы быть проведена и при меньшем количестве линий скатов или взятых на ней точек.

В случае недостаточного количества наблюдений, резкие переходы в кривизне изолиний, наконец полная неопределенность в ходе кривой, которая должна проходить через слишком редкую систему ступенчатых изогипс, обычно с полной очевидностью говорят о недостаточных наблюдениях.

Г6. Следующий этап в рассмотрении геометрического анализа топографической поверхности заключается в рассмотрении некоторых характерных особенностей (свойств) изогипс (изогоризонтов) топографической поверхности, стоящих в ближайшей связи с инвариантами и линиями ската. Воздерживаясь от каких бы то ни было выкладок и выводов, ограничусь простым перечислением этих характерных особенностей.

Рис. 5. Кривизна и радиусы кривизны изогипс топографической поверхности. Рис. 5 получен из рис. 4, после того как плоскостью с отметкой 10 срезана часть объема, расположенного выше этой плоскости. Пунктир – геометрическое место точек перегиба; кривизна линий в них равна 0 , $+r_1$, $+r_2$, $+r_3$, $-r_4$, $-r_5$, $-r_6$ – отрицательные и положительные радиусы кривизны





а



б

Рис. 6. Положительные (а) и отрицательные (б) изогипсы и характер изменения их кривизны. Пунктир – геометрическое место точек перегиба (системы смежных изолиний) Γ . Короткие стрелки – направление падения топографической поверхности. $+r_1$ и $+r_2$ – положительные радиусы кривизны, направленные в сторону падения. $-r_1$ и $-r_2$ – отрицательные радиусы кривизны, направленные в обратную сторону

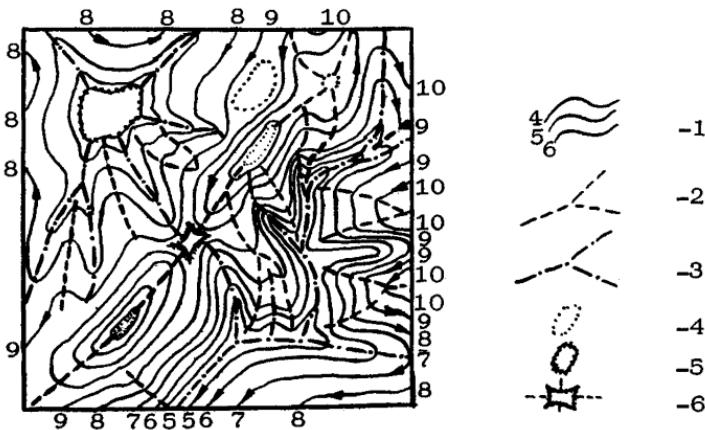


Рис. 7. Топографическая поверхность в изогипсах и главнейшие ее положительные и отрицательные инварианты. 1 – изогипсы и их направление; цифры – ступенчатые отметки. 2 – положительные инварианты (красные линии). 3 – отрицательные инварианты (синие линии). 4 – положительная инвариантная горизонтальная площадка (вершины гор, плато плоскогорий). 5 – отрицательная инвариантная горизонтальная площадка (дно котловины). 6 – горизонтальная (инвариантная) седловинная площадка

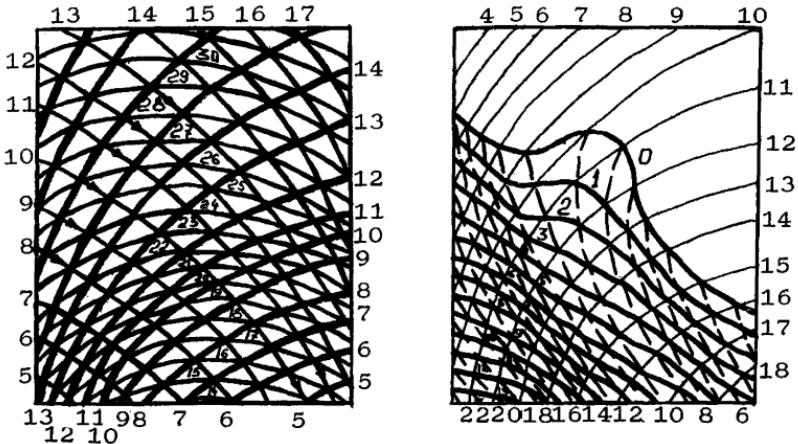


Рис. 8. Сложение топографических поверхностей. Тонкие линии – изогреты I поверхности. Двойные линии – изогреты II поверхности. Цифры: слева и сверху – ступенчатые отметки I поверхности; снизу и справа – отметки II поверхности. Цифры в плоскости плана – отметки III поверхности, которая является суммой первых двух поверхностей

Рис. 9. Вычитание топографических поверхностей. Тонкие линии – изогреты поверхности уменьшаемого (I поверхность). Штриховые линии – изогреты вычитаемого (II поверхность). Толстые линии – изогреты разности (изоглубины). Цифры сверху и справа – отметки уменьшаемого; цифры снизу – отметки вычитаемого; цифры слева – отметки разности (отметки изоглубины)

1. Топографическая поверхность $z = f(x, y)$ для данных x, y допускает только одно значение для z , другими словами – отвесная линия с топографической поверхностью сечется только в одной точке.

2. Любая горизонтальная линия z, x или z, y или вообще z, s (где s – произвольное горизонтальное направление) пересекает топографическую поверхность в четном числе точек (в случае касания обе точки сливаются в одну).

Как прямое следствие этих свойств (1 и 2) исходного уравнения вытекают следующие основные свойства изогипс:

3. Изогипсы не могут пересекаться.
4. Изогипсы – всегда замкнутые кривые линии.
5. Условимся в выборе направления изогипсы, а именно: за положительное направление изогипсы примем такое направление, при котором линия ската лежит справа (рис. 4).

Условимся еще в знаке радиуса кривизны и самой кривизны изогипсы.

6. Если радиус кривизны лежит со стороны линии ската, т.е. справа от принятого нами направления изогипсы, то такую кривизну и соответствующий ей радиус условимся считать отрицательными (рис. 5).

7. Если радиус кривизны лежит слева от направления изогипсы, то и радиус и саму кривизну условимся считать положительными.

8. Замкнутая изогипса в целом имеет направление, либо совпадающее с направлением хода часовой стрелки, либо обратное направление. Направленные по ходу часовой стрелки изогипсы окаймляют вогнутости и впадины, направленные против хода часовой стрелки - окаймляют выпуклости, первые горизонтали в целом являются отрицательными, вторые - положительными (см. рис. 6)[16].

9. Кривизна каждой горизонтали может, сохранив свой знак, изменять свою абсолютную величину, или может при этом изменять и свой знак, тогда ясно, что положительная изогипса, переменившая знак плюс своей кривизны на минус, должна очевидно дважды перейти через нуль, чтобы вернуться к своему знаку (см. рис. 6а), в равной мере отрицательная изогипса, переменяя знак минус своей кривизны на плюс, очевидно тоже должна дважды переходить через нуль (см. рис. 6б).

10. Совершенно очевидно, что в случае отрицательной изогипсы перемена знака связана с появлением определенного максимума кривизны, а в случае положительной изогипсы перемена знака с появлением минимума кривизны или, что все равно, связана с максимумом отрицательной кривизны.

11. Принимая во внимание условие непрерывности и плавности, которым должно удовлетворять уравнение топографической поверхности, ясно, что при перемене знака кривизны хотя бы одной изогипсы ряд смежных горизонтальных сечений вообще должен образовать либо геометрическое место максимумов, что отвечает оси горного гребня, либо геометрическое место минимумов, что отвечает осям тальвегов, долин и проч. (см. рис. 7). Такова связь формы изогипсы и соответствующих красных и синих линий [18].

12. В отношении скатов заметим, что линии наибольшего ската всегда перпендикулярны к соответствующим изогипсам в пространстве и кроме того эта взаимная перпендикулярность сохраняется и в ортогональной проекции на плоскость горизонта, т.е. и на плане.

Д. Переходим теперь к краткой характеристике основных действий над топографическими поверхностями. Тут полезно для ясности использовать в известной степени и общий вид уравнения поверхности в пространстве $\mathbf{z} = f(x, y)$.

Какая эта функция - мы не знаем, но знаем, что для топографической поверхности вообще она удовлетворяет приведенным выше условиям (см. В) конечности, однозначности, непрерывности и плавности.

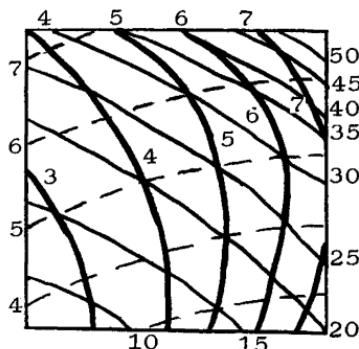
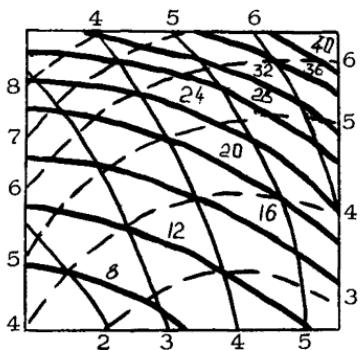


Рис. 10. Умножение топографических поверхностей. Тонкие линии – изозеты поверхности множимого (цифры внизу и вверху). Штриховые линии – поверхность–множитель (цифры слева и справа). Толстые линии – поверхность–произведение (цифры в плоскости чертежа)

Рис. 11. Деление топографических поверхностей. Тонкие линии – изозеты поверхности делимого (цифры снизу и справа). Штриховые линии – поверхность–делитель (цифры слева). Толстые линии – поверхность – частное (цифры сверху и в плоскости чертежа)

Сложение (рис. 8). Пусть даны две топографические поверхности $z = f_1(x, y)$ и $z = f_2(x, y)$. Пусть для некоторых определенных значений x и y , общих для обоих уравнений, координата z соответственно будет z_1 и z_2 ; тогда

$$z_1 + z_2 = z = f_1(x, y) + f_2(x, y) = F(x, y) \quad (1)$$

или

$$z = F(x, y). \quad (2)$$

Вполне очевидно, что для определенных x, y , т.е. для определенной точки на плане, координата z имеет только одно и при этом конечное значение, т.е. $z = F(x, y)$ есть тоже уравнение топографической поверхности.

Практическое применение сложения поверхностей имеет место при подсчете запасов (масс) при переменной объемной плотности и др.

Вычитание (рис. 9). Из равенства (1) прямо напишется

$$F(x, y) - f_1(x, y) = f_2(x, y); \quad F(x, y) - f_2(x, y) = f_1(x, y). \quad (3)$$

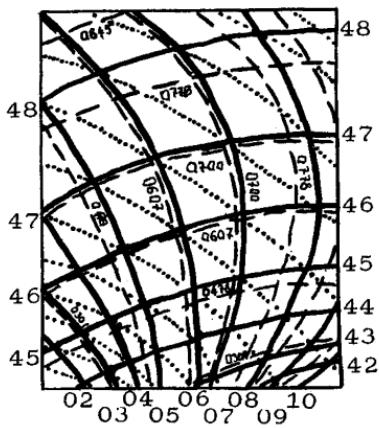


Рис. 12. Логарифмирование топографических поверхностей. Черточный пунктир – изолинии данной поверхности; сплошные линии – изолинии логарифмов этих поверхностей; точечный пунктир – изолинии логарифма произведения данных поверхностей. Цифры в плоскости чертежа: слева направо – логарифмы ступенчатых отметок I поверхности, снизу вверх – то же II поверхности. Цифры снизу – ступенчатые отметки логарифма I поверхности; слева и справа – то же II поверхности. Ступенчатые отметки логарифма произведения на чертеже не показаны

что очевидно говорит, что и разность двух топографических поверхностей есть тоже некоторая топографическая поверхность. Вообще, очевидно, алгебраическая сумма топографических поверхностей есть тоже топографическая поверхность.

Практическое применение вычитания поверхностей весьма широко [19], оно дает изоглубины, на нем основана рационализация планирования полевых разведочных наблюдений и пр.

Умножение (рис. 10). Возьмем две топографических поверхности

$$z_1 = f_1(x, y) \quad \text{и} \quad z_2 = f_2(x, y)$$

и соответственно перемножим их, что в связи с предыдущим замечанием, может быть изображено так

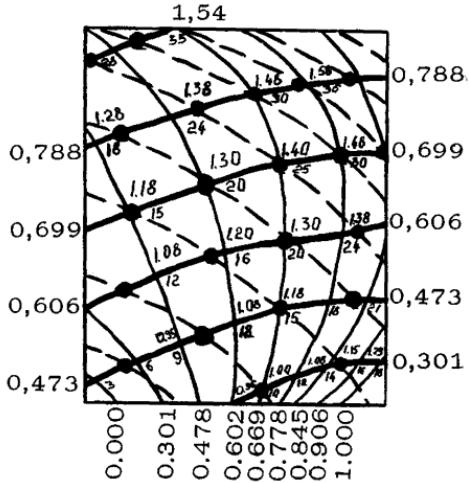
$$Z = z_1 z_2 = f_1(x, y) \cdot f_2(x, y) = F(x, y). \quad (4)$$

Поскольку для определенной точки на плане (x, y) каждая из координат Z т.е. z_1 и z_2 может иметь одно только соответствующее конечное значение, то очевидно, что для той же точки плана (x, y) и произведение Z может иметь только одно определенное и конечное значение, другими словами $Z = F(x, y)$ – произведение двух топографических поверхностей – есть тоже определенная топографическая поверхность.

Умножение топографических поверхностей получило особое значение в решении практического вопроса об определении запасов месторождений с переменной объемной плотностью.

Деление (рис. 11). Из равенства (4) непосредственно следует

Рис. 13. Логарифмирование топографических поверхностей. Сплошные тонкие линии – изолинии частного (первого множителя, I поверхности); двойные линии – изолинии делителя (второго множителя, II поверхности); пунктир – изолинии делимого (произведения двух множителей). Цифры: внизу – логарифмы ступенчатых отметок первого множителя; слева и справа – то же второго множителя. В плоскости чертежа у всех узловых точек – верхняя цифра – сумма соответствующих логарифмов, нижняя цифра – соответствующее логарифму число. Кронциркульные точки – точки, ступенчатые отметки которых являются кратными и имеют интервал (ступеньку)=5, что дает возможность сопоставить рис. 13 с рис. 11



$$\left. \begin{aligned} z_1 &= \frac{x}{z_2} = \frac{F(x, y)}{f_2(x, y)} = f_1(x, y) \\ z_2 &= \frac{x}{z_1} = \frac{F(x, y)}{f_1(x, y)} = f_2(x, y) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Частное двух топографических поверхностей вообще может быть рассматриваемо тоже как определенная топографическая поверхность, только в отношении частного необходимо оговориться, что поскольку значения z_1 и z_2 произвольны, то в случае пробегания стоящей в знаменателе функции через нуль частное от деления двух топографических поверхностей может обратиться в бесконечность, и следовательно, основное требование конечности, которому должно удовлетворять уравнение топографических поверхностей, этим нарушается. В связи с этим замечанием должен сказать, что в случае деления, конечно, вопрос должен быть предварительно обследован, но, независимо от этого вполне естественного и правильного теоретического соображения, должен также заметить, что случаи деления топографических поверхностей, с которыми приходится иметь дело в конкретном случае анализа геометрии недр, всегда носят такой характер, что топографическая поверхность, стоящая в числителе, заведомо может быть принята как произведение двух множителей, один из которых стоит в знаменателе.

Делением топографических поверхностей разрешается, между прочим, вопрос о средней плотности и о средней насыщенности данного месторождения.

Логарифмирование (рис. 12 и 13). Если дана топографическая поверхность $Z = f(x, y)$, то логарифм ее

$$\lg Z = \lg f(x, y) = F(x, y) = Z \quad (6)$$

тоже есть некоторая топографическая поверхность. Здесь опять необходимо сделать оговорку, что логарифмы берутся конечно от положительных значений координаты Z , а в случае отрицательных значений – от их абсолютной величины. Затем в случае логарифмирования топографической поверхности необходимо учесть, что диапазон численных значений обычновенных логарифмов для чисел от +1 до $+\infty$ такой же, как и для чисел от +1 до 0, т.е. и в первом случае этот диапазон есть 0... до $+\infty$, а во втором 0... до $-\infty$ другими словами – при логарифмировании данных топографических поверхностей может получиться разрыв сплошности, и $\lg f(x, y)$ не будет удовлетворять всем предъявляемым к топографическим поверхностям требованиям. По этому поводу необходимо сказать, что в области практических приложений все эти особые случаи, связанные с опасностью разрыва сплошности, могут быть легко устранены, например, подходящим выбором системы координат. Наконец, в этом обычно и нет никакой надобности, поскольку логарифмирование топографических поверхностей носит значение чисто вычислительного действия над топографическими поверхностями, уже приведенными в соответствующий нормальный вид, устранивший все указанные неудобства.

Рис. 12 и 13 иллюстрируют логарифмирование поверхностей и вычислительное значение этого логарифмирования. Для ясности соответствующие данные взяты из рис. 11, и проделана для иллюстрации (вычислительного метода) проверка рассмотренного выше деления: произведение поверхности-частного на поверхность-делитель должно дать поверхность-делюмое.

На рис. 12 черточным пунктиром изображены изолинии данных поверхностей, приведены логарифмы соответствующих отметок этих поверхностей, найдены соответствующие ступенчатые точки через одну десятую и проведены (сплошные) изолинии логарифмов данных поверхностей. Затем по правилам суммирования найдены ступенчатые отметки и изолинии логарифмов произведения данных поверхностей (точечный пунктир), по которым и переходят к соответствующим числам.

Но поскольку логарифмирование имеет обыкновенно значение вспомогательных промежуточных вычислений, вычерчивание изолиний логарифмических поверхностей не является обязательным, и в зависимости от характера задания заменяется более простыми графическими построениями. Простейший случай логарифмической обработки приведен для образца на рис. 13.

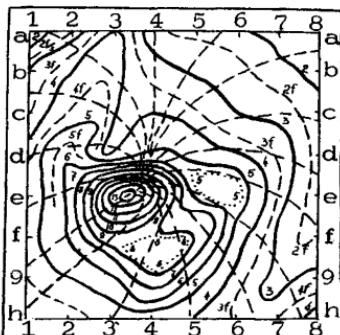
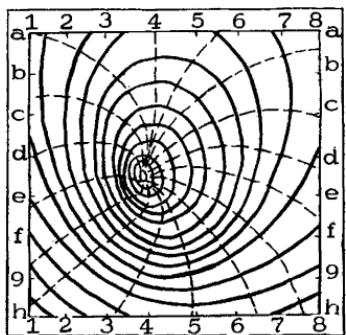


Рис. 14. Дифференцирование и интегрирование топографических поверхностей. Данная (дифференцируемая) поверхность $Z = f(x, y)$ и линии наибольшего ската

Рис. 15. Дифференцирование и интегрирование топографических поверхностей. Совокупная система изоградиентов и соответствующих векторных линий. Такая система эквивалентна дифференциальному топографической поверхности

Логарифмирование топографических поверхностей применяется обычно в сочетании с их умножением и делением.

Дифференцирование. Возьмем производную от данной топографической поверхности $Z = f(x, y)$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Z}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} f(x, y) \\ \frac{\partial Z}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial y} f(x, y) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

производная $\frac{\partial Z}{\partial x}$ очевидно есть тангенс угла, который касательная, проведенная в данной точке $M(x, y, z)$ топографической поверхности и лежащая в плоскости параллельной ZOX составляет с горизонтальной плоскостью XOY . Производная $\frac{\partial Z}{\partial y}$ соответственно относится к тангенсу угла, лежащего в плоскости ZOY . Каждый из этих тангенсов является очевидно мерой степени подъема или степени падения топографической поверхности, рассматриваемых в данной на ней точке в определенных азимутах, $\frac{\partial Z}{\partial x}$ – в азимуте меридиана (NS), и $\frac{\partial Z}{\partial y}$ – в азимуте первого вертикала ($W0$).

Во избежание неопределенности в счете направления касательной условимся из двух возможных направлений принимать в расчет только восстание (подъем), т.е. считать направление касательной всегда вверх, тогда и азимут такого направления, который условимся всегда считать правым векториальным углом, считая

последний от точки N будет иметь всегда определенное и единственное значение. Эту производную $\frac{\partial z}{\partial x}$, $\frac{\partial z}{\partial y}$ или $\frac{\partial z}{\partial s}$ меру степени восстания топографической поверхности условимся называть градиентом топографической поверхности, причем азимут того направления, в котором может быть определен этот градиент, вообще может быть произвольным. Из всех возможных направлений, в которых может быть определен градиент топографической поверхности, особый интерес представляет то направление, в котором этот градиент достигает наибольшего значения. Это, очевидно, — градиент, отвечающий направлению наибольшего ската. Такое максимальное значение градиента в данной точке принято называть полным градиентом. Если полный градиент обозначить символом ∇ без всякого знака или со знаком ∇_n где знак n (*normal*) говорит о том, что главный градиент имеет направление нормальное к изогипсе (в пространстве и на плане), а градиент, отвечающий вертикальному сечению, азимут которого $= \alpha$ или так называемый азимутальный градиент, обозначим через ∇_α , то в теоретической части геохимического поля доказывается теорема, согласно которой

$$\nabla^2 = \nabla_\alpha^2 + \nabla_{(\alpha+90)}^2$$

для произвольной пары взаимно перпендикулярных градиентов, что может быть переписано так:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial n}\right)^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial s}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial (s+90)}\right)^2 \quad (9)$$

$$Z = F(x, y). \quad (10)$$

Не останавливаясь на частных случаях, когда производная $\frac{\partial f}{\partial n}$ обращается в ∞ или равна весьма большой величине, вообще же мы получим для $\frac{\partial f}{\partial n}$ ряд значений, удовлетворяющих всем условиям, предъявляемым к топографической поверхности, и таким образом мы и для $\frac{\partial f}{\partial n}$ сможем получить соответствующий график в соответствующих изолиниях или график изоградиентов (см. рис. 15). Топографический градиент, как величина, имеющая направление, численное значение и является функцией точки, есть, следовательно, в е к т о р. Две системы изолиний — изогипсы данной топографической поверхности и изоградиенты, наложенные друг на друга, определяют вполне всю систему векторов градиентов: если взять на плане произвольную точку (x, y) , то изогипсы первого графика дадут третью координату z и направление вектора градиента, а второй график даст его величину. Поскольку

изогипсы данной топографической поверхности являются указателями направления векторов градиентов (совпадают с направлениями линий наибольшего ската), то по данной топографической карте в изогипсах без труда можно составить соответствующий график векторных линий топографических градиентов. Таким образом, дифференцирование данной топографической поверхности приведет к особой карте (см. рис. 15), на которой имеются две системы изолиний — изолинии величины векторов градиентов топографической поверхности и линии направления этих векторов. Если данная топографическая карта носит характер скалярного поля, то ее дифференцирование приводит к изображению векторного поля. Полученную карту назовем векторно-топографической.

Дифференцирование и интегрирование приобретает особое значение при анализе вопросов о деформациях дневной поверхности при обрушениях подземных работ.

Интегрирование относится к векторно-топографической поверхности. В теоретической части Современной Горной Геометрии доказываются две теоремы: одна из них говорит о том, что если взять на векторно-топографической поверхности две точки А (x_1, y_1, z_1) и В (x_2, y_2, z_2), между которыми может быть проложен векторно-градиентный ход, то согласно первой теореме интеграл, взятый по произвольному векторному ходу между двумя точками, не зависит от фигуры векторного хода (не зависит от пути или от формы контура) и равен разности высот $z_2 - z_1$, т.е.

$$\int_{z_1}^{z_2} \nabla s \cdot ds = \int_{z_1}^{z_2} df = z_2 - z_1.$$

Вторая теорема гласит, что интеграл замкнутого векторного хода, проведенный по любому замкнутому контуру, равен нулю^[20]:

$$\int \nabla f ds = 0.$$

Не останавливаясь на деталях, которые к тому же и труднее поддаются более простому изложению, замечу только, что вторая теорема дает возможность ввести контроль в достаточную точность практических наблюдений и уравнять накапливающиеся при взаимном сочетании неизбежные погрешности наблюдений, а первая дает возможность найти необходимое и достаточное количество связанных между собою разностей Δz для восстановления в соответствующих изогипсах той топографической поверхности (скалярной), которая является интегралом в отношении обрабатываемой векторно-топографической поверхности. Векторно-градиентное поле задается обыкновенно в форме рис. 16 (а не рис. 15). Интегрирование рис. 16 приводит к рис. 14, т.е. к скалярной топографической поверхности.

Е. В результате всех рассмотренных нами основных элементарных действий над топографическими поверхностями мы приходим

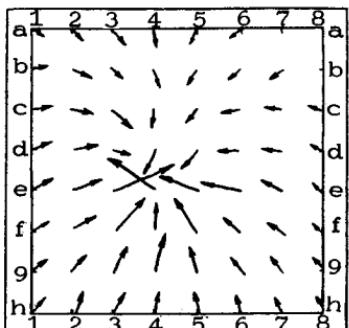


Рис. 16. Дифференцирование и интегрирование топографических поверхностей. План вектор-градиентного поля, интегрирование которого приводит к топографической поверхности, данной на рис. 14

каждый раз к какой-то новой топографической поверхности, характеризуемой соответствующими изолиниями, которые могут быть рассматриваемы как функции исходных данных изолиний. Неко-

рые из таких функциональных изолиний получили особо широкое применение в практической части Современной Горной Геометрии, например, изоглубины, изоскаты, изосекансы, изокотангенсы и др.

Ж. В этом общем, естественно весьма кратком обзоре теоретической части Современной Горной Геометрии мне не хотелось бы обойти полным молчанием изовертикальных поверхностей и стереоаксонометрических и стереоперспективных проекций. Первые выступают там, где необходимо дать характеристику векторного поля, характеризующую геохимический процесс, вторые получают свое значение там, где нужно ход какого-нибудь геохимического процесса ощутить в целом (без специальных рассуждений и анализов) в пространстве, когда необходимо ход процессов моделировать в пространстве. Эти же стереоаксонометрические проекции (в соответствующих изолиниях) применяются и для непосредственного в пространстве графотехнического или графомеханического решения некоторых специальных вопросов Современной Горной Геометрии и геофизики. Особый интерес в различных практических приложениях (в особенностях в области практической разведочной геофизики) получают стереоаксонометрические векторные диаграммы, которые позволяют "видеть" (т.е. ясно ощущать в пространстве) не только ход векторных линий, но и их количественную характеристику (например, в разведочных приложениях микромагнетизма, гравиметрии). Остановливаться на этом вопросе сколько-нибудь подробно нельзя уже потому, что для осмысленного к нему отношения пришлось бы отвлечься слишком далеко в сторону, именно в сторону психофизиологии восприятия пространства трех измерений, в сторону геометрического анализа этой своеобразной системы координат нашего органа зрения и в сторону анализа математической зависимости между этой природной системой координат и теми системами координат, с которыми мы оперируем в Современной Горной Геометрии. На анализ этого вопроса, хотя и связанного довольно тесно с методами Современной Горной Геометрии, я остановлюсь более подробно в

другой статье. В заключение полагаю достаточно упомянуть, что специальные стереоаксонометрические графики изготавливаются чисто механически при помощи разработанного мною особого специального прибора - стереоавтографа, на котором из данного в изогипсах графика топографической поверхности автоматически вычерчиваются два стереоаксонометрические графика, один для левого, другой для правого глаза. Оба графика исполняются в естественном масштабе разведочной отчетной карты и рассматриваются, вооружив один из двух глаз (левый или правый, безразлично) простой оптической частью, сводящей оба графика в один стереоскопический. Само собою понятно, что если с таких двух стереографик сделать в соответствующем уменьшении фотографические снимки, то для их рассматривания может быть применен и простой стереоскоп. Не без успеха в простейших случаях применяются и аналифи, изготавливаемые чисто механически на том же стереоавтографе.

Начиная с 1903 г., многочисленные стереоаксонометрические и стереоперспективные графики в связи с соответствующей монокулярной стереоустановкой (один глаз смотрит невооруженный, другой вооруженный) демонстрировались мною на всех бывших до войны съездах деятелей по прикладной геологии и маркшейдерии - в Томске, Петербурге, а после революции неоднократно в Свердловске.

Часть прикладная^[2]

Современная Горная Геометрия и геологическая разведка

А. В настоящем общем обзоре практических приложений Современной Горной Геометрии центральное место занимает промышленная геологическая разведка полезных ископаемых.

Место, какое мы отводим Современной Горной Геометрии в общем комплексе геолого-разведочных работ, в известной мере может быть представлено следующей схемой: 1) научная геология, 2) промышленная разведка, 3) техника разведки, 4) геофизические методы разведок, 5) Современная Горная Геометрия.

Дадим самую краткую характеристику каждого из этих элементов общего комплекса.

1. Геолог чистый ученый, будь то петрограф, будь то осадочник, ставит перед собою вопрос о единстве наблюдаемого им многообразия форм и процессов, синтетическая мысль ученого геолога в известной мере доминирует и подчиняет себе аналитические процессы мысли. Геологу-ученому важнее всего установить общие законы, которым подчиняется все многообразие форм многовечной жизни земли, наблюдаемых им в некоторый проходящий во времени момент. Научная геология - это весьма многогранная наука, если посмотреть на нее под углом зрения тех научно-геологического порядка дисциплин, которые, так сказать, неустанно работают на нее, - это

кристаллография, минералогия, петрография, геотектоника, геоморфология, палеонтология с исторической геологией, это – с одной стороны, а с другой стороны – весь этот колоссальный фактический материал научная геология должна самым тесным образом увязать с физикохимией, с геохимией, геометрией, геомеханикой, астрономией и даже биологией. На основе весьма обширного комплекса естественноисторических, геологических, физико-химических и математических наук научная геология постепенно и последовательно выковывает твердый фундамент тех исходных положений, которые составляют основы современной научной геологии, понимаемой в широком смысле этого слова.

2. Другая несколько картина рисуется, когда мы говорим о промразведке. Для характеристики задач промразведки полагаю небесполезным провести некоторую аналогию с медициной, с которой мы как будто более освоены. Мы прекрасно представляем себе две стороны деятельности медицины – чисто научную и практическую. Другими словами, наряду со специалистами учеными, так сказать законодателями научной медицины, существуют еще медики-врачи, в поле зрения которых – большой организм человека. Допустимо ли себе мыслить медика-врача, не знающего научных основ современной медицины – анатомии, физиологии и пр. и пр. Конечно, нет. А с другой стороны, весь практический и культурный смысл научной медицины заключается внесении помощи человечеству, которая без армии врачей осуществлена бы быть не могла. Они должны в известной мере владеть всеми достижениями их науки, чтобы правильно ставить диагноз болезни и назначать правильное лечение.

Нечто совершенно аналогичное мы имеем и в промразведке. Промразведчик обычно имеет в поле своего зрения определенное полезное ископаемое. С одной стороны, он должен быть вооружен всеми научными основами комплекса геологических наук, а с другой – у него должны быть и специальные познания в области возможного генезиса не только данного интересующего его полезного ископаемого, но и в области генезиса вообще рудных и нерудных месторождений. После тщательного осмотра (изучения) разведываемого участка или района (осмотр обнажений, шурфы, буровые скважины) геолог разведчик ставит определенный диагноз относительно возможности нахождения интересующего его полезного ископаемого, и тогда он – или ставит вопрос о наиболее целесообразных методах дальнейших более детальных разведок, или ставит определенный научно-обоснованный прогноз о невозможности нахождения этого полезного ископаемого при совокупности наличных геологических условий.

3. Третий момент в приведенном мною общем комплексе основных граней геологической разведки – техника разведки. Когда наши подземные работы ориентируются нередко на километровую глубину, ясно, что и все наши разведочные изыскания и поиски тоже

вообще должны быть ориентированы на соответствующую глубину. Такие требования, предъявляемые промразведчиками, требовали весьма совершенной организации глубокого бурения в смысле надежности, бесперебойности и быстроты работы, а также разработки методов быстрой проходки и других видов разведочных выработок и методов борьбы с водою и многое другое.

4. Современные геофизические методы разведок — магнитометрия, микромагнитометрия, электрометрия, гравиметрия, сейсмометрия и др. дают незаменимый другими методами материал, освещаящий глубинную структуру недр, и дают объективную картину дифференциации скрытых под наносами горных пород, что одинаково важно для разведок различных масштабов и диапазонов. Геофизические методы являются своего рода компасом, направляющим разведчика по пути наилучшего следования.

5. Представим себе, что вооруженный наукой и техникой опытный промразведчик вполне правильно поставил свой диагноз, рационально провел свои наблюдения и довел свою разведку до конца. Так как разведка ведется для промышленности, то, вполне естественно, разведчик должен спросить себя, чего вправе ждать промышленность от этой законченной им разведки. Разведка должна дать промышленности весь характеризующий разведанные недра фактический материал, необходимый предприятию, во-первых — для промышленно-экономической оценки месторождения, во-вторых — для рациональной постановки проектирования эксплуатационных работ, и всего рудничного хозяйства, и наконец, если это руда, — необходимо дать промышленно-заводскую характеристику этой руды, дать характеристику распределения ее объемной плотности в самом месторождении, дать характеристику пространственного распределения различных спутников руды — полезных и вредных, если это каменный уголь — дать промышленную его характеристику, дать закон распределения серы, золы, летучих веществ, коксумости, если это строительный материал — дать соответствующую его характеристику и т.д. Далее разведчик должен дать рудоуправлению исчерпывающую картину режима подземных вод. Необходимо при этом помнить, что добывающая деятельность рудников нацело связана с добывающей деятельностью заводов и фабрик, вообще с потребителем, следовательно рудоуправлению нужно в одинаковой мере знать и формы залегания, и запас, и промышленную характеристику добываемого полезного ископаемого.

И вот весь этот перечень основных вопросов, которые должны быть освещены промразведчиком, составляет основную задачу промышленно-производственных приложений Современной Горной Геометрии. Современная Горная Геометрия впервые смогла ответить на все поставленные промышленностью вопросы в форме пространственно-структурных график, эквивалентных моделированию. Громадное практическое значение этого графического моделирования заключается в том, что, имея перед собой такой график, рудоуправле-

ние и промышленность видят просто и ясно все то, что им действительно нужно видеть. Располагая графиками Современной Горной Геометрии, промышленник не должен ждать, чтобы специалист ему что-то показывал, а он сам без всякой посторонней помощи сумеет видеть в пространстве недр распределение интересующих его качеств руды. Полная образность порядка натуры (график, модель), ясно и отчетливо дающая возможность конкретно, так сказать, ощупать и непосредственно измерить (даже просто прочесть) все то, что обычно скрыто в недрах и что обычно до приложения методов Современной Горной Геометрии и не могло быть достаточно отчетливо определено, и не определялось, — все это дает ныне полное основание сказать промразведчику: "если ты знаешь, так покажи, и покажи так, чтобы всем было совершенно ясно и понятно, — а не можешь показать, значит и не знаешь". Промышленно-производственное значение Современной Горной Геометрии не только в том, что она может показать, изобразить, моделировать, а еще в том, что эти методы моделирования одновременно и подсказывают, что для этого промразведчик должен сделать, что и как он должен пронаблюдать, чтобы, пользуясь методами Современной Горной Геометрии, он мог с требуемой и достаточной степенью точности показать то, что действительно находилось в поле его разведки. Я уже говорил выше и позволю себе повторить здесь еще раз, что Современная Горная Геометрия не может родить что-то из ничего, но она выявила нам многие возможности, внесла разумные обоснованные элементы рационализации в полевые процессы самого ощупывания и выслушивания недр, она сделала то, что разведчик производит свои полевые действия все время с осмысленно открытыми, а не с закрытыми глазами, промразведчик-геометр все время мыслит пространственно.

Современная Горная Геометрия, как и всякая научная дисциплина, является, вообще говоря, многогранной с точки зрения ее практических приложений, и поскольку я касаюсь вопроса о том месте, которое Современная Горная Геометрия занимает в общем комплексе геологоразведочных моментов, поскольку я не касаюсь других ее прикладных сторон и не касаюсь и тех последствий, или, правильнее, возможностей, которые вытекают из правильного использования горногеометрических график. Этот вопрос в известной степени освещается дальше.

Совокупность карт, планов и разрезов, которыми разведчик обычно иллюстрирует свой отчет о произведенных им разведках, продолжает традиционно носить название пластовых карт, хотя в настоящее время круг деятельности разведчика не ограничивается одними пластовыми месторождениями, но распространяется на все

формы залегания рудных и нерудных месторождений. В связи с приведенной справкой о пластовых картах геологов-разведчиков ограничусь замечанием, что между прежними пластовыми картами и нынешними горно-геометрическими пластовыми картами мало общего: прежние карты, не знавшие современного метода изолиний, и не могли касаться пространственной характеристики тектоники залегания и такой же характеристики промышленных свойств полезных ископаемых или пространственного режима подземных вод.

Б. П р и н ц и п наименьших работ и п р и н ц и п оптимума. Один из весьма серьезных моментов рационализации полевых разведочных работ заключается в распределении и выборе разведочных единиц, — принцип "необходимо и достаточно" естественно должен быть руководящим в рассматриваемом вопросе. Принцип "необходимо и достаточно" на языке рационализатора-экономиста может быть сформулирован как принцип "минимума необходимого". Промразведчик должен работать под лозунгом "ни одной лишней буровой скважины, ни одного лишнего разведочного шурфа". Каждая разведочная единица должна быть строго обоснована.

Метод изолиний Современной Горной Геометрии подводит под этот вопрос чисто научный фундамент, анализ этого вопроса в общем его виде был рассмотрен выше⁴.

В настоящей статье обзорного характера я могу коснуться этого вопроса лишь в самых общих чертах.

Как известно, полевая практика для выбора необходимого и достаточного количества точек наблюдения, обеспечивающих заданную степень точности топографической поверхности, установила известные приемы, имеющие под собою определенные теоретические основания.

Все эти практические приемы, как мы уже видели, могут быть соединены в определенные группы (четыре метода): метод инвариант и скатов; 2) метод многогранников; 3) метод профилей; 4) метод массового определения превышений не связанных между собою точек, именуемый у нас часто методом "свободного плавания".

Все эти полевые методы выбора необходимого и достаточного количества линий и точек преследуют одну цель — составить соответствующую карту топографической поверхности в изогипсах. Тут необходимо усвоить себе азбучную мысль, что система взятых в поле точек и линий является равнозначенной той системе изогипс, которые по этим полевым точкам и линиям построены. Далее необходимо усвоить еще одну азбучную истину, что точность, которую мы можем извлечь из графика, зависит при прочих равных ус-

⁴ Ср. с соответствующей формулировкой теоретической части, п. Г.5.

ловиях от масштаба этого графика, т.е. от степени уменьшения натурь при изображении последней на графике. Многолетняя практика геолого-разведочных работ в известной степени установила главнейшие масштабы, например для самых точных геометрических работ установлен у нас масштаб 1:1000 и даже 1:500, для более общих обзорных работ 1:5000, 1:10000 и др. Приведенные соображения о точности графика связем с известными 4 условиями, которым должна удовлетворять топографическая поверхность, а следовательно и ее уменьшенное изображение в изогипсах. Но ведь уклонение нашего графика от этих условий может быть замечено лишь в том случае, если эти уклонения превзойдут точность масштаба графика, откуда и вытекает интересующее нас правило критерия о необходимом и достаточном количестве точек и линий, взятых разведчиком для достаточно точного изображения данной топографической поверхности, а именно выбрав подходящий масштаб для полевого разведочного графика, берем в натуре столько точек и линий, чтобы стоявшие по ним отдельные изолинии удовлетворяли условию плавности и чтобы этому же условию плавности удовлетворяя и последовательность отдельных групп изолиний, учитывая их по направлению линии наибольшего ската, другими словами – критериумом необходимого и достаточного является условие плавности изогипс и линий наибольшего ската. Отсюда практическое правило – весь процесс расположения разведочных единиц должен быть сконструирован так, чтобы в процессе разведки геолог-разведчик имел в поле своего зрения элементы соответствующей контролирующей его работу топографической поверхности. Эта контролирующая рационализацию разведки топографическая поверхность может относиться к поверхности залегания разведываемого полезного ископаемого, как в равной мере и к характеристике тех или иных свойств разведываемого полезного ископаемого. В первом случае одновременно с этой контрольной поверхностью необходимо вести и соответствующий график (в изолиниях) изоглубин, что позволит разведчику все время иметь перед собою две так называемые опасные границы – одну с отметкой нуль, которая является линией выхода, и другую – все время напоминающую о предельной глубине бурения или шурфования.

В краткой, чисто обзорного характера статье, трудно осветить все стороны затронутого вопроса. Как бы тот или другой метод ни был хорош, необходимо помнить, что шаблонное его применение в неподходящем случае может оказаться совершенно нерациональным. Систематическое рассмотрение этого вопроса совершен но выходит за рамки настоящей статьи.

Рассмотренный выше принцип наименьших работ далеко не всегда может быть проведен в чистом его виде, так как промышленная действительность часто преподносит разведчику ряд неожиданных сюрпризов на той же дневной поверхности: например, запроектированная по принципу наименьших работ буровая

скважина может оказаться в болоте, озере, среди заводских построек и т.п., и тогда по совокупности всех наличных соображений намечается другое относительно наилучшее место для такой скважины. Таким образом, принцип наименьших работ переходит в принцип оптимума.

В заключение рассмотренного вопроса укажу, что этот принцип проводится широко у нас на Урале (Бакал, Кизел, Половинка, Губаха, Усьва).

В. В предыдущем параграфе был рассмотрен метод плавности изогипс и соответствующей плавности линий наибольшего ската, как руководящее начало принципа наименьших работ и принципа оптимума, совершенно независимо от того, что является объектом наших разведочных изысканий — геометрический ли элемент подземной формы залегания, форма дислокации, или закон распределения плотностей и масс или промышленных свойств полезного ископаемого.

На базе этого общего принципа строятся и другие применения Современной Горной Геометрии в промразведке. Прежде всего промразведка должна дать промышленности форму залегания месторождения — пластового, жильного или линзообразного, и дать эту форму непременно в изолиниях. Раз изолиний поверхности залегания нет, значит характер залегания месторождения недостаточно разведен. Представляемые разведчиком разрезы — только первое приближение. В настоящее время рудоуправление, а вслед за тем и бюро проектирования горных работ уже не могут удовлетвориться старыми разведочными⁵ пластовыми картами. Карта в изолиниях — это объективный контроль работы разведки. Карта в изолиниях — это графическая пространственная модель месторождения. Точность такой карты, или, наоборот, допускаемая ею погрешность — все это отображается в характере ступенчатых отметок самих изолиний. Если достаточно точных данных нет, но по соображениям чисто геологического порядка или по аналогии разведчик имеет соответствующее основание представлять себе ту или иную форму залегания, то и в этом случае он должен настолько владеть графиком изолиний, чтобы, не прибегая к мало говорящим в таких случаях аналогиям, сравнениям и туманным в большинстве случаев описаниям, дать наиболее вероятный график воображаемой им формы, вполне понятный для каждого мало-мальски грамотного горного техника.

В настоящее время Горно-геометрическая лаборатория Уральского горного института, а также и Уральский научно-исследовательский институт прикладной геофизики и горной геометрии ведут на Урале обширные горно-геометрические работы по геометризации наиболее крупных уральских горно-рудных месторождений. Обширные

5 Ср. Часть практическая. п. А, 5.

работы наши (не опубликованные в печати) были демонстрированы на целом ряде Уральских областных конференций, а в самое последнее время на Уральской областной геологической конференции в марте 1932 г. и на январском Всесоюзном маркшейдерском съезде в Ленинграде и были признаны весьма важным моментом в реконструкции геолого-разведочного дела вообще и на Урале в частности.

Г. Следующий весьма важный момент, вводимый в современную горно-геометрическую пластовую карту, — это система изоглубин. Изоглубины в современном горном деле имеют, как увидим ниже, весьма большое прикладное значение. Начнем с рассмотрения определения объемов и масс.

I. Простейший случай определения объема V по методу изолиний, это — тот случай, когда мы имеем призматическое тело, ограниченное только с одной верхней стороны данной в изогипсах топографической поверхностью и оконтуренное с боков соответствующей заданию цилиндрической поверхностью, а снизу подсеченное горизонтальной плоскостью. Выработанных нашей лабораторией методов определения объема два, — метод призматоида, отличающийся наибольшей точностью, т.е. с наибольшей точностью учитывающий данную систему изолиний, и метод так называемой палетки, отличающейся наибольшей простотой и дающий прекрасный контроль в работе. Если тело однородно и его объемная плотность Δ постоянна, то масса $Q = \Delta V$.

II. Определение объемов V массивов, ограниченных сверху и снизу производными топографическими поверхностями и оконтуренными с боков соответствующей вертикальной цилиндрической поверхностью (что эквивалентно данной на плане границе), проще всего, скорее всего и с точностью, вполне отвечающей точности исходных данных, производится методом изоглубин. Вот схема этого определения.

1. Проводятся изоглубины, ставятся соответствующие ступенчатые отметки $\{ = z_o - z_u$, где z_o — ступенчатая отметка верхней поверхности (*obere Oberfläche*), z_u — ступенчатая отметка соответствующей изогипсы нижней (*untere Oberfläche*) поверхности, $\}$ — ступенчатая отметка изоглубины.

2. Отметки изоглубин $\}$ рассматриваются, как отметки изогипс некоторой новой (фиктивной) поверхности, сверху ограничивающей собою тело эквивалентного объема V , ограниченного снизу горизонтальной плоскостью и с боков той же цилиндрической поверхностью.

3. Техника определения кубического содержания этого объема не представляет никаких затруднений и проще всего и скорее всего может быть осуществлена предложенным мною методом палетки, что весьма удобно еще в том отношении, что метод палетки допускает в кратчайший срок сделать контрольный пересчет, исходя совершенно из других данных. Наиболее точное определение

объема V дает метод призматоида. Если $\Delta = \text{Const}$, то масса $Q = \Delta V$.

III. Определение объема пласта, заданного соответствующими изолиниями и ямами. Геометрическая пластовая карта пласта может быть составлена двояко: либо на карте даны изолинии висячего и лежачего бока пласта, либо дана топографическая поверхность только одного какого-либо бока, например, висячего, тогда при этом прибавляются изолинии мощности пласта.

В каком бы виде геометрическая пластовая карта ни была дана, для подсчета объема этого пласта вводим так называемые изосекансы. Принимая изосекансы за изогипсы, мы получим новое фиктивное тело, объем которого теоретически в точности равен объему пласта и масса $Q = \Delta V$.

IV. Масса (вес, тоннаж) Q полезного ископаемого в простейшем случае практики может быть рассматриваема, как произведение из объема V на вес Δ соответствующей единицы этого объема (Δ - объемная плотность) $Q = \Delta V$. Таким образом, в этом простейшем случае однородности массы, сохраняющей свою объемную плотность Δ на протяжении всего объема и весь вопрос определения Q сводится к определению объема полезного ископаемого V . Об этом речь была в предыдущих пунктах.

Вопрос значительно осложняется в случае неравномерного распределения массы полезного минерала или металла в общей массе породы. Метод изолиний впервые решает этот вопрос теоретически точно, практически просто. Таким образом, метод изолиний Современной Горной Геометрии вносит в этот вопрос определенность, ясность, полную объективность, заменив прежние методы с вероятной "средней плотностью", вносящие неопределенность, субъективизм и даже произвол. Сущность решения заключается в следующем: если поверхность закона распределения масс помножить на поверхность, образуемую соответствующими изоглубинами - изогипсами, то произведение дает верхнюю поверхность прямой призмы, объем и масса которой эквивалентны искомым V и Δ и могут быть определены методом призматоида, либо методом той же палетки с желаемой степенью точности.

Д. Современная Горная Геометрия должна, полагаю, оказать весьма серьезное содействие гидрогеологии. В самом деле, все гидрогеологические процессы происходят на пространстве недр земли. Именно - процессы. Тут и направляющее значение форм, ограничивающих водонепроницаемые горные породы, и формы внутреннего строения пород водопроницаемых, напор подземных вод, и многое другое, что может быть характеризовано числом и отнесено к определенным точкам пространства. А ведь все это - и формы, и пространственная характеристика заполняющего эту форму вещества - все это может быть так просто учтено методами Современной Горной Геометрии. К сожалению, приходится иногда дока-

зывать, что Современная Горная Геометрия не есть вовсе тот легендарный рабдомант с его волшебной лозой, которая помимо организации сложных наблюдений могла бы вешать, как оракул. Современная Горная Геометрия – это все же только метод и разумный руководитель, подсказывающий, как исследовать и как изображать геохимические процессы недр на бумаге и как моделировать пространственно графически эти процессы. Современная Горная Геометрия по существу своих методов намечает следующие четыре момента характеристики режима подземных вод.

1. Геометрическая характеристика поверхностей водонепроницаемых горных пород и такая же характеристика пород водопроницаемых. Вытекающая из этого характеристика (геометрическая) "горизонтов подземных вод".

2. Напор подземных вод.

3. Коэффициент расхода в единицу времени при определенном напоре и площади истечения, что эквивалентно характеристике водопроницаемости горных пород.

4. Химизм подземных вод и другие свойства рассматриваемого гидрогеологического потока.

Каждый из перечисленных четырех моментов, как я уже говорил, может быть прекрасно геометризован, необходимо только организовать соответствующие наблюдения и выработать соответствующую методологию наблюдений.

Само собой понятно, что параллельно с анализом режима подземных вод должны вестись аналогичные систематические наблюдения режима вод дневных. Прежде всего гидрогеолог или гидротехник-инженер должен иметь в своем распоряжении соответствующей точности гипсометрический план микрорельефа дневной поверхности с учетом всех бассейнов дневных вод, растительности, водопроницаемых свойств почвы, с полной характеристикой общего потока вод каждого бассейна, с учетом всех карстовых явлений, он должен располагать метеорологической и климатической характеристикой района и т.п. Все характеристики режима дневных вод должны быть представлены непременно в изолиниях.

Гидрогеолог не может и не должен изолировать анализа режима подземных вод от аналогичного анализа вод дневных.

Современная Горная Геометрия намечает известный план промышленно-гидрогеологических работ, дающий возможность инженерам рудоуправления оперировать над режимом подземных вод так, как это делает специалист инженер-гидролог в отношении режима сложной сети городского водного хозяйства – водопровода и канализации. Гидрогеология должна привести все свои работы, где бы они не велись, к своего рода общей единой системе координат. Существенно важно, чтобы гидрогеологические работы смежных районов и смежных участков могли, в силу правильной их постановки, взаимно дополнять друг друга. Только при такой постановке мы сможем постепенно и последовательно подойти к кинетике (прост-

ранство и время) и к динамике подземных вод. Все подобного порядка вопросы возникают при ближайшем ознакомлении с таким грандиозным и грозным фактором жизни рудничного района, как Уральские карсты (Кизеловский каменноугольный район). Отдельно, особняком стоящие сведения о дебете какой-нибудь отдельно стоящей шахты или отдельной буровой скважины весьма недостаточны, чтобы вообще судить о каком-то режиме подземных вод, тем более, что для отдельных шахт водный режим, как функция времени, обыкновенно вовсе и не учитывается. Если посмотреть на дело гидрогеологии под углом зрения например уральской промышленности, в общем хозяйстве которой вопрос водоснабжения — с одной стороны и борьба с водою — с другой стороны с каждым днем становится все острее и острее, то полагаю, не будет преувеличением мысль, что промышленную гидрогеологию безотлагательно следует ввести в русло Современной Горной Геометрии, т.е. во все четыре элемента гидрогеологических наблюдений ввести элемент пространства (x , y , z) и времени с непременным условием характеристики всех четырех моментов графически в соответствующих изолиниях; кроме того, параллельно и в ближайшем контакте с гидрогеологией в соответствующих районах должны быть организованы систематические наблюдения за режимом дневных вод в связи с организацией соответствующей сети метеорологических и гидрометрических станций (пунктов). Вместе с этим вся совокупность комплекса этих исследовательских и наблюдательных работ должна безотлагательно опубликовываться в соответствующем печатном органе с непременным выражением результатов наблюдений в соответствующих графиках и изолиниях.

В этом отделе я ограничиваюсь указанием общего прикладного широкого значения Современной Горной Геометрии и не могу, естественно, касаться целого ряда вытекающих из затронутого плана (гидрогеологических работ) следствий — соответствующего развития техники глубинных наблюдений, подготовки соответствующих кадров и др.

Е. Геохимическое поле и его геометризация. Под геометризацией геохимического поля Современная Горная Геометрия понимает: а) организацию специальных наблюдений и б) составление график распределения физико-химических и промышленно-технических свойств разведываемого полезного ископаемого в общей его массе.

Говорить о громадном промышленном значении этого вопроса конечно не приходится. Работы эти пока только находятся в начальной стадии их практического применения, но то, что уже сделано, является ярким доказательством громадного промышленного значения геометризации промышленных свойств руд и минерального горючего, позволяющих при одном взгляде на карту ясно видеть, с чем в сущности рудоуправление или завод имеет дело, и сделать соответствующие умозаключения. Одна из первых наших работ по

этому вопросу заключалась в соответствующей обработке случайно попавших в заведываемую и руководимую мною горно-геометрическую и геофизическую лабораторию разведочных материалов Магнитогорского рудного месторождения. И хотя материал (буровые журналы в связи с соответствующими химическими анализами кернов) был далеко недостаточен, мы все же с возможной степенью точности составили для Магнитогорска ряд геометрических геохимических карт, изображающих закон распределения в общей рудной массе – фосфора, серы, железа, а также была составлена геометрическая пластовая карта в изолиниях, позволившая составить целый альбом последовательного хода и учета вскрышных работ.

Ввиду большого промышленного значения затронутого вопроса я приведу несколько справок о наших наиболее крупных работах самого последнего времени. В 1928–29 гг. мною был обработан буровой материал Новолевинского рудника Богомоловского комбината. Формально рудоуправлением вопрос был поставлен о точном исчислении запасов меди названного рудника, для чего, ввиду весьма неравномерного распределения входящих в состав линзы металлов, явилась надобность предварительного определения закона распределения этих металлов в рудной массе. Закон распределения объемной плотности металлов дал совершенно отчетливую картину в изолиниях, и соответствующая карта была использована для точного подсчета запасов меди.

Еще справка относительно наших работ на Бакале и Кизеле. На Бакале и Кизеле работают с прошлого года специально сорганизованные в этом направлении горно-геометрические экспедиции. Бакальские работы коснулись геометризации распределения железа, фосфора, серы, так называемого Объединенного рудника. Необходимо при этом заметить, что экспедиции пришлось обрабатывать опробовочный (химический) материал, собранный рудником в прежние годы, – материал, далеко не отвечающий тем условиям, которые вытекали из принципа наименьших работ или принципа оптимума. Тем не менее и наличный материал для всех трех названных выше элементов с соответствующей степенью точности дал вполне определенную отчетливую картину в изолиниях; отчет о работах был представлен тресту Востокоруда в 1931 г.

Обширные геометрические работы Кизеловского района касаются геометризации углей этого района. Кизеловская экспедиция в 1931 г. приступила и закончила часть обширных работ по геометризации распределения в Кизеловских каменных углях – золы, летучих веществ, серы органической, серы пиритной. Обширные графические отчетные работы сданы Кизеловскому рудоуправлению. Работы по геометризации Кизела продолжаются и в нынешнем году. В ближайшее время, надеюсь, Уралуглю удастся приступить к опубликованию всех наших работ по геометризации Уральских каменноугольных месторождений.

Относительно аналогичных работ в других районах Урала ограни-

чусь лишь простым упоминанием: Дегтярка, Калата, Карпушиха (цветные металлы), Богословский район (железные руды), Егоршино (антрацит) и др. При этом должен оговориться, что геометризация в названных районах не носит систематического характера; основных причин тут две, во-первых – отсутствие кадров геометров, кадров специалистов химиков аналитиков, во-вторых – отсутствие оборудованных химических лабораторий на местах, отсутствие помещения для чертежных и необорудованность чертежных множительными аппаратами (позитивная фотоальграфия и позитивная фотоцинкография).

Ж. Профильная характеристика пластового месторождения. Геометрическая характеристика линейных поперечных сечений пластового месторождения (по нормали к поверхности пласта) представляет некоторые характерные особенности, заслуживающие особого внимания. А именно, если взять сплошной ряд последовательно расположенных проб по нормали пласта и количественную характеристику (например, процентное содержание какого-нибудь химического элемента или соответствующего соединения) откладывать в виде ординат, приняв линию проб за соответствующую ось абсцисс, то в результате для каждого химического элемента определенного пласта получается весьма характерная кривая плотности распределения (насыщенности) этого элемента, которая в пределах данного пласта стойко сохраняет свою характерную форму. Совокупность таких графических характеристик, взятая на протяжении соответствующего интервала и обработанная по методам математической статистики, дает нам соответствующий тип кривой. Совокупность типовых характеристик для различных химических соединений рассматриваемого пласта является, с одной стороны, исходным материалом для составления характеристики поперечных нормальных профилей пласта, а с другой – сами по себе и отдельно взятые характеристики являются крайне существенными для разделения (т.е. отличия) и классификации целой системы однородных по внешнему виду пластов какой-нибудь определенной свиты пластов.

Графическое интегрирование таких химических профилей дает наиболее точные данные для суждения об изменении среднего содержания интересующего промышленность свойства полезного ископаемого (например угля) и для составления соответствующей геохимической карты пласта в изолиниях объемной плотности или процентного содержания этого свойства.

3. Методы изолиний Современной Горной Геометрии дают основание к рациональному обследованию того, что в анализе тектоники может быть названо законом соподчинения. Сущность и значение этого вопроса вытекает из следующих соображений. Представим свиту пластов осадочного происхождения в их, так сказать, первозданном ненарушенном состоянии. Это допущение с большей степенью вероятности рисует нам и определенную

геометрию поперечного сечения этой свиты, именно рисует нам систему вообще одинаковой мощности горизонтальных (почти) напластований (с тенденцией к очень постепенному выклиниванию). Представим себе далее, что эта свита подвергается процессу складчатости. Возникает вопрос о поведении отдельных пластов. В рассматриваемом случае воображению нашему рисуются два крайних возможных случая, — один, в котором отдельные пласти как листки книги при изгибе скользят один в отношении другого, и толщина книги, как сумма толщины отдельных листков, остается неизменной; и другой — когда листки этой книги склеены и составляют одно нераэдельное компактное целое; тогда при изгибе листки со стороны выпуклости испытывают растяжение, листки со стороны вогнутости сожмутся, и где-то внутри между этими крайними границами должна существовать нейтральная зона, и естественно, в последнем случае нормальная толщина такой книги в различном расстоянии от замка складки будет нарушена. В природе эти простейшие крайние случаи мало вероятны, во-первых, уже потому, что составляющие толщу осадочных образований пласти весьма различны по своим механическим свойствам, коэффициенты их пластичности вероятно находятся в большой зависимости от давления, при котором действовали изгибающие силы. Каждый отдельный пласт несомненно подвергался весьма сложному комплексу сил, действовавших вероятно вообще и не одновременно и создававших известные часто весьма сложные формы деформаций, нарушая первоначальное спокойное залегание. Так вот, интересующий нас вопрос состоит в том, чтобы по формам поверхностей напластования, доступным наблюдению, определить наиболее вероятный характер формы поверхности напластования, более или менее удаленной от форм наблюденных.

Метод решения, или правильнее сказать, метод освещения поставленного вопроса есть метод постепенного приближения в связи с переходом от более простой рабочей гипотезы к более сложной. Конкретно метод состоит в следующем: ведется наблюдение двух (или большего количества), так сказать, параллельных поверхностей данной свиты пластов, требуется построить в изолиниях некоторую вне первых лежащую поверхность графическими методами Современной Горной Геометрии, подчиняя ее закону первой степени $N=a+bn$, где n и N — нормали к данным поверхностям, a и b — постоянные коэффициенты. Ряд буровых скважин, проведенных "для проверки" нашей гипотезы, обнаруживает естественно расхождение между априорным определением иатурой, и это даст нам основание составить ряд новых уравнений вида $(N)=a+bn+cn^2$.

На дальнейшем ходе вычислений и график не останавливаюсь, скажу только, что иногда коэффициент c получается численно настолько малым, что различные значения (N) не выходят из пределов точности наблюдений. Тогда мы и для более удаленных по-

верхностей сохраняют в силе закон соподчинения первой степени. В практических исследованиях затронутого вопроса (Томск - Анжерка, дипломный проект инж. С.С.Курова) дальше выражения второй степени прибегать не приходилось. В настоящее время более обширный фактический материал надеемся получить от работ Кизеловской горно-геометрической экспедиции, ведущейся под общим руководством инж. П.А.Рыжева.

И. В заключение обзора промышленно-практических приложений Современной Горной Геометрии я хочу ограничиться хотя бы упоминанием о тех возможностях, которые открываются нам в теоретическом освещении весьма важного промышленно-практического вопроса о течении процесса деформации и масс в связи с неизбежными подземными обрушениями, как следствиями выемки полезного ископаемого. Эти подземные обрушения выражаются часто такими деформациями дневной поверхности (обвалы, провалы, трещины и др.), что расположенные в зоне этих обрушений каменные здания получают весьма серьезные трещины, нарушается устойчивость сооружений вообще, и если это заводское сооружение, то деятельность завода оказывается поставленной под угрозу остановки. Весьма серьезное положение получается и в том случае, когда в зону поверхностных обрушений попадут рабочий поселок или служебные рудничные или заводские постройки.

Этот большой и большой вопрос рудничного хозяйства - давно уже в поле зрения горных инженеров и геологов и имеет значительную литературу. Выработанные и установленные различными государственными комиссиями и отдельными специалистами учеными правила и положения об оставлении целиков в известной степени удовлетворяли нашу горную промышленность, пока мы не столкнулись лицом к лицу с нашими колоссальными темпами, определяющими и необычную скорость работ и необычный размах подземных горных работ, в свою очередь связанных с необычным по своему масштабу строительством гигантов заводов, обогатительных фабрик, химических заводов, рабочих городов и поселков. Вся эта стройка реализуется естественно тут же на соответствующей территории рудника. Вопрос о зонах обрушения стал перед горнорудничной промышленностью с новой силой и требует скорейшего освещения и разрешения. Организации, проектирующие и строящие заводы и фабрики, спрашивают, можно ли на данной площади безопасно строить, а с другой стороны - организации, проектирующие и реализующие обширные подземные разработки ввиду уже существующих заводов, ставят аналогичный вопрос о размерах предохранительных целиков. Старые правила и положения приводят часто к явно нелепым результатам. Как известно, вопрос об обрушениях был поставлен несколько лет тому назад НТС горнорудной промышленности, его маркшейдерским отделом. Собранный по этому вопросу громадный фактический материал (преимущественно по Донбассу) был предме-

том всестороннего обсуждения на одной из конференций маркшейдерского отдела НТС горнорудной промышленности. На Урале этим же маркшейдерским отделом НТС были организованы систематические наблюдения с привлечением к исследовательским работам и работников на местах (тресты), а в январе 1932 г. этот же вопрос об обрушениях и целиках был предметом обсуждения Всесоюзного маркшейдерского съезда в Ленинграде. Работами маркшейдерской конференции, январского маркшейдерского съезда названному вопросу было придано ударное значение, установлена условность действовавших до сих пор правил, которые не всегда могут быть проводимы в жизнь, привлечено к вопросу внимание профессиональных общественных и исследовательских организаций, а также приняты меры к дальнейшему освещению этого вопроса, как в смысле опубликования и систематизации уже накопленного фактического материала, так и в смысле его обработки и постановки систематических наблюдений над движением поверхности на местах.

Вопрос о зависимости между подземными катастрофами (обрушениями кровли выработки) и целым рядом других факторов, передающих катастрофу на поверхность, давно был в поле и моего внимания. В 1922 г. я читал доклад в бывшем УОЛЕ (Уральское общество любителей естествознания) на тему о значении горизонтальных маятников в освещении вопроса о перемещении масс при наличии подземных катастроф. Вопрос был освещен с чисто теоретической точки зрения и была демонстрирована модель такого прибора. Но в 1922 г. вопрос этот не имел никакой остроты. Затем тот же вопрос я поднимал на всесоюзном расширенном совещании маркшейдерской комиссии НТС, созванной на Урале в Свердловске в 1930 г., и на аналогичном совещании в Ленинграде в 1931 г.

От этих невольных фактических справок перехожу к характеристике сущности предлагаемого мною метода. Существенными моментами метода являются горизонтальные маятники (для наиболее тонких наблюдений) и метод изолиний Современной Горной Геометрии. Горизонтальные маятники, соответствующим образом распределенные на поверхности и в недрах, автоматически с громадной степенью точности регистрируют угловое перемещение масс в отношении вертикальной оси зем. Методами Современной Горной Геометрии на основании соответствующих фотографий строятся изоповерхности перемещения масс в исследуемом пространстве. Системы изоповерхностей (или изоточек) строятся через один и тот же интервал во времени. Применение стереоаксонометрических проекций позволяет наблюдать за ходом процесса в пространстве (трех измерений) и во времени. Не входя в детали, замечу, что работа наблюдательной станции должна быть снабжена службой времени и сопровождаться сейсмическими наблюдениями.

Только при такой достаточно широкой, хотя вместе с тем весь-

ма простой по существу, постановке систематических наблюдений на всех крупных рудничных предприятиях можно надеяться постепенно и последовательно пролить свет на процессы перемещения масс земной коры под влиянием подземных катастроф, т.е. обрушений кровли выработанных пространств, а также учесть влияние на ход процесса таких факторов, как внедрение воды поверхностной и подземной, взрывные работы при проходке, мировые сейсмические процессы и др. Такая постановка исследовательских работ в связи с соответствующим комплексом геологических факторов (петрография, тектоника, структура, текстура, кливаж, гидрогеология и др.) и соответствующими параметрами обрушения могла бы служить разработке не только методов прогноза ожидаемых событий на дневной поверхности, но, полагаю, могла бы послужить основанием для разработки вопроса о наиболее целесообразных конструкциях (типах) фундаментов под ответственные заводские установки, а в равной мере и для выработки соответствующих типов заводских построек. Всестороннее освещение этого вопроса, полагаю, не останется без некоторого влияния и на самый план и ход подземных работ.

В заключение настоящей главы, посвященной общему обзору главнейших промышленных приложений Современной Горной Геометрии, мне хотелось бы напомнить читателю, что в поле нашего зрения неизменно стояло – дать характеристику фактически уже ведущейся реконструкции нашей промышленной геологической разведки. Эта реконструкция получила свое начало на Урале благодаря установившейся действительно самой глубокой и самой тесной связи школы и производства. В этом очерке не место описывать, с каким действительно неподражаемым самозабвением сплоченный воедино коллектив учащейся молодежи и преподавательского персонала проводил в промышленную жизнь свои знания, а вместе с тем с каждым годом вырастал и сам, обогащаемый опытом живой производственной практики.

Я совершенно отчетливо вижу всю односторонность приведенного мною очерка, односторонность и существенный недостаток в том, что мне не удалось отметить того значения, какое наши работы имеют для рудоуправления. Не пришлось ни с какой стороны отметить и тех надежд, которые промышленными предприятиями возлагаются на дальнейшее развитие наших горно-геометрических работ. Предприятие живет многогранной жизнью, промразведочные работы – это лишь одна из многочисленных граней рудничного предприятия. И вот эта самая Современная Горная Геометрия стоит в самом тесном контакте со всеми гранями сложной жизни рудника. В самом деле, наудачу беру хотя бы современную маркшейдерию, да она так тесно связана с нашими горно-геометрическими работами, с этим методом изолиний, что нас разделяет только масштаб геометризации и зависящая от масштаба специальная методология. Возьмем эксплуатационный отдел. Ныне этот отдел без наших карт в изолиниях – ни

на шаг, и вполне естественно. Вот возник вопрос о синонимике пластов; часто десятки лет вопрос стоял неразрешенным (Урал-Кизел, Усьва), а разрешили его в конце концов наши геометры. Или вот еще — отдел капитального строительства проектирует закладку капитальной шахты, — опять-таки и этот весьма большой и ответственный по своим последствиям вопрос во всей его полноте освещается только методами Современной Горной Геометрии.

И все то, что ныне фактически делается на Урале, поддерживается довольно значительным количеством кадров горных инженеров, разведчиков-геометров, геологов-геометров, неустанно работающих и проводящих в жизнь эти новые уклоны более рациональных, более отчетливых и более обоснованных и объективных методов промышленной разведки.

Без всякого преувеличения и лишь отдавая должное колоссальным горно-геометрическим работам, которые дружно ведутся нашими молодыми инженерами на рудничных предприятиях Урала, мы можем говорить об уральской горно-геометрической школе.

В заключение укажем на решения Всесоюзной геолого-геодезической конференции Госплана (21 / IV 1932 г.), которая констатировала "факт глубокой и всесторонней разработки проф. П.К. Соболевским новой научной дисциплины — Современной Горной Геометрии (короче — метода изолиний) и широкого внедрения методов Современной Горной Геометрии в практику промразведки (Урал)".

Конференция предложила геологической промразведке "возможно шире использовать метод изолиний проф. Соболевского, вносящий ясность, четкость, определенность и пространственную наглядность во все операции геологической промразведки".

Рационализация всей постановки геологической промышленной разведки, т.е. выбор и распределение разведочных единиц, а также и обработка соответствующих наблюдений должны быть, согласно решению конференции, обоснованы соображениями и данными не только геологическими в широком смысле этого слова и геофизическими, но и горно-геометрическими (методом изолиний).

Отчетные геологические промразведочные карты должны быть, по возможности, геометризованы методом изолиний. В изолиниях должны быть даны характер залегания полезного ископаемого и все тектонические особенности, а также промышленные свойства полезного ископаемого; объемная плотность, процентное содержание металла или минерала, химические, минералогические, петрографические, и вообще все физико-химические и микротектонические свойства.

Подсчет запасов месторождения, смотря по состоянию данных наблюдений, должен быть базирован на методе изолиний как в случае постоянной объемной плотности, или насыщенности, так и в случае переменной плотности и насыщенности.

Результаты опробования — буровые скважины, шурфы, подземные выработки — должны быть интерпретированы геометрически.

Четыре основных момента промышленных гидрогеологических изысканий, определяющих характеристику режима подземных вод, должны быть приведены к соответствующим картам в изолиниях, а именно должны быть даны: 1) изолинии тектоники водонепроницаемых и водопроницаемых пластов (образований), характеризующих так называемые горизонты подземных вод; 2) изолинии напора; 3) изолинии расхода в единицу времени или коэффициент водопроницаемости горных пород; 4) изолинии химических свойств воды (и пород, проводящих и направляющих подземные воды), их температура, радиоактивность и пр.

При этом указанные четыре основных момента режима подземных вод должны быть освещены и увязаны с соответствующей характеристикой режима дневных вод, причем характеристика режима дневных вод должна быть дана в соответствующих изолиниях.

Общие вопросы тектоники должны быть освещены методом изолиний.

Конференция постановила немедленно организовать исследовательские наблюдения по выявлению процессов и зоны обрушений по предложенному П.К.Соболевским методу горизонтальных маятников в связи с соответствующими методами Современной Горной Геометрии.

ПРИМЕЧАНИЯ РЕДКОЛЛЕГИИ

1. Само геохимическое поле в данной работе в сущности не является предметом изучения.

2. Речь идет о физических полях со скалярным потенциалом (гравитационное, электростатическое и др.). Магнитное поле, к примеру, имеет векторный потенциал.

3. Для введения понятия топографической поверхности, строго говоря, не требуется геохимическое поле (необходимо использование поля гравитации). Рассматривая геохимическое поле, П.К.Соболевский косвенно подчеркивает, что речь идет не просто о поверхности, но ориентированной гравитационным полем (точное, полем притяжения).

4. Имеются в виду изогипсы разных высот. Изогипса данной высоты может иметь самопересечение (см. статью Шарого П.А. в данном сборнике).

5. Опечатка. Вместо r следует читать Ξ .

6. Рассматриваемая далее П.К.Соболевским практическая часть работы затрагивает измерение объемов, т.е. нелокальных характеристик топографической поверхности (см. статью Степанова И.Н., Флоринского И.В. и Шарого П.А. в данном сборнике).

7. По существу, П.К.Соболевским отмечена связь топографии как синтеза дифференциальной геометрии и теории поля с ее картографическим выражением, т.е. с геометрией структур поверхности раздела сред.

8. Наглядный пример плодотворного "отделения" формы от вещественного состава, полезность которого для анализа природных объектов, явлений и процессов осознана далеко не всеми природо-ведами (геоморфологами, почвоведами, геологами и др.).

9. Это – вопрос о математической эквивалентности системы тальвегов и водоразделов. Если они и не эквивалентны, то по физическим причинам (воздействие движения вещества в тальвегах).

10. Имеется в виду отсутствие пещер, гротов, обрывов и т.п. Условие, когда это имеет место, сформулировано в работе Шарого П.А. в данном сборнике.

11. Среди линий, называемых сегодня в геоморфологии и картографии структурными, П.К.Соболевский особо выделяет тальвеги ("водосоединительная линия") и водоразделы.

12. Множество особых точек горизонталей, изучаемое в работе Шарого П.А. (см. данный сборник).

13. П.К.Соболевский подтверждает, что геохимическое поле полезно только методологически, но геохимия не необходима для развития им топографических представлений.

14. Этот метод используется в дифференциальной геометрии. О приложении его к топографии см. статью Шарого П.А. в данном сборнике.

15. Этому условию в статьях данного сборника отдано предпочтение перед так называемыми фрактальными топографическими моделями. Причина в том, что понятие условия плавности направлено на выявление основных почвенных, геологических, географических закономерностей (см. статью Степанова И.Н., Флоринского И.В., Шарого П.А. в данном сборнике).

16. Здесь П.К. Соболевский вводит границу между долинами и приводораздельными территориями (в данном сборнике и ранее в наших работах эта граница названа горизонтальной морфоизографой нулевого значения) путем ориентации горизонталей и наделения знаком их участков. Знак минус отвечает долинам, а плюс – приводораздельным областям. Этим знаком отражается сближение или расхождение поверхностных потоков (см. теорему Шарого в его статье данного сборника).

17. Пунктирная линия – морфоизографа в методе пластики рельефа (топографическом методе вторых производных). В дальнейшем она независимо вводилась исследователями разных стран, например в Чехословакии (Й.Крхо), в ФРГ.

18. Здесь П.К. Соболевский отмечает, что тальвеги всегда лежат в областях конвергенции, а водоразделы – в областях дивергенции (в методе пластики – это "понижения" и "повышения" соответственно).

19. В частности, в почвоведении измерение мощности почвенных горизонтов фактически ведется путем вычитания поверхностей. В гидрогеологии таким путем определяется мощность водоносных

толщ. П.К.Соболевский проводил аналогичные операции картографически применительно к месторождениям полезных ископаемых.

20. Эти теоремы хорошо известны в математической теории поля, имеющего скалярный потенциал. В данном случае П.К.Соболевский фактически рассматривает двумерное векторное поле крутизны наклона местности (в приближении однородного гравитационного поля, см. статью Шарого П.А. в данном сборнике).

21. Приложение теории Соболевский существенно ограничил разведкой полезных ископаемых. Редколлегия полагает, что спектр возможных приложений значительно шире: геоморфология, почвоведение, геология, гидрогеология, геофизика, геохимия и другие науки.

СОДЕРЖАНИЕ

От редакторов	5
Степанов И.Н., Флоринский И.В., Шарый П.А. О концептуальной схеме исследования ландшафта	9
Шарый П.А., Курякова Г.А., Флоринский И.В. О международном опыте применения методов топографии в ландшафтных исследованиях (краткий обзор)	15
Шарый П.А. Топографический метод вторых производных	30
Флоринский И.В. О дешифрировании природных границ и генерализации изображений структур земной поверхности	60
Шарый П.А., Курякова Г.А., Флоринский И.В. О возможной роли перекопий долин в гидрогеологии	89
Викторов А.С. К построению количественных моделей ландшафтных рисунков в линейных сечениях для целей тематического дешифрирования	91
Степанов И.Н. Галогеохимическая концепция нормализации экологической обстановки Аральского региона	98
Шкилева Н.А. Метод пластики рельефа и проектирование мелиоративных систем	125
Ковалева А.Е. Сравнительный анализ почвенных карт Казахстана	135
Мамедов Г.Ш., Гаджиев Г.М. Спиральная почвенная зональность Малого Кавказа	139
Поветухина З.Ф. О "Карте систем земной поверхности и почвенного покрова части Средней Азии"	140
Орешкин В.Н., Лошакова Н.А., Хайтов И.Г. Структурно-геохимические аспекты распределения тяжелых металлов в донных осадках Аральского моря	144
Приложение. Соболевский П.К. Современная Горная Геометрия	156
Примечания редакторов	197

CONTENTS

Editorial	7
Stepanov I.N., Florinsky I.V., Shary P.A. On the Landscape Research Conceptual Scheme . .	9
Shary P.A., Kurjakova G.A., Florinsky I.V. On the International Experience of Topographic Methods Employment in Landscape Researches (the Concise Review)	15
Shary P.A. The Second Derivative Topographic Method	30
Florinsky I.V. On the Natural Borders' Recognition and the Earth Surface Structure Images' Generalization	60
Shary P.A., Kurjakova G.A., Florinsky I.V. On the Possible Role of Convergence Areas' Percolation in Hydrogeology	89
Victorov A.S. On the Line Profile Quantitative Models' Construction of Landscape Pictures for Thematical Interpretation	91
Stepanov I.N. Ecological and Reclamation Problems of Aral Region	98
Shkileva N.A. The Flow Structures' Method and the Reclamation Systems' Design	125
Kovaleva A.J. The Comparative Analysis of Kazakhstan Soil Maps	135
Mamedov H.Sh., Hagiev H.M. The Soil Spiral Distribution of Small Caucasus	139
Povetukhina Z.F. On "The Map of the Earth Surface Systems and the Soil Blanket of the Part of the Middle Asia"	140
Oreshkin V.N., Loshakova N.A., Haitov I.G. Structural Geochemical Aspects of Heavy Metal Distribution in Aral Sea Bottom Sediments	144
Appendix. Sobolevsky P.K. The Modern Mining Geometry	156
Editorial Board Notes	197

ГЕОМЕТРИЯ СТРУКТУР ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Сборник научных трудов

Отредактировано и подготовлено к печати в ОНТИ Пущинского
научного центра АН СССР

Сборник поступил в редакцию в ноябре 1990 г.

Редактор Р.Г.Цветницкая.

Технический редактор С.М.Ткачук.

Корректоры В.И.Дубровина, Л.М.Орлова.

Подписано в печать 19.09.91 г. Уч.-изд. л. 14,0.

Усл.печ.л. 12,75. Формат 84x108/32. Тираж 660 экз.

Заказ 3619Р. Цена 2 р. 80 к. Изд. № 286.

Отпечатано на ротапринте в Отделе научно-технической
информации Пущинского научного центра АН СССР.

Z. p. 80. x.

