

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ПУЩИНСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
ИНСТИТУТ ПОЧВОВЕДЕНИЯ И ФОТОСИНТЕЗА

ПРЕПРИНТ

И. В. ФЛОРИНСКИЙ

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЛИНЕАМЕНТОВ
И СТРУКТУР ЦЕНТРАЛЬНОГО
ТИПА: КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ
ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ**

ПУЩИНО·1992

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ПУЩИНСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
ИНСТИТУТ ПОЧВОВЕДЕНИЯ И ФОТОСИНТЕЗА

ПРЕПРИНТ

И. В. ФЛОРИНСКИЙ

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЛИНЕАМЕНТОВ
И СТРУКТУР ЦЕНТРАЛЬНОГО
ТИПА: КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ
ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ**

ПУЩИНО · 1992

Флоринский И.В. Визуализация линеаментов и структур центрального типа: количественные топографические подходы /Препринт. Пущино: ПНЦ РАН, 1992, 47 с.

Показаны возможности количественных топографических подходов в визуализации геологических линеаментов и структур центрального типа. Впервые в этих целях применен алгоритм Эванса. Обработка цифровой модели рельефа части Крымского полуострова и прилегающего дна моря позволила выявить субмеридиональную, северо-восточную и северо-западную линеаментную системы, а также ряд кольцевых структур. Эффективность использованных подходов доказана.

Для геологов, геоморфологов, специалистов по обработке данных дистанционного зондирования.

Florinsky I.V. Visualization of lineaments and ring structures: quantitative topographic techniques / Preprint. Pushchino: PRC, 1992, 47p.

Resources of quantitative topographic techniques in the field of visualization of geologic lineaments and ring structures are shown. To this purpose Evans algorithm was for the first time used. The digital elevation model of the part of the Crimean Peninsula and adjoint bottom was processed. Three lineament systems of submeridians, north-east and north-west directions and some ring structures were visualized. Effectiveness of used techniques was demonstrated.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования линейных, кольцевых, полигональных и криволинейных природных структур Земли достаточно актуальны. Информация о них находит применение в теории геологии и почвоведения, при поиске месторождений полезных ископаемых, инженерно-строительных работах, в других областях человеческой деятельности /Буш, 1986; Кац, Тевелев, 1987; Кац и др., 1990/.

Линеаменты и другие структуры могут быть зафиксированы при дистанционном зондировании Земли, геофизических, топографических, тематических съемках и картировании. Учитывая значительную зависимость свойств почвенного и растительного покровов (ландшафтных индикаторов этих объектов) от характеристик рельефа /Шарый и др., 1991/, которые, в свою очередь, связаны с геологической (тектонической) обстановкой, допустимо предполагать определенную топографическую выраженность большинства указанных природных структур¹. В дальнейшем будем называть их структурами топографической поверхности (СТП).

Важным этапом процесса изучения СТП является выбор метода их визуализации – обработки данных дистанционного зондирования (ДДЗ) и/или картографически закрепленной топографической, геологической и иной тематической информации.

Настоящая работа посвящена изучению возможностей визуализации СТП с помощью количественных топографических подходов. В связи с этим рассмотрены следующие вопросы:

- сравнительный анализ методов выявления СТП;
- теоретическое обоснование геологических (тектонических) индикационных свойств некоторых топографических величин;
- обработка цифровой модели рельефа (ЦМР) части Крымского полуострова и прилегающего дна моря с помощью алгоритма Эванса;
- феномен трех выявленных систем линеаментного поля – субмеридиональной и двух взаимоперпендикулярных диагональных;

- доказательство эффективности использованного подхода для визуализации СТП.

I. КРАТКИЙ ОБЗОР² АЛГОРИТМОВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ СТП

Типизация алгоритмов визуализации СТП по признаку "вид исходных данных" позволяет выделить четыре класса подходов.

А. Топографические. Исходные данные – горизонтали топографических карт и ЦМР. СТП выражены а) конфигурацией гидроэрозионной и орографической сетей (долин и приводораздельных областей, потоковых структур); б) цепочками холмов и депрессий.

Б. Тематико-карографические. Исходные данные – геологические, геофизические, геоморфологические, почвенные и прочие тематические карты и цифровые модели. СТП выражены конфигурацией разрывных нарушений, цепочками вулканов, интрузий, очагов землетрясений, формами почвенных выщелов и т.п., а также конфигурацией изолиний геофизических карт.

В. Дистанционные. Исходные данные – аэрокосмические фотографические, телевизионные, радиолокационные и сканерные изображения Земли в различных областях спектра. СТП выражены неоднородностями оптической плотности изображения а) гидроэрозионной и орографической сетей за счет различной освещенности участков рельефа; б) элементов ландшафта, меняющих отражающую способность в зависимости от положения в рельефе.

Г. Комплексные. Исходные данные – различные комбинации указанных выше.

Применительно к аналоговым и цифровым картам практически все алгоритмы визуализации СТП являются целевой генерализацией картографической информации /Флоринский, 1991а/.

I.I. Топографические подходы.

Выявление линеаментов по топографическим данным инициировал W.H.Noffs /1904/. Он отмечал, что уменьшение масштаба (генерализация) оптимизирует этот процесс, указывал на важность выбора картографической проекции для получения корректного результата. Качественная генерализация, анализ изогипс и структурных линий для выявления СТП проводилась неоднократно /Методическое..., 1977; Яброва, 1981; Федоров, 1983; Волчанская, Сапожникова, 1990/.

Для снижения субъективизма качественных подходов А.Б.Русанов и Л.А.Яброва /1973/ при выделении дугообразных и кольцевых долин использовали специальную палетку.³

Ряд авторов /Гостева и др., 1983; Зверев, Стыров, 1985; Федоров, 1991/ применили хорошо известные в науках о Земле подходы – тренд-анализ рельефа – разложение топографической поверх-

хности по определенному правилу в сумму поверхностей и их анализ /Флоринский, 1991а/.

Популярным подходом визуализации СТП стала цифровая отмывка рельефа⁴ (*shadow technique*, обзор методов дан В.К.Р. Норн /1981/) – моделирование его освещенности. Индикаторами СТП в этом случае являются конфигурации теневых и освещенных участков местности (как в случае ДДЗ в видимом диапазоне спектра, но исключается влияние атмосферы, метеоусловий, аномалий отражающей способности почвенного и растительного покровов, а также антропогена). К.Фукье *et al.* /1981/ показали, что моделирование низкого положения Солнца над горизонтом позволяет выявлять крупные линементы, а высокого – мелкие. Этот подход использовали Ж.М.Соуль /1978/, Г.Рохон /1981/, Р.Ф.Мур, С.Д.Симпсон /1983/, Б.С.Зейлик с соавт. /1985/. Применение цифровой отмывки в тектонических исследованиях эффективнее с научной и экономической точек зрения по сравнению со спектрональным и радиолокационным зондированием /Showengerdt, Glass, 1983/, но чревато появлением "теневых" артефактов /Wise, 1968/.

Сделаны попытки визуализации СТП с помощью количественного "выявления" тальвегов и водоразделов по ЦМР /U.S. Patent., 1987/. Однако, информация об экстремумах кривизны топографической поверхности (функциональные зависимости даны в работе П.А.Шарого, И.Н.Степанова /1991/) при этом не используется, что делает проблематичным корректность подобных алгоритмов.

Н.В.Качанов с соавт. /1988/ выявляет полигональные СТП с помощью цифровой обработки карт эрозионной сети, главным признаком является ее преемственная направленность.

Эффективно и наглядно визуализация долин и приводораздельных областей осуществляется при двукратном дифференцировании топографической поверхности и построении карт ее горизонтальной и вертикальной кривизн /Шарый, 1991/. Использование информации о горизонтальной кривизне (k_h) для выявления СТП на интуитивном уровне инициировал И.Н.Степанов /Выявление по топокартам..., 1983/. Позже была предпринята попытка объективизации этого процесса с помощью оптико-электронной низкочастотной фильтрации (генерализации) этих карт /Степанов и др., 1988/. Более объективным и общим подходом стал алгоритм И.В.Флоринского /1991б/, включающий генерализацию бинарных карт k_h (карт областей конвергенции и дивергенции) с помощью лапласиана функции Гаусса, построения остова полученного изображения и его согласованную фильтрацию. Приложение этого алгоритма см. в работе Г.А.Куряковой и И.В.Флоринского /1991⁵.

I.2. Тематико-карографические подходы.

Тематические карты для визуализации СП в основном используются для вспомогательных целей или в комплексных алгоритмах (см. п. I.4). Это вызвано двумя причинами: а) реальные пространственные связи СП со свойствами геофизических полей, геологической ситуации и элементов ландшафта изучены еще недостаточно; б) различия в подходах получения, интерпретации, картографического закрепления и генерализации тематических данных /напр., Заруцкая, Красильникова, 1989; Степанов, 1990/ могут приводить к невозможности корректного монтажа составляемой карты, из-за чего трудно распознаваемые структуры в лучшем случае будут замаскированы /Голд и др., 1975/.

Использование геологических карт для выявления линеаментов инициировал W.H. Hobbs /1904/. М.А.Чурилин /1980/, предполагая концентрацию дуговых структур вокруг некоторого центра, анализирует распределения вокруг него различных геологических признаков с целью возможного выявления СП. Некоторые возможности использования грави- и магнитометрических данных для выявления линеаментов показаны в "Методическом руководстве..." /1977/. О.А.Потапов /1984/, обрабатывая на когерентной установке фрагменты карты ме-гатрециноватости, получает их Фурье-спектры, монтирует карту роз-диаграмм и визуально определяет изометрические площадные аномалии направленности трещин, интерпретируя их как кольцевые структуры.

I.3. Дистанционные подходы.

Для выявления СП оптимально использование материалов радиолокации /Егоров, Сутовский, 1989/: при других способах дистанционного зондирования СП могут маскироваться облачностью, загрязнением атмосферы и более интегральным характером изображения. Кроме того, при работе в видимой области спектра слабовыраженные СП фиксируются, как правило, при определенных природных условиях: а) в весенний период, когда уменьшение плотности растительного покрова облегчает видимость рельефа, а максимальное увлажнение долин повышает контраст снимков, что существенно для работ в аридных регионах /Буш, 1983/; б) в утренние и вечерние часы, когда косое освещение может выявить важные с точки зрения визуализации СП детали рельефа /Зейлик и др., 1985/.

В последнем случае возможны артефакты /Wise, 1968/. Их причиной могут также стать антропогенные линейные и кольцевые объекты /Saul, 1978/, "физиоблемы" /Зайченко и др., 1981/, локальные сопряжения ортогональных и диагональных систем геологических разрывных нарушений, выраженных в рельефе /Рябухин и др., 1976/.

Распространение получили два качественных подхода – контраст-

но-аналоговый и ландшафтно-индикационный. Первый заключается в выделении по "фотоаномалиям" (тону и рисунку) ДДЗ линейных, кольцевых и прочих элементов изображения /напр., Федоров, 1983; Лисовцева, 1990/. Подход подвергается справедливой критике, в основном - из-за слабой обоснованности геологических индикационных свойств тона и рисунка ДДЗ /Кирсанов, 1990/. Ландшафтно-индикационный подход заключается в дешифрировании по ДДЗ элементов ландшафта, связанных с геологическим строением, прежде всего - генерализованного изображения гидроэрозионной и орографической сетей /напр., Борисов, Глух, 1982; Лисовцева, 1990/.

Субъективизм качественных подходов понятен. Потенциально слабая выраженность СТП как следствие длительного воздействия на них эндо- и экзогенных процессов, интерференция СТП разных порядков приводят к весьма сложной интегральной картине. Хотя Н.Н.Красильников /1986/ убедительно показал, что зрительная система человека эффективно осуществляет фильтрацию полезного сигнала из зашумленного изображения (вероятность правильного определения наблюдателем/прибором типа фигуры при неизвестных ее координатах и размере колеблется от 0,41/0,50 до 0,92/0,93), человек склонен аппроксимировать сложные сцены простейшими геометрическими фигурами /Кац и др., 1988/; существенен и фактор профессиональной установки /Деструктивный рельеф..., 1989/⁶.

Некоторая объективизация результатов возможна путем коллективной экспертной оценки (голосования) и независимой визуализации СТП несколькими исполнителями с последующей отбраковкой и обобщением результатов. Фотомеханическое решение последнего подхода осуществили В.Ф.Номоконова с соавт. /1978/.

Наиболее популярными количественными подходами к выявлению СТП стали методы аналоговой - оптической и оптико-электронной - и цифровой обработки (фильтрации, улучшения) изображений /напр., Прэтт, 1982/.

Д.А.Янущ с соавт. /1979, 1987/ использовали оптико-электронную частотную фильтрацию и фильтрацию по направлению⁷ для выявления линейных и кольцевых структур. М.М.Василевский с соавт. /1980/ для объективизации выделения кольцевых структур применили когерентную согласованную фильтрацию. Сравнительный анализ оптической плотности пикселов цифрового изображения путем их фотометрирования, повышение контраста и сепарация сцены на несколько "слоев" - основа алгоритма выявления линеаментов R.G.Burdick, R.A.Speirer /1980/. В этих же целях Н.Takahashi /1981/ разработал подход, включающий пространственное дифференцирование пикселов с помощью изотропного оператора, фильтрацию их по направ-

лению, квантование изображения на два уровня, построение его ос-това и отбраковку несущественных для пользователя линий. S.R.Xu *et al.* /1981/ описали алгоритм визуализации линеаментов, заключающийся в построении карты локальных аномалий оптической плотности, ее пространственном дифференцировании с помощью изотропного оператора по восьми направлениям и соединении локальных линейных сегментов. Л.Т.Шевырев /1985/ использовал для выявления кольцевых структур фотометрирование изображений.

Повышение контраста цифровых ДДЗ для визуализации линеаментов с помощью анизотропного оператора пространственного дифференцирования - лапласиана - проводили Н.В.Скуброва и Л.В.Тарасенкова /1987/. Цифровая обработка ДДЗ для выделения СТП - пространственное дифференцирование, линейное повышение контраста, квантование, частотная фильтрация и др. - осуществлена Р.М.Масюока *et al.* /1988/. В работе "Дистанционные исследования..." /1988/ кроме того реализуется нерезкое маскирование. Квантование и лапласиан для выявления СТП использовали Н.В.Качанов с соавт. /1988/ и И.К.Рундквист с соавт. /1990/. Описанные и аналогичные подходы лежат в основе вычислительного комплекса "Прогноз" для решения различных геологических задач /Гордиенко, 1988; Златопольский, 1988/.

Для автоматизации визуализации кольцевых структур предлагалось применять своего рода "ключи" - типичные характеристики азимутально-зонального распределения энергии спектра изображения характерных СТП /Дистанционные исследования..., 1988; Петров, Янущ, 1989/.

Улучшение ДДЗ путем фотопреобразований для выявления кольцевых структур демонстрируют В.З.Сахатов с соавт. /1987/.

Томографический подход к визуализации линеаментов описан А.С.Алексеевым с соавт. /1988/. Статистические подходы для выявления структур центрального типа предлагают И.А.Игуменова с соавт. /1987/. Н.Н.Авксентьева и Е.И.Латышева /1990/ основывают алгоритм визуализации СТП на представлении исходного изображения в виде суммы бинарных. А.П.Лопатин с соавт. /1990/ использовали непараметрический ранговый метод выделения сигнала с признаками линейной (дугообразной) ориентировки и относительно небольшой ширины фиксируемой зоны повышенной неоднородности оптической плотности.

I.4. Комплексные подходы.

В принципе, возможны любые комбинации описанных алгоритмов для объективизации результатов выявления СТП.

Распространение получил геолого-морфологический анализ /Стру-

ктуры центрального типа..., 1978/, предусматривающий изучение ДДЗ, топографических и тематических карт. Так, кольцевые структуры выделяются по концентрическому расположению геологических формаций, кольцевым и радиальным нарушениям сплошности, участкам орографической и гидроэрозионной сетей и т.п. Используется метод "дирекционных аномалий" - составление схем линеаментов, выделение по ним фоновых и аномальных серий и использование последних как индикаторов кольцевых структур. Недешифрируемые участки структур достраиваются с учетом законов подобия.

Совместная обработка ДДЗ и топографических данных - карт эрозионной сети и энергии рельефа - с помощью фотографического "нерезкого маскирования" описана Н.В.Качановым с соавт. /1988/.

J.Y. Scanvic /1984/ демонстрирует эффективность совместной компьютерной обработки традиционно улучшенных цифровых ДДЗ и цифровых гравиметрических моделей для выявления структур центрального типа.

Подчеркнем очевидную полезность для визуализации СТП хорошо зарекомендовавшего себя в ландшафтных исследованиях комплексного анализа топографических данных и различной тематической информации в цифровом формате /Шарый и др., 1991/.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для исследования возможностей количественных топографических подходов в визуализации СТП была выбрана часть Крымского полуострова и прилегающего дна моря.

Нерегулярная ЦМР составлена вручную в масштабе 1:300000 и включает 11936 точек. Оцифровка изображена /Топографическая карта. Симферополь..., 1986/ и изогипс /Топографическая карта. Джанкой..., 1953; Топографическая карта. Севастополь..., 1953; Топографическая карта. Симферополь..., 1953; Топографическая карта. Херсон..., 1953/ (в ряде случаев из-за явного недостатка информации применялась их интерполяция) проведена в декартовой системе координат. Ее началу соответствует точка с географическими координатами $44^{\circ}20'$ с.ш. и $33^{\circ}13'$ в.д. Ось ординат совпадает с вектором касательной к линии меридiana в указанной точке. Оцифрованный прямоугольный участок имеет размеры 210 км по оси абсцисс и 132 км по оси ординат. Для последующей обработки использована ЦМР участка с размерами 204x132 км (рис. I).

3. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДУЕМОГО РАЙОНА

Рельеф и геологическое строение выбранной территории весьма неоднородны.

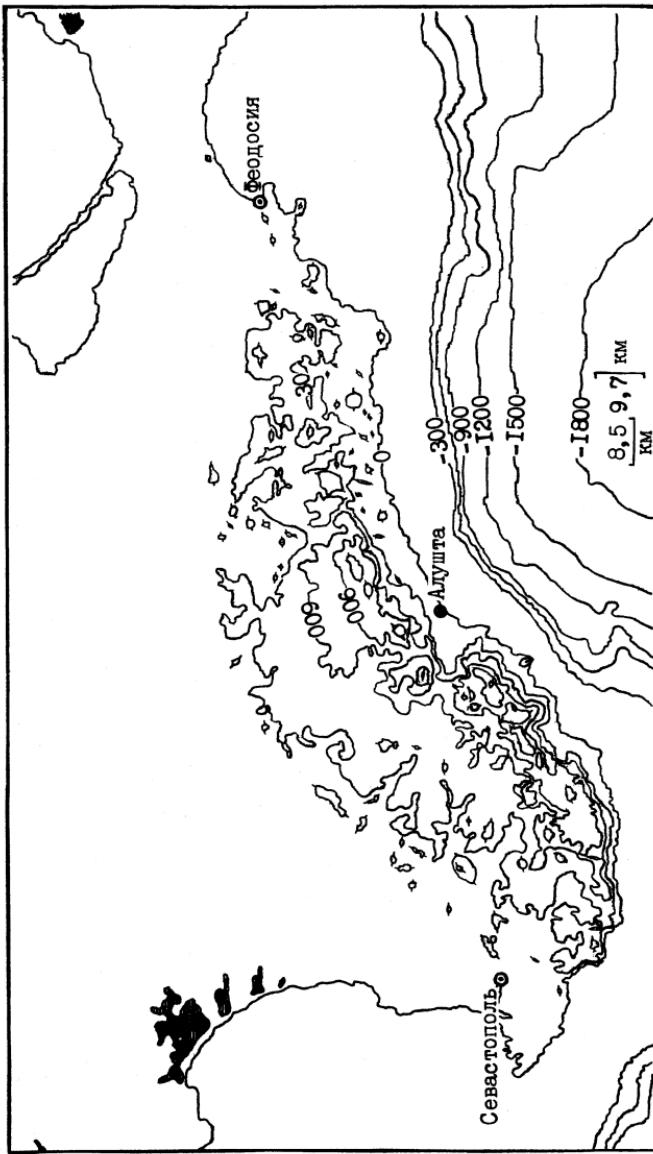


Рис. I. Карта горизонталей части Крымского полуострова и прилегающего дна моря. Изолинии проведены через 300 м. Штриховкой обозначены соленные озера. Карта построена на основе ЦМР.

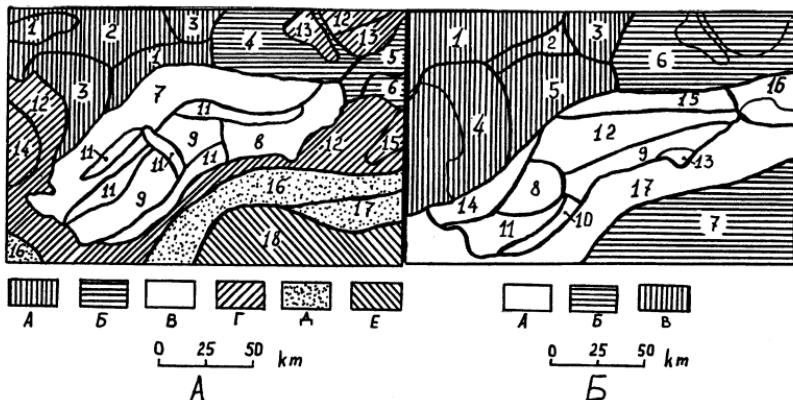


Рис. 2. Схемы части Крымского полуострова и прилегающего дна моря: А - геоморфологическое районирование /Геоморфологическая карта..., 1981/; Б - тектоническое районирование /Геология СССР..., 1969; Чекунов, 1972; Тектоника мезокайнозойских отложений..., 1985/, пояснения см. в тексте.

3.1. Геоморфологическое районирование позволяет выделить 18 типов морфоструктур (рис. 2а) /Геоморфологическая карта..., 1981/: А. Платформенные равнины: 1. Структурно-денудационная наклонная. 2. Структурно-денудационная субгоризонтальная. 3. Платово-аккумулятивная субгоризонтальная. Б. Равнины зоны сочленения платформ и орогенов: 4. Аккумулятивная субгоризонтальная. 5. Платово-аккумулятивная субгоризонтальная. 6. Платово-денудационная субгоризонтальная. В. Ороген: 7. Структурно-денудационные складчатые моноклинальные хребты и плато. 8. Структурно-денудационные складчато-глыбовые хребты и массивы. 9. Денудационно-тектонические складчато-глыбовые хребты и массивы. 10. Грабен. II. Денудационно-тектонические внутригорные понижения. Г. Равнины шельфа: 12. Прибрежная цокольная. 13. Прибрежная аккумулятивная. 14. Аккумулятивно-денудационная внешнего шельфа. 15. Структурно-денудационное плато. Д. Материковый склон: 16. Уступ. 17. Наклонная равнина. Е. Глубоководная котловина: 18. Полого-наклонная равнина.

Крымский полуостров характеризуется высоким структурным соответствием рельефа тектонической обстановке /Геоморфологическая карта..., 1981/.

3.2. Тектоническое районирование данной территории выделяет три основные области: А - вытянутый вдоль северной границы Сре-

диземноморской альпийской геосинклинальной складчатой системы окраинный Крымский мегантиклиниорий; Б - фрагмент системы окаймляющих мегантиклиниорий альпийских краевых прогибов; В - участок эпипалеозойской Скифской плиты (рис. 2б) /Геология СССР..., 1969; Чекунов, 1972; Тектоника мезокайнозойских отложений..., 1985/.

В пределах Скифской плиты выделяются три обособленных глыбовых поднятия складчатого фундамента, перекрытые миоцен-плиоценовыми отложениями: Новоселовское (1), Новоцарицинское (3) и Симферопольское (5); Альминская впадина (4) и Калиновский прогиб (2).

Система краевых прогибов в пределах изучаемого участка представлена фрагментами Индоло-Кубанского прогиба (6) и прогиба Сорокина (7). Отметим, что глубоководная Черноморская впадина характеризуется отсутствием гранитного слоя, то есть океаническим типом земной коры.

Ядро мегантиклиниория – Главная гряда Крымских гор – сложено в основном известняками таврической серии, средней и верхней юры. В строении Главной гряды и предгорий выделяются антиклиниории – Качинский (8), Туакский (9), Ялтинский (10) и синклиниории – Юго-Западный (11), Восточный (12), Судакский (13), перекрытые несогласно залегающей толщей известняков, глин, мергелей среднего – верхнего альба, нижнего мела, палеогена и неогена. Эти отложения образуют Северо-Западное (14) и Северное (15) крылья мегантиклиниория и его периклиналь (16). Часть ядра и южное крыло мегантиклиниория (17) находятся ниже уровня Черного моря.

3.3. Разрывные нарушения и линеаменты. Анализ ряда публикаций /Тектоническая карта..., 1969; Геология СССР..., 1969; Чекунов, 1972; Карта разломов..., 1978; Геоморфологическая карта..., 1979; Космогеологические карты..., 1979, 1982; Борисенко, 1983; Кац и др., 1986, 1988; Карта линейных и колышевых структур..., 1987/ позволяет сделать вывод о существовании трех преимущественных направлений простириания разрывных нарушений и линеаментов: северо-восточного (генеральное направление простириания Крымского мегантиклиниория), северо-западного (перпендикулярное первому; вероятно, генетически с ним связанное) и субмеридионального.

3.4. Гидрография. Типизация временных и постоянных водотоков по ряду гидрологических признаков выделяет три их группы: а) северо-западного склона Крымских гор; б) северного и в) южного склонов /Геология СССР..., 1969/.

4. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ.

Как отмечалось, СП выражены конфигурацией гидроэрозионной и орографической сетей (долин и приводораздельных областей) и цепочками холмов и депрессий. Следовательно, для визуализации СП необходимо выполнение двух условий:

1. Эффективно выделить:

- потоковую структуру местности;
- холмы и депрессии.

2. Определенным образом генерализовать информацию в целях:

- снижения уровня шумов;
- возможного выявления соответствующих данному масштабному уровню СП.

4.1. Теоретическое обоснование использования некоторых топографических величин для выявления СП.

Топографическая поверхность – бесконечно дифференцируемое, ограниченное, связное, замкнутое, ориентируемое, двумерное многообразие, находящееся в поле притяжения – может быть описана локальными величинами⁸, зависящими и не зависящими от поля притяжения. К первой группе относятся, например, крутизна, ориентация, горизонтальная, вертикальная кривизны; ко второй – главные, средняя, гауссова кривизны /Шарый, 1991/. Отображение значений превышений и практических всех локальных топографических величин с помощью изолиний или послойной окраски в той или иной степени позволяет получать информацию о потоковой структуре, холмах и впадинах. Однако, для наиболее эффективного ее отображения (в плане зрительного восприятия и смыслового соответствия) необходимо использование тех топографических величин, которые физически адекватны интересующей нас информации.

По потоковой структуре (гидроэрозионной сети) происходит перемещение масс вещества вдоль поверхности Земли. П.А.Шарым⁹ доказано существование только двух механизмов этого процесса: конвергенции и относительного ускорения. Следовательно, для выделения долин и приводораздельных областей необходима визуализация информации о топографических величинах, контролирующих эти механизмы.

Мерой конвергенции линий скольжения¹⁰ является горизонтальная кривизна топографической поверхности (k_h) – кривизна ее нормального сечения, имеющего общую касательную с изолинией высоты. Области $k_h > 0$ являются областями дивергенции линий скольжения, области $k_h < 0$ – их конвергенции.

Мерой относительного ускорения движения вещества по поверхности является вертикальная кривизна (k_v) – кривизна нормально-

го сечения топографической поверхности, вектор касательной к которому является тангенциальной составляющей вектора ускорения поля притяжения. Области $k_v > 0$ являются областями положительного относительного ускорения, области $k_v < 0$ – отрицательного /Шары, 1991/.

Качественно $k_{h,v} > 0$ соответствуют приводораздельным областям, а $k_{h,v} < 0$ – долинам (см., например, рис. 4, 5 в работе И.В.Флоринского /1991a/). Для оптимального зрительного восприятия, как и для технологий распознавания образов, целесообразно бинарное квантование этих данных при их картографическом закреплении: например, оптическая плотность изображения $\mathcal{D} = 0$ для $k_{h,v} > 0$, $\mathcal{D} = \max$ для $k_{h,v} < 0$.

Отметим, что использование какой-либо одной величины – k_h или k_v – для выделения "хребтов" и долин нецелесообразно. Практика установила любопытный феномен, связанный, вероятно, с индивидуальными гидрологическими свойствами бассейнов стока и отдельных долин – для одних характерен механизм конвергенции, для других – относительного ускорения, для третьих – их попеременное, для четвертых – одновременное использование. Таким образом, рассматривая данные только о k_h или о k_v , невозможно выявить всю потоковую структуру местности и, следовательно, все выраженные ею, СТП. Это обстоятельство подтверждается и в настоящем исследовании (см. п. 5).

Геологическое (тектоническое) индикационное значение k_h и k_v логически вытекает из их индикационных свойств потоков.

П.А.Шарым с соавт. /1991/ была продемонстрирована геологическая информативность (выявление разновергентных складчатых структур) независящих от поля притяжения локальных топографических величин – гауссовой (K) и средней (H) кривизн. H является полусуммой кривизн двух нормальных взаимно перпендикулярных сечений (например, k_h и k_v). K есть произведение главных кривизн¹². По определению /напр., Бронштейн, Семенджев, 1956/ областям $K > 0$ при $H > 0$ соответствуют холмы, $K > 0$ при $H < 0$ – депрессии, $K < 0$ – седловины. Таким образом, интегральное отображение данных о K и H (трехуровенное квантование) выявляет холмы, впадины и седловые участки, и, как следствие, СТП, выраженные цепочками этих элементов рельефа (см., например, рис. 6 в работе И.В.Флоринского /1991a/).

Из общих соображений ясно, что сепарация интегральной топографической информации (карты горизонталей) на ряд дифференциальных карт может оптимизировать последующий визуальный/машинный анализ топографических данных для выявления СТП.

4.2. Вычислительные аспекты.

Для выражения k_h , k_v , K , H используются частные производные высоты $z(x,y)$: $p = \partial z / \partial x$, $q = \partial z / \partial y$, $r = \partial^2 z / \partial x^2$, $s = \partial^2 z / \partial x \partial y$, $t = \partial^2 z / \partial y^2$ /Бронштейн, Семенцов, 1956; Шарий, 1991/:

$$K = (r^2 - s^2) / (I + p^2 + q^2)^2, \quad (1)$$

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

$$k_h = - (q^2 r - 2pq s + p^2 t) / [(p^2 + q^2)(I + p^2 + q^2)^{1/2}], \quad (3)$$

$$k_v = - (p^2 r + 2pq s + q^2 t) / [(p^2 + q^2)(I + p^2 + q^2)^{3/2}]. \quad (4)$$

Для оценки K , H , k_h , k_v могут быть использованы различные подходы. Нами применен известный в ландшафтных исследованиях алгоритм Эванса (*J. Evans*) /напр., Pennock et al., 1987/ для регулярной квадратной ЦМР с периодом решетки w . В каждой из подрешеток 3×3 , для которых $(-w, w, z_1), (0, w, z_2), (w, w, z_3), (-w, 0, z_4), (0, 0, z_5), (w, 0, z_6), (-w, -w, z_7), (0, -w, z_8), (w, -w, z_9)$ – измеренные координаты топографической поверхности, формулы для оценки частных производных в центральных точках подрешеток $(0, 0, z_5)$ имеют вид:

$$p = (-z_1 + z_3 - z_4 + z_6 - z_7 + z_9) / 6w, \quad (5)$$

$$q = (z_1 + z_2 + z_3 - z_7 - z_8 - z_9) / 6w, \quad (6)$$

$$r = (z_1 + z_3 + z_4 + z_6 + z_7 + z_9) / 6w^2 - (z_2 + z_5 + z_8) / 3w^2, \quad (7)$$

$$s = (-z_1 + z_3 + z_7 - z_9) / 4w^2, \quad (8)$$

$$t = (z_1 + z_2 + z_3 + z_7 + z_8 + z_9) / 6w^2 - (z_4 + z_5 + z_6) / 3w^2. \quad (9)$$

Выполнение второго условия визуализации СП может обеспечить, в принципе, любой алгоритм генерализации поверхностей /Флоринский, 1991a/. Мы использовали простейший и наиболее популярный – сглаживание регулярной квадратной ЦМР скользящим средним /напр., Tobler, 1966/ на подрешетках 3×3 с периодом $v = w$.

4.3. Компьютерная реализация.

Обработка ЦМР части Крымского полуострова и прилегающего дна моря проводилась на компьютере IBM PC AT с помощью пакета прикладных программ "Рельеф" Центра ландшафтных исследований фирмы

Линна (авторы - В.И.Хачко, П.А.Шарый). После регуляризации ЦМР были построены карты k_h , k_v , К, Н для несглаженной, сглаженной один и два раза ЦМР при $w = 3025$ м.

Карты построены в двух частных масштабах по осям абсцисс и ординат. ЦМР обрабатывалась по блокам, поэтому каждая карта является монтажом пяти листов.

Использование алгоритмов Эванса и скользящего среднего приводит к уменьшению размеров ЦМР за счет необрабатываемости крайних строк и столбцов матрицы значений высот. Так называемые "краевые" эффекты полностью исключены. Эффекты Гиббса, возникающие при резких перепадах значений функции $z(x,y)$ (например, граница шельфа и материевого склона) при формировании исходной поверхности высот по нерегулярной ЦМР, были локализованы.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Серия карт k_h , k_v и К (с учетом значений Н) для различных уровней генерализации ЦМР части Крымского полуострова и прилегающего дна моря представлена на рис. 3, 4, 5 соответственно.

Карты k_h (рис. 3) выделяют в основном субмеридиональную гидроэррозионную сеть - потоковые структуры северного и южного склонов (см. п. 3.4), характеризующиеся преимущественным использованием конвергентного механизма переноса вещества. Данные потоковые структуры являются индикаторами, в основном, субмеридиональной системы линеаментов.

Карта К (рис. 5) выделяет в основном субмеридиональный характер распределения цепочек седловин, холмов и депрессий, также индицирующих субмеридиональную линеаментную систему. Кроме того, ряд цепочек депрессий и седловин северо-восточного простирания индицирует диагональную линеаментную систему.

Карты k_v (рис. 4) выделяют в основном диагональную систему гидроэррозионной сети - потоковые структуры северо-западного склона (см. п. 3.4.), характеризующиеся преимущественным использованием при переносе масс механизма относительного ускорения. Эффективно выделяется ряд геоморфологических элементов генерального северо-восточного простирания: гряды Крымских гор, фрагменты шельфа и материевого склона (рис. 4 Б, В). Таким образом, информация о k_v в равной степени индицирует две диагональные взаимноперпендикулярные, вероятно - генетически связанные линеаментные системы.

Итак, картографическое отображение данных о k_h , k_v и К позволило выявить три системы линеаментного поля части Крымского полуострова и прилегающей акватории - субмеридиональную и две

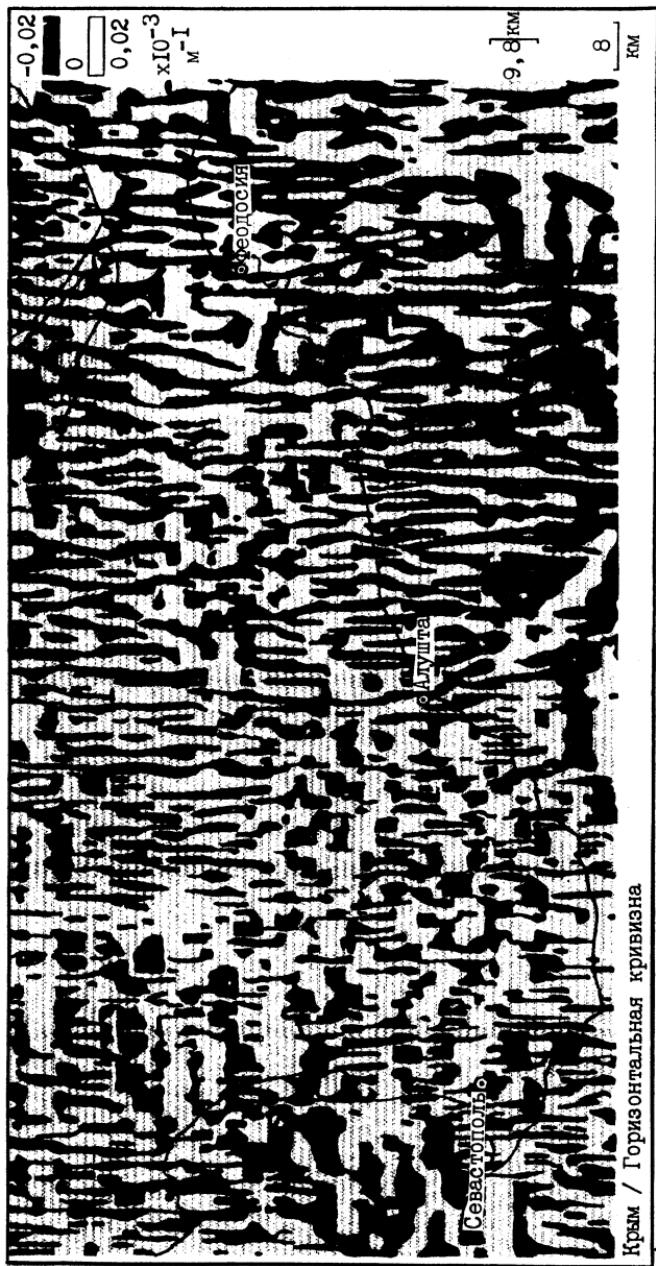
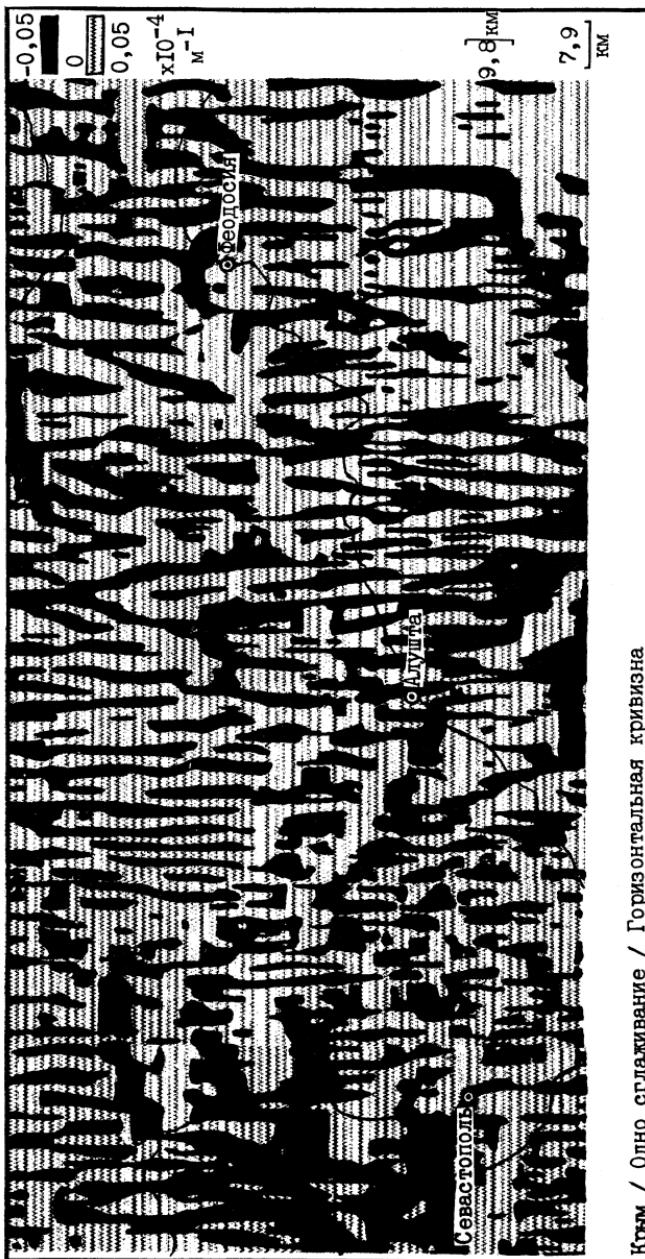
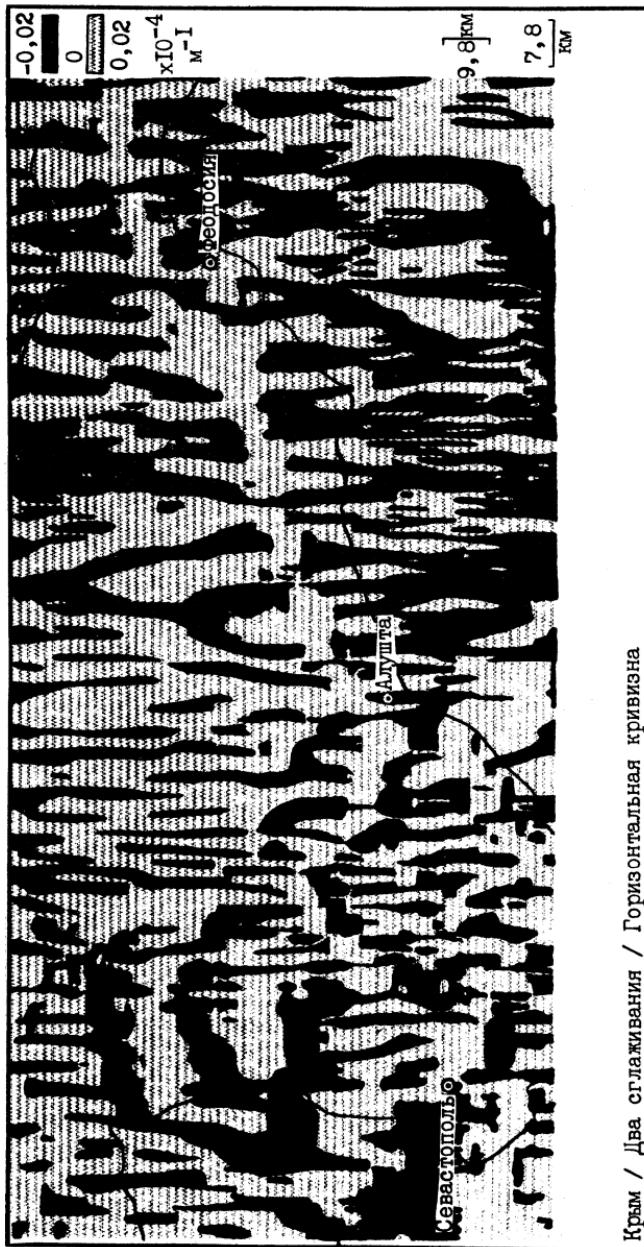


Рис. 3. Карты горизонтальной кривизны топографической поверхности части Крымского полуострова и прилегающего дна моря. Чёрный цвет соответствует долинам, штриховка – приводораздельным областям.
A – число сплаживаний ЦМР С = 0, Б – С = 1, В – С = 2.



Крым / Одно сглаживание / Горизонтальная кривизна.

б



Кривам / Два сглаживания / Горизонтальная кривизна

B

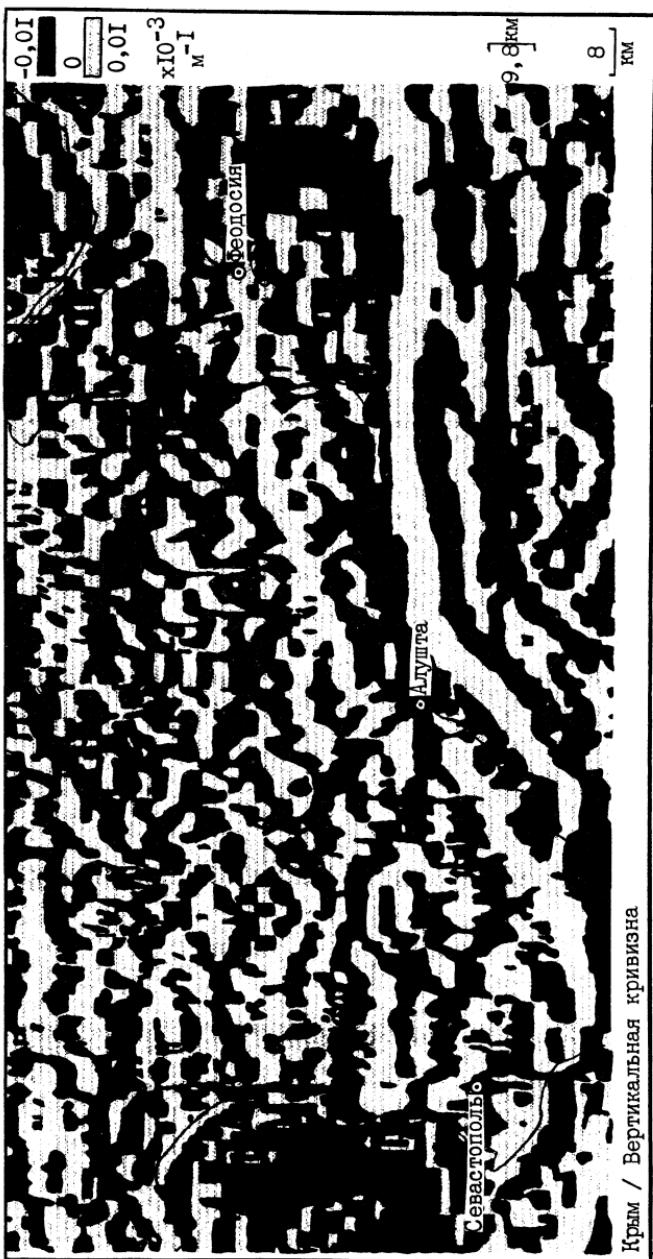
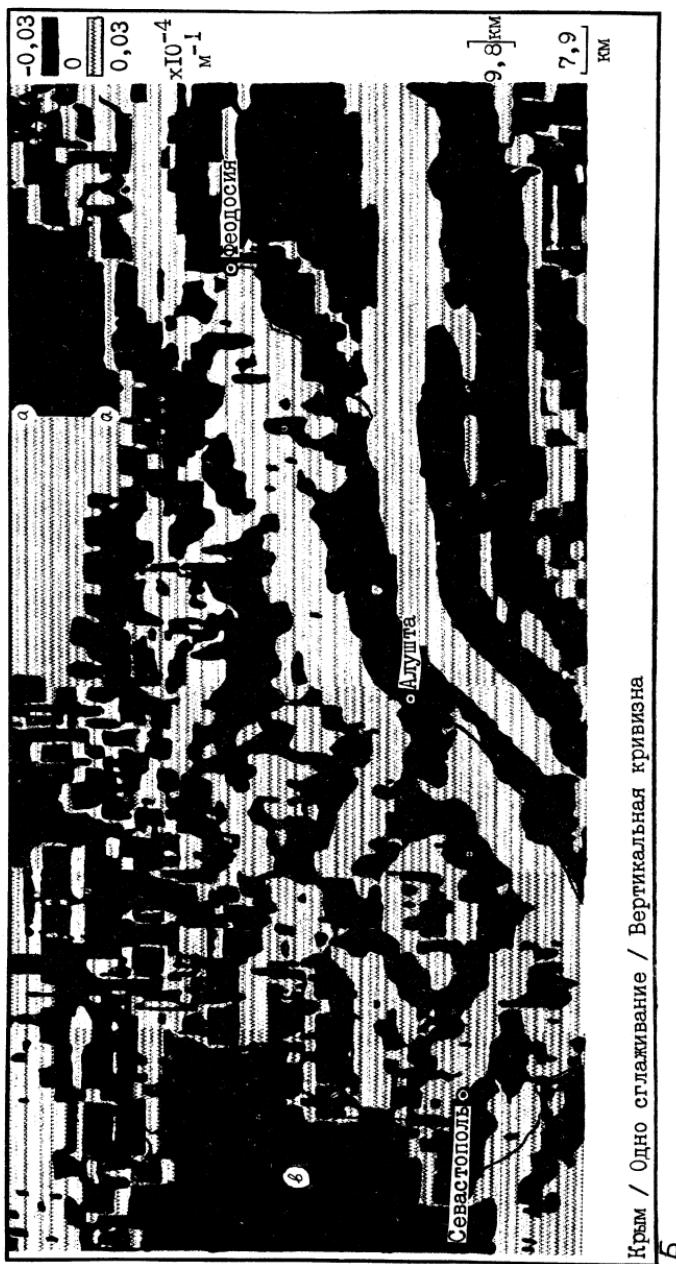
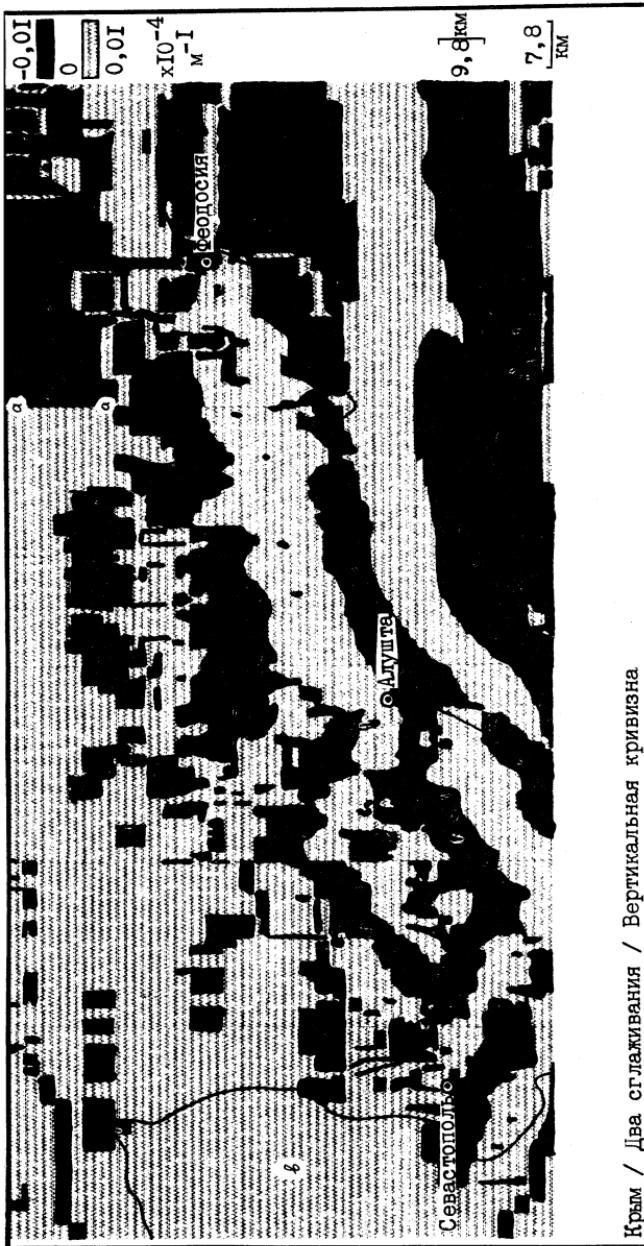


Рис. 4. Карта вертикальной кривизны топографической поверхности части Крымского полуострова и прилегающего дна моря. Чёрный цвет соответствует долинам, штриховка — приводораздельным областям. А — число сглаживания ЦШР $C = 0$, Б — $C = 1$, В — $C = 2$.

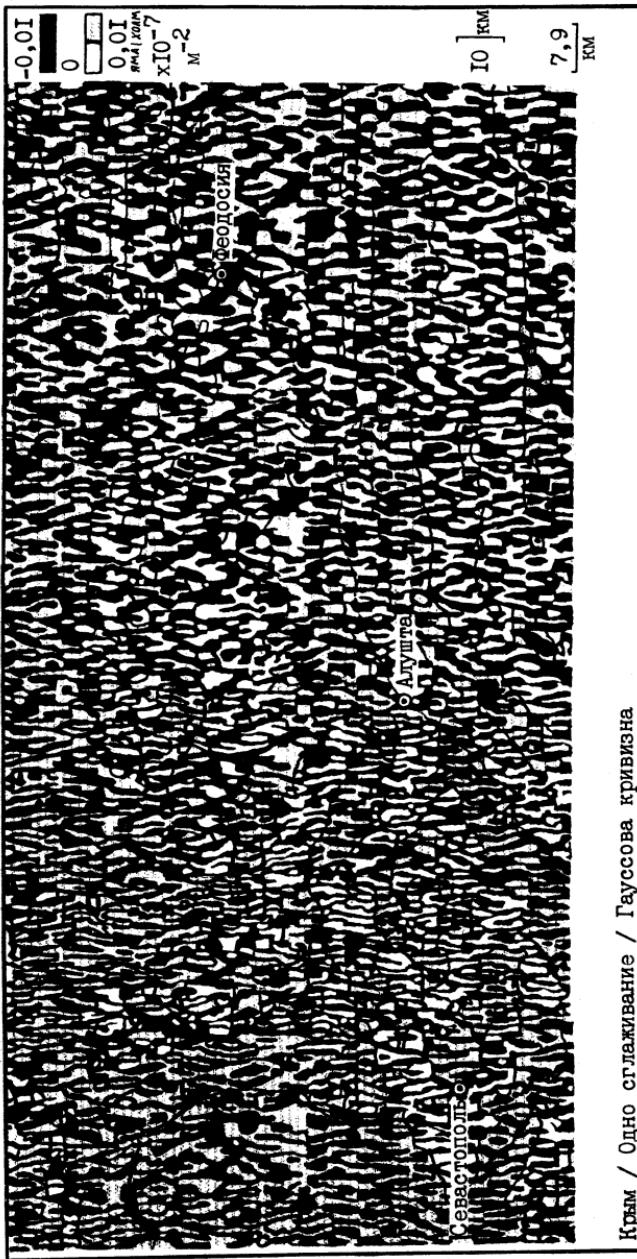


Крам / Одно сплаживание / Вертикальная кривизна

B



Крым / Два сглаживания / Вертикальная кривизна



Крым / Одно сглаживание / Гауссова кривизна

Рис. 5. Карта гауссовой кривизны топографической поверхности части Крымского полуострова и прилегающего дна моря. Чёрный цвет соответствует седловинам, белый – депрессиям, штриховка – холмовка. Число стяжаний IMP C = I.

диагональных. Подчеркнем сепарационный характер визуализации информации об этих системах: субмеридиональную выделили k_h и K , диагональные – преимущественно k_v . Возможно, это косвенно указывает на генетические различия систем.

Полученные результаты в целом согласуются с известными данными о преобладающих направлениях простирания линеаментов и разрывных нарушений – как для Крыма /Тектоническая карта..., 1969; Геология СССР..., 1969; Чекунов, 1972; Карта разломов..., 1978; Геоморфологическая карта..., 1979; Космогеологические карты..., 1979, 1982; Борисенко, 1983; Кац и др., 1986, 1988; Карта линейных и кольцевых структур..., 1987/, так и для Земли в целом¹⁴ (см. рис. 45 в работе Я.Г.Каца с соавт. /1988/ и обзор в монографии А.Е.Федорова /1991/).

Однако, доминирующими считаются диагональные структуры /Федоров, 1991/. В Крыму они, по всей видимости, связаны¹⁵ с мегантиклиниорием, имеющим генеральное северо-восточное направление простирания (рис. 2 Б). Их существование практически не оспаривается, поэтому подробный анализ двух крымских диагональных линеаментных систем в настоящей работе вряд ли оправдан. Большой интерес представляет субмеридиональная система. В пределах такого известного в геологическом отношении района столь плотная сетка субмеридиональных линеаментов выявлена впервые; это не может не вызывать определенных сомнений и требует, с одной стороны, доказательства корректности результата, с другой – его геологической интерпретации.

Прежде всего отметим: изотропность операторов алгоритмов Эванса, скользящего среднего, а также "нерегулируемых" этапов генерализации и вспомогательных алгоритмов обработки данных (см. п. 4.2) абсолютно исключена. Следовательно, субмеридиональный характер распределения областей конвергенции и дивергенции, а также цепочек седловин, холмов и впадин артефактом не является¹⁶. Существование весьма плотной субмеридиональной гидроэрэзационной сети как северного, так и южного склона Крымских гор подтверждает анализ горизонталей крупно- и среднемасштабных топографических карт (рис. 6 А)¹⁷. Однако, северные потоковые структуры сравнительно слабо выражены в рельфе и могут не быть зафиксированы и дешифрированы при использовании карт с заложением изолиний $> 20 - 30$ м. Южная потоковая структура в рельфе выражена хорошо, но значительная ее часть находится ниже уровня Черного моря; известно, что далеко не все топокарты содержат изобаты. Понятно, что дешифрирование слабовыраженных СТП суши и СТП морского дна по ДДЗ может быть неэффективно. Вероятно,

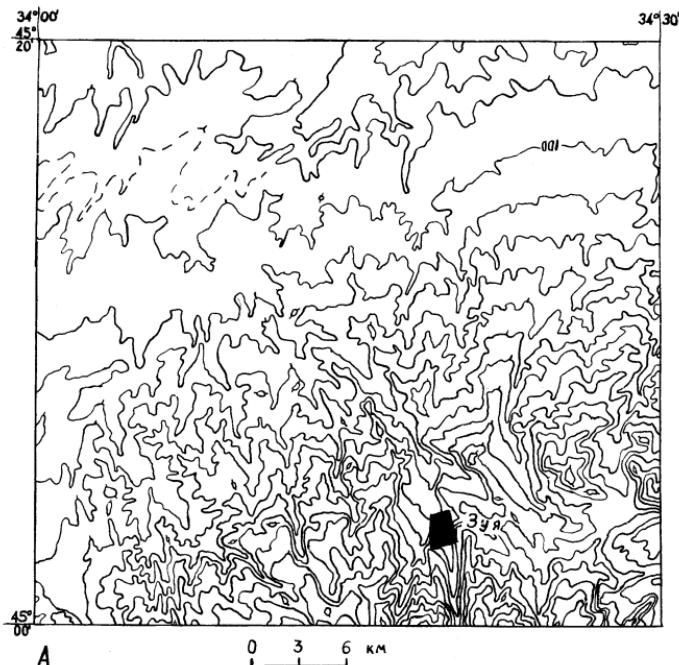
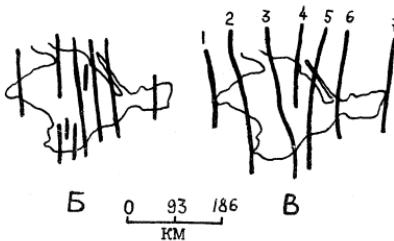


Рис. 6. Иллюстрация субмеридиональных природных элементов Крымского полуострова: А - субмеридиональный характер потоковой структуры равнинного района Крыма; сплошные изогипсы проведены через 20 м

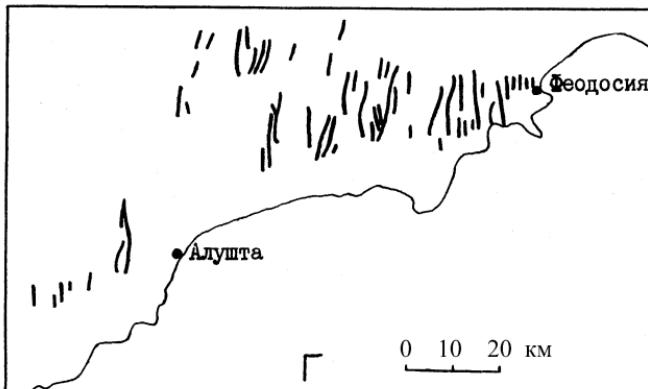
/Топографическая карта. Симферополь..., 1953/; Б - схема зон субмеридиональных линеаментов /Кац и др., 1986, 1988; Карта линейных и кольцевых структур..., 1987/; В - схема древних разломов /Тектоническая карта..., 1969; Чекунов, 1972; Геоморфологическая карта..., 1979/, пояснения в тексте; Г - схема субмеридиональных разрывных нарушений /Геология СССР..., 1969/.

этим объясняется то, что для данной территории до сих пор выявлялись лишь зоны субмеридиональных линеаментов /Кац и др., 1986, 1988; Карта линейных и кольцевых структур..., 1987/ (рис. 6 Б).

Выявленная субмеридиональная линеаментная система Крым-



Б 0 93 186 км В



ского полуострова и прилегающего дна моря вероятнее всего связана с известными трансрегиональными субмеридиональными реликтовыми разломами, секущими данную территорию (рис. 6 В): Одесским (1), Криворожско-Евпаторийским (2), Симферопольско-Алуштинским (3), Конско-Белозерским (4), Орехово-Павлоградским (5), Корсакско-Феодосийским (6) и Мариуполь-Керченским (7) /Тектоническая карта..., 1969; Чекунов, 1972; Геоморфологическая карта..., 1979/. Известна сеть и локальных субмеридиональных разрывных нарушений Горного Крыма (рис. 6 Г) /Геология СССР..., 1969/.

Такая генетическая связь субмеридиональной линеаментной системы предполагает более древний возраст ее заложения, по сравнению с диагональными системами линейных структур, связанными с альпийским мегантиклиниорием. По мнению А.И.Полетаева /Кац и др., 1988/, субмеридиональные линеаменты Крыма сформировались в раннем протерозое, а диагональные – в позднем протерозое – палеозое. Верхние границы времени заложения субмеридиональной и диагональных систем можно определить, вероятно, поздним палеозоем (возраст Скифской плиты) и кайнозоем (период формирования мегантиклиниория) соответственно.

На более ранние сроки заложения субмеридиональной системы указывает и карта К (рис. 5). Из дифференциальной геометрии известно, что если при деформации поверхности длины кривых на ней не изменяются (условие отсутствия разрывов), то значения К в каждой точке поверхности остаются неизменными /напр., Шарый, 1991/. Отсюда следует возможность реконструкции палеорельефа. Естественно, что это справедливо лишь для тех территорий, тектонический режим которых исключает образование поверхностных разрывов, или же для данного масштабного уровня ими можно прене-

бречь. Глубина такого прогноза также ограничена тектоническим режимом, а также интенсивностью процессов денудации/аккумуляции.

В весьма сложной геологической истории Крыма /Геология СССР..., 1969/ можно выделить два основные периода: а) образование Скифской плиты; б) последовательные поднятия и опускания в пределах современных Крымских гор, завершившиеся образованием мегантиклиниория. Карта К (рис. 5) отображает в основном субмеридиональные линеаменты, почти игнорируя северо-восточное простирание мегантиклиниория. Можно предположить, что в момент образования субмеридиональной линеаментной системы, его не существовало, как и связанных с ним диагональных систем линейных структур. Ряд северо-восточных цепочек депрессий и седловин (рис. 5) выявляются при использовании совместно с К информации о Н, не обладающей аналогичным К свойством: Н может служить индикатором лишь современных форм рельефа. Следовательно, северо-восточные линеаменты интерферируют с более ранней субмеридиональной системой.

Кроме линейных, k_1 и k_2 визуализируют несколько известных структур центрального типа (рис. 7, табл.).

Для определения эффективности использования метода Эванса в геологических (тектонических) исследованиях был проведен визуальный сравнительный анализ полученной серии карт и ряда опубликованных геолого-геофизических материалов /Тектоническая карта..., 1969; Геология СССР..., 1969; Чекунов, 1972; Карта разломов..., 1978; Геоморфологическая карта..., 1979; Космогеологические карты..., 1979, 1982; Карта морфоструктур центрального типа..., 1981; Борисенко, 1983; Тектоника мезокайнозойских отложений..., 1985; Карта линейных и кольцевых структур..., 1987; Казанцев и др., 1989/. Установлено¹⁸, что по крайней мере девяносто восемь геологических структур, выявленных по геолого-геофизическим данным и при дешифрировании ДДЗ в той или иной степени отражены на полученных картах (рис. 7). Интерпретация этих структур приводится в табл. Данное обстоятельство позволяет говорить об эффективности использованных количественных топографических подходов в геологии (тектонике).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере части Крымского полуострова и прилегающего дна мо-

Рис. 7. Карта СТП (I - 98) части Крымского полуострова и прилегающего дна моря, выявляемых по серии карт (рис. 3-5) и известных по геолого-геофизическим данным

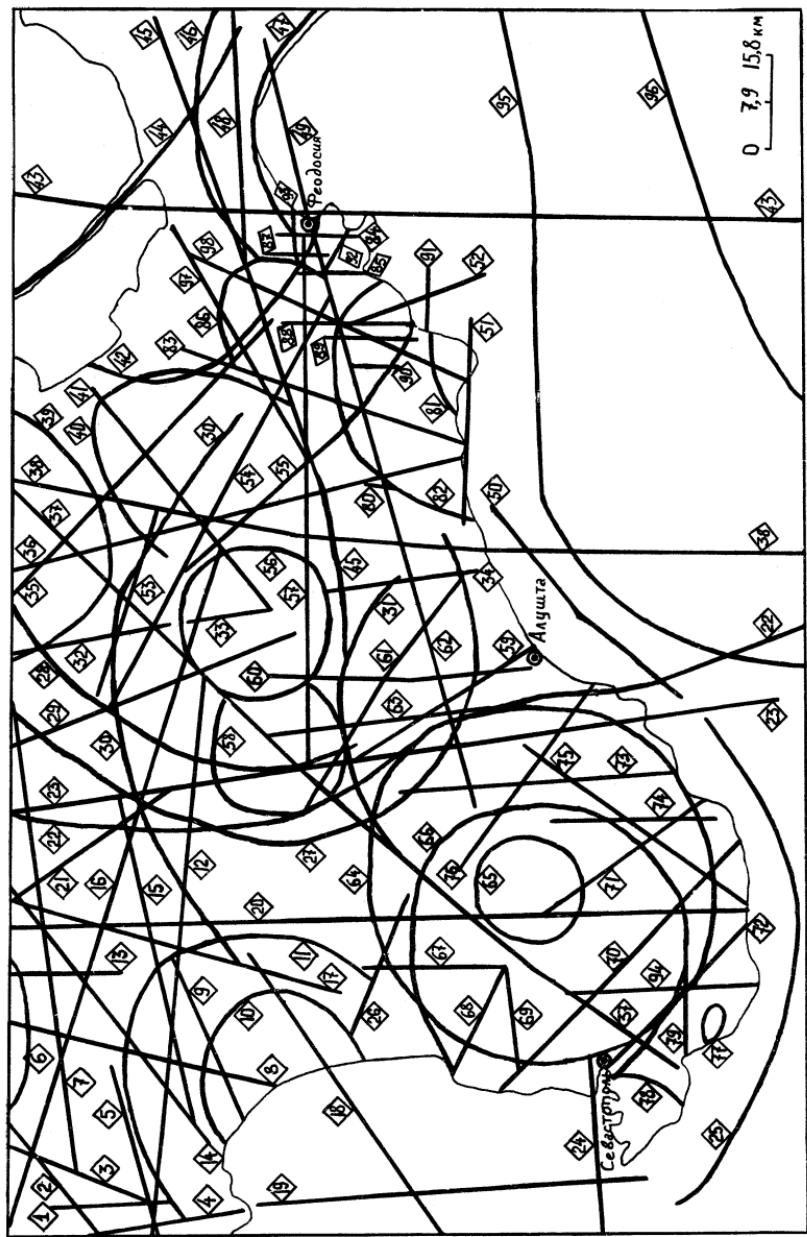


Таблица. Геологическая интерпретация СПЧ части Крымского полуострова и прилегающего дна моря

Номер СПЧ	Геологическая интерпретация СПЧ	Литературный источник	Рис., на кот. отображается СПЧ
I	2	3	4
I	Зона линеаментов II порядка	"Карта линейных и кольцевых структур..."/1987/	3 А, Б, В, 4 Б, 5
2	Линеамент	-"-	3 А, В, 5
3	-"-	-"-	3 В, 4 А, 5
4	Зона линеаментов II порядка	-"-	5
5	Линеамент	-"-	4 Б, В
6	Фрагмент внешнего контура кольцевой структуры сложной морфологии; фрагмент контура положительной кольцевой структуры	-"-; "Космогеологическая карта..."/1982/	3 А
7	Зона линеаментов II порядка; линеамент	-"-	3 А, 4 А, Б, В
8	Линеамент	"Космогеологическая карта..."/1979/	3 А, 4 А
9	Разлом	"Карта разломов..."/1978/	3 А, Б, В, 4 А
10	Внутренний контур отрицательной кольцевой структуры, соответствующей Альминской впадине	"Карта линейный и кольцевых структур..."/1987/	4 Б
II	Внешний контур отрицательной кольцевой структуры, соответствующей Альминской впадине	-"-	4 А, Б
12	Линеамент	-"-	4 А
13	Зона линеаментов II порядка	-"-	3 А, Б, В, 4 А, 5
14	Линеамент	-"; "Космогеологическая карта..."/1982/	3 А

Таблица. Продолжение

1	2	3	4
15	Зона линеаментов II порядка	"Карта линейных и кольцевых структур..." /1987/	3 В, 4 А, Б, В
16	-"-	-"-	4 А, Б
17	Линеамент	-"-	3 А, Б, В, 4 Б, 5
18	Разлом	"Карта разломов..." /1978/	3 А, Б, 4 А
19	Фрагмент Криворожско-Евпаторийского разлома	-"-; А.В.Чекунов /1972/	3 Б, В
20	Зона линеаментов II порядка; линеамент; разлом	"Карта линейных и кольцевых структур..." /1987/; "Космогеологическая карта..." /1982/; "Карта разломов..." /1978/	3 А, Б, В, 5
21	Линеамент	"Карта линейных и кольцевых структур..." /1987/	4 Б
22	Симферопольско-Алуштинский разлом	"Геоморфологическая карта..." /1979/	3 А, Б, В
23	Линеамент; разлом	"Карта линейных и кольцевых структур..." /1987/; "Карта разломов..." /1978/	3 А, Б, В, 4 В, 5
24	Разлом	"Карта разломов..." /1978/	3 А, Б, В, 4 А, В
25	-"-	-"-	4 А
26	Линеамент	"Карта линейных и кольцевых структур..." /1987/	4 А, Б

Таблица. Продолжение

I	2	3	4
27	Внешний контур положительной кольцевой структуры, соответствующей Симферопольскому поднятию; разлом	-"; "Карта разломов..."/1987/	-"-
28	Внутренний контур положительной кольцевой структур, соответствующей Симферопольскому поднятию	"Карта линейных и кольцевых структур."/1987/	-"-
29	Линеамент; разлом	-"; "Тектоническая карта..."/1969/	4 А, 5
30	Внешний контур купольной экспонированной домезозойской морфоструктуры центрального типа	"Карта морфоструктур центрального типа..."/1981/	4 А, В, В
31	Внутренний контур купольной экспонированной домезозойской морфоструктуры центрального типа; разлом	-"; "Геоморфологическая карта..."/1979/; "Карта разломов..."/1978/	3А, В, 4 А, В
32	Линеамент	"Карта линейных и кольцевых структур."/1987/	3 А, Б, В, 5
33	-"-	-"-	-"-
34	-"-	-"-	-"-
35	-"-	"Космогеологическая карта..."/1979/	5
36	-"-	"Космогеологическая карта..."/1982/	3 А, В, В
37	-"; межблоковое разрывное нарушение	-"; "Космогеологические карты..."/1979, 1982/, Л.С.Борисенко /1983/	3 А, Б, В, 4 А, Б, В

Таблица. Продолжение

I	2	3	4
38	Фрагмент Орехово-Павлоградского разлома	"Тектоническая карта..."/1969/; А.В. Чекунов /1972/	3 А, Б, В, 4 А, Б, В
39	Внешний контур кольцевой структуры сложной морфологии	"Карта линейных и кольцевых структур..."/1987/	4 А, Б, В, 5
40	Внешний контур положительной кольцевой структуры, приуроченной к Симферопольскому и Новоцарицинскому поднятиям; контур кольцевой структуры неясной морфологии	"--"; "Космогеологическая карта..."/1982/	4 Б
41	Линеамент; разлом	"Карта линейных и кольцевых структур..."/1987/; "Карта разломов..."/1978/	4 А, Б, 5
42	Фрагмент границы Индоло-Кубанского прогиба; разлом; внутриблоковое разрывное нарушение	А.В.Чекунов /1972/; "Тектоника мезокайнозойских отложений..."/1985/; "Карта разломов..."/1978/; Л.С.Борисенко /1983/	3 Б, В, 4 А, В
43	Фрагмент Корсакско-Феодосийского разлома	"Тектоническая карта..."/1969/; А.В. Чекунов /1972/	3 А, Б, В, 4 Б, В
44	Фрагмент контура сводового поднятия этапов кратонизации земной коры палеозойского возраста, совпадающего с Сивашским грабеном	"Карта линейных и кольцевых структур..."/1987/	4 А
45	Линеамент;	--; "Космогеоло-	

Таблица. Продолжение.

I	2	3	4
	разлом	гические карты..." /1979, 1982/; "Геоморфологическая карта..." /1979/; "Тектоническая карта..." /1969/	4 А, Б, В
46	Контур кольцевой структуры неясной морфологии	"Космогеологическая карта..." /1982/	4 А
47	Контур отрицательной кольцевой структуры - изометрической депрессии	"Карта линейных и кольцевых структур..." /1987/	4 А, Б, В
48	Фрагмент границы Индоло-Кубанского прогиба	"Тектоника мезокайнозойских отложений" /1985/	3 В, В
49	Журавлевский надвиг	Ю.В.Казанцев и др. /1989/	4 А
50	Разлом	"Тектоническая карта..." /1969/	4 А, Б, В
51	-"-	"Карта разломов..." /1978/	4 А
52	-"-	-"-	ЗА, Б, В, 4А
53	Зона линеаментов II порядка; линеамент	"Карта линейных и кольцевых структур..." /1987/; "Космогеологическая карта..." /1982/	4 А, Б
54	Линеамент	"Космогеологическая карта..." /1982/	-"-
55	Межблоковое разрывное нарушение	Л.С.Борисенко /1983/	З А, Б
56	Внешний контур кольцевой структуры неясного генезиса,	"Карта линейных и кольце-	4 А, Б

Таблица. Продолжение.

I	2	3	4
	приуроченной к Симферопольскому поднятию	"вых структур... /1987/	
57	Линеамент	-"-	4 А
58	Внешний контур кольцевой структуры неясного генезиса, приуроченной к Симферопольскому поднятию	-"-	4 А, Б
59	Линеамент	"Космогеологическая карта..." /1982/	3 Б, В
60	-"-; разлом	-"-; "Карта линейных и кольцевых структур"/1987/; "Карта разломов..."/1978/	3 А, Б, В, 4 В, 5
61	Линеамент; разлом	-"-; -"-	4 А, Б, В
62	Линеамент	"Космогеологическая карта..." /1982/	3 В, 4 Б, В
63	Разлом	"Карта разломов..."/1978/	3 А, Б, В, 4 А
64	Внешний контур положительной кольцевой структуры, соответствующей Качинскому антиклинирию	"Карта линейных и кольцевых структур"/1987/	3 А, Б, В, 4 А, Б, В
65	Внутренний контур положительной кольцевой структуры, соответствующей Качинскому антиклинирию	-"-	4 А, Б, В
66	Фрагмент контура экспонированной домезозойской морфоструктуры центрального типа	"Карта морфоструктур центрального типа..."/1981/	3 А, Б, В, 4 А, Б, В
67	Зона линеаментов II порядка	"Карта линейных и кольцевых структур... /1987/	3 А, Б, В, 5

Таблица. Продолжение

I	2	3	4
68	Линеамент	"--"	ЗА
69	--"	--"	4 А, Б, В, 5
70	Разлом	"Карта разломов..."/1978/	3 Б, В, 4 А, Б, В
71	Линеамент	"Карта линейных и кольцевых структур."/1987/	3 Б, В
72	Разлом	"Карта разломов..."/1978/	3 А, Б, 4 А, Б, В
73	Линеамент	"Космогеологическая карта..."/1982/	3 А, Б, В
74	Разлом	"Карта разломов..."/1978/	3 А, Б, В, 5
75	Межблоковое разрывное нарушение	Л.С.Борисенко /1983/	3 А, Б, 4 А, Б
76	Линеамент	"Карта линейных и кольцевых структур."/1987/	3 А, Б, В, 4 А, Б, В
77	Граница между глинами, песчаниками, мергелями, известняками валанжинского и готеривского ярусов и известняками титонского яруса	"Геология СССР..." /1969/	4 А
78	Границы последовательной смеси песчаников сарматского яруса, среднего миоцена и известняков титонского, альбского, сеноманского, туронского, коньянского, датского ярусов и палеоценена и эоценена	--"	3 В
79	Разлом	"Карта разломов..."/1978/	4 А, В
80	Тектонический разрыв	"Геоморфологическая карта..."/1979/	3 А, Б, В
81	Внутренний контур кольцевой	"Карта линей-	

Таблица. Продолжение.

I	2	3	4
	структуры сложной морфологии, соответствующей Судакскому синклиниорию; разлом	ных и кольцевых структур."/1987/; "Геология СССР."/1969/	4 А, Б, В
82	Внешний контур кольцевой структуры сложной морфологии, соответствующей восточной части Туакского антиклиниория	"Карта линейных и кольцевых структур."/1987/	3 А, Б, В, 4 А, Б
83	Разлом	"Карта разломов..."/1978/	3 А, Б, В
84	--	"Геология СССР..."/1969/	3 А
85	--	--	3 А, Б, В, 5
86	Внешний контур положительной кольцевой структуры	"Карта линейных и кольцевых структур."/1987/	4 А, В
87	Разлом	"Геология СССР..."/1969/	3 А
88	--	--	3 А, Б, В, 4 А, Б
89	--	--	3 А, Б, В, 4 А
90	--	--	3 А, Б, 4 Б
91	--	"Карта разломов..."/1978/	4 А
92	Внутриблоковое разрывное нарушение	Л.С.Борисенко /1983/	4 А, В
93	Граница между глинами майкопской серии и известняками верхнего мела	"Геология СССР..."/1969/	4 А
94	Зона линеаментов II порядка	"Карта линейных и кольцевых структур."/1987/	3 А, Б, 4 А, В, 5
95	Фрагмент границы прогиба Сорокина	"Тектоника мезокайнозойских отложений"/1985/	3 А, Б, В, 4 А, Б, В
96	Разлом	"Карта разломов..."/1978/	--

Таблица. Продолжение.

I	2	3	4
97	Линеамент	"Карта линейных и кольцевых структур..." /1987/	4 А, Б, В
98	---; разлом	---; "Космогеологическая карта..." /1982/; "Карта разломов..." /1978/	ЗА, Б, В

ря показаны возможности количественных топографических подходов в визуализации линеаментов и структур центрального типа.

Проведен сравнительный анализ методов выявления СТП. Теоретически обоснованы геологические (тектонические) индикационные свойства горизонтальной, вертикальной и гауссовой кривизн топографической поверхности. Впервые для визуализации СТП применен известный в ландшафтных исследованиях алгоритм Эванса.

Обработка ЦМР части Крымского полуострова и прилегающего дна моря позволила выявить три системы линеаментного поля - субмеридиональную и две взаимноперпендикулярных диагональных, а также ряд других структур. Сравнительный анализ полученных результатов и известных геолого-геофизических данных доказал эффективность использованных подходов.

Результаты работы докладывались на семинарах лаборатории космической геологии МГУ, кафедры физики МИГАиК, П Всесоюзном семинаре "Нетрадиционные методы геофизических исследований неоднородностей в земной коре" в Институте физики Земли.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает глубокую признательность за ценные советы, конструктивную критику и своевременную поддержку А.И.Полетаеву, В.А.Зайцеву, Н.В.Макаровой, А.М.Берлянту (МГУ), А.А.Лютому (ИГ РАН), Ю.А.Ильину, А.Т.Звереву (МИГАиК), П.А.Шарому, В.И.Хачко (Центр ландшафтных исследований фирмы Линна), П.В.Козлову (МГНПП "Лоция"), З.Ф.Поветухиной, А.А.Снакиной и О.Ф.Корсунскому (ИПФС РАН).

ПРИМЕЧАНИЯ

1. Исключение могут составлять структуры, фиксируемые при геофизических съемках и картировании: вопросы зависимости характеристик рельефа и элементов ландшафта от геофизических полей изучены еще слабо.

2. Существует небольшой обзор подходов к визуализации СТП. /Буш, 1986/, однако, количественные алгоритмы, к сожалению, в нем не рассмотрены. В версии настоящей работы для журнала *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* обсуждаются только количественные топографические подходы.

3. Количественные подходы позволяют объективизировать выявление СТП лишь в определенной степени: окончательная обработка информации, как правило, осуществляется человеком.

4. Количественным алгоритмам предшествовало использование рельефных моделей местности /Wise, 1968/.

5. Тектоническая интерпретация выявленных СТП, основанная на анализе известных геолого-геофизических данных, в указанных в этом азбаче работах не проводилась. Кроме того, использование данных только о K_4 способно выявить лишь часть информации о СТП (см. п. 4.1).

6. Приведенная критика качественных подходов справедлива для всех классов алгоритмов визуализации СТП.

7. Использование этих видов фильтрации может стать причиной появления артефактов /Lendaris, Stanly, 1970; Рябухин и др., 1976/.

8. Значение локальной величины топографической поверхности в данной точке определяется другими точками, лежащими в некоторой ее окрестности.

9. Выступление на семинаре лаборатории картографии почв Института почвоведения и фотосинтеза в декабре 1991 г.

10. Линии скольжения – линии на топографической поверхности,

ориентированные вектором касательной тангенциальной составляющей ускорения поля притяжения /Шарый, 1991/.

11. Положительный знак $k_{\lambda, v}$ здесь присваивается, если выпуклость сечения направлена по единичному вектору внешней нормали к поверхности в данной точке.

12. Главные кривизны – кривизны главных нормальных сечений; являются максимальной и минимальной кривизнами для данной точки поверхности /Бронштейн, Семенджяев, 1956/.

13. Речь идет о последней, "регулируемой" стадии генерализации. Ей предшествовали следующие генерализационные этапы: а) со-
ставление топокарт масштаба 1:300000; б) оцифровка горизонталей;
в) регуляризация ЦМР; г) выбор w .

14. Так называемое свойство "консервативности" линеаментов /Кац и др., 1986/ – ортогональные и диагональные направления их простирации отмечаются повсеместно.

15. Здесь и далее мы будем говорить только о связях СПИ и известных геологических структур. Выяснение типа этих связей (например, контролирует ли мегантиклиниорий диагональные линеаментные системы, или, наоборот, линеаментное поле предопределяет тектоническое развитие территории) выходит за рамки настоящей работы.

16. Это не означает, что полученные карты не содержат артефактов. На рис. 4 Б, В линия а-а (Присивашье) является границей двух листов карты, обработка которых проводилась независимо. Область в (рис. 4 Б, В) – Каламитский залив – при увеличении числа сглаживаний ЦМР меняет знак k_v . Оба случая относятся к почти плоским участкам местности и здесь допустимо говорить о стремлении k_v к нулю.

17. Под субмеридиональностью понимается возможность отклонения от северного направления на $\pm 5^\circ$ (см. обзор в монографии А.Е.Федорова /1991/). Такие азимуты имеет большинство долин северного и южного склонов Крымских гор в пределах рассматриваемого участка (рис. 6 А). Отображенная на рис. 3 фактическая меридиональность потоковых структур этих склонов является следствием сглаживания ЦМР. Как известно, одним из свойств генерализации является выделение характерных свойств картируемых явлений, процессов, объектов /Флоринский, 1991а/.

18. Корректный корреляционный анализ вряд ли был возможен. Во-первых, не был проведен полный обзор региональной геологической литературы. Во-вторых, известно свойство автономности линеаментов /Кац и др., 1986/: далеко не всегда и не везде они совпадают с известными по геолого-геофизическим данным структурами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авксентьева Н.Н., Латышева Е.И. Алгоритм раздельного дешифрирования линейных и кольцевых фотоаномалий на аэрокосмических изображениях //Образный анализ в управлении, научных исследованиях и системах обучения. III Всесоюзная научно-техническая конференция "Образ-90". Тез. докл. М.: ЦП ВИТОП им. С.И.Вавилова, 1990, с. 53-54.
2. Алексеев А.С., Казанцев И.Г., Пяткин В.П. Томографический подход к выявлению линеаментов на аэрокосмических изображениях //Исследования Земли из космоса, 1988, № 5, с. 99-103.
3. Борисенко Л.С. Разрывные нарушения Горного Крыма //Геологический журнал, 1983, Т. 43, № 2, с. 126-129.
4. Борисов О.М., Глух А.К. Кольцевые структуры и линеаменты Средней Азии. Ташкент: Фан, 1982, 123 с.
5. Бронштейн И.Н., Семенцов К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. Изд. шестое, стереотипное. М.: ГИИТЛ, 1956, 608 с.
6. Буш В.А. Проблема кольцевых структур Земли. Итоги науки и техники. Сер.: Общая геология, Т. 22. М.: ВНИТИ, 1986, 116 с.
7. Васильевский М.М., Некрасова Ж.А., Беккер А.М. и др. Оценка активности эндогенного структурообразования с помощью когерентно-оптической обработки изображений земной поверхности // Вулканология и сейсмология, 1980, № 5, с. 22-31.
8. Волчанская И.К., Сапожникова Е.Н. Анализ рельефа при поисках месторождений полезных ископаемых. М.: Недра, 1990, 159 с.
9. Выявление по топокартам и аэрофотоснимкам форм естественных почвенно-геоморфологических тел. Клеточная структура земной поверхности /И.Н.Степанов. Пущино: НЦБИ АН СССР, 1983, 76 с.
10. Геология СССР. Т. 8: Крым. Ч. I: Геологическое описание /Под ред. М.В.Муратова. М.: Недра, 1969, 575 с.
- II. Геоморфологическая карта СССР, масштаб I:2500000. Гл.

- ред. А.А.Асеев. М.: ИГ АН СССР, 1981.
12. Геоморфологическая карта Украинской ССР и Молдавской ССР, масштаб 1:1000000. Гл. ред. И.Л.Соколовский. Киев: Мингео УССР, Центральная тематическая экспедиция, 1979.
13. Голд Д., Паршек Р., Александер С. Анализ и применение данных ЕРТС-1 для регионального геологического картирования // Геологические исследования из космоса: Пер. с англ. М.: Мир, 1975, с. 7-18.
14. Гордиенко И.Г. Вычислительные средства автоматизации геологического дешифрирования //Автоматизированный анализ природных линеаментных систем. Л.: ВСГЕИ, 1988, с. 9-13.
15. Гостева Т.С., Патракова В.С., Абрамкина В.А. Выявление закономерностей пространственного распределения кольцевых структур на основе тренд-анализа рельефа //Геология и геофизика, 1983, № 8, с. 72-79.
16. Деструктивный рельеф как источник информации и геологическом пространстве /И.В.Антощенко-Оленев. М.: Недра, 1989, 156 с.
17. Дистанционные исследования при нефтегазопоисковых работах /А.А.Аксенов, В.Г.Можаева, В.Т.Воробьев и др. М.: Наука, 1988, 224 с.
18. Егоров В.В., Сутовский В.М. Итоги и перспективы использования аэрокосмической информации. Аналитический обзор. Космические исследования: научные и народнохозяйственные аспекты. Вып. 4. М.: ВНИЦентр, 1989, 132 с.
19. Зайченко В.Ю., Кузнецова О.Л., Попсуй-Шапко Г.П. О природе кольцевых фотоаномалий, фиксируемых дистанционными методами //Советская геология, 1981, № 1, с. 98-106.
20. Заруцкая И.П., Красильникова Н.В. Проектирование и составление карт. Карты природы. М.: Изд-во Московского университета, 1989, 296 с.
21. Зверев А.Т., Сtryков А.И. Трансформирование геолого-геофизических и гипсометрических карт с целью выделения псевдокруговых аномалий (форм) для автоматизации процесса дешифрирования кольцевых структур на космических снимках //Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 1985, № 5, с. 46-54.
22. Зейлик Б.С., Перфильев Л.Г., Василенко А.Н. и др. Новая методика геологического дешифрирования кольцевых структур в пределах полузакрытых и закрытых территорий //Исследование Земли из космоса, 1985, № 4, с. 31-40.
23. Златопольский А.А. Пакет прикладных программ выделения и анализа линейных элементов аэрокосмических изображений //Ав-

томатизированный анализ природных линеаментных систем. Л.: ВСЕГЕИ, 1988, с. 14-28.

24. Игуменова И.А., Пяткин В.П., Салов Г.И. О статистических алгоритмах обнаружения колец и линий на изображениях //Обработка изображений и дистанционные исследования. Тез. докл. Рег. конф. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1987, с. II3-II4.

25. Казанцев Ю.В., Казанцева Т.Т., Аржавитина М.Ю. и др. Структурная геология Крыма. Уфа: БНЦ УрО АН СССР, 1989, 152 с.

26. Карта линейных и кольцевых структур УССР (по материалам космических съемок). Масштаб 1:1000000. Гл. ред. А.И.Зарицкий. Киев: Мингео УССР, УГНГУ "Укргеология", Центральная тематическая экспедиция, 1987.

27. Карта морфоструктур центрального типа территории СССР. Масштаб 1:10000000. Ред. В.В.Соловьев. Л.: ВСЕГЕИ, 1981.

28. Карта разломов территории СССР и сопредельных стран. Масштаб 1:2500000. Гл. ред. А.В.Сидоренко. М.: Мингео СССР, 1978.

29. Кац Я.Г., Полетаев А.И., Румянцева Э.Ф. Основы линеаментной тектоники. М.: Недра, 1986, 140 с.

30. Кац Я.Г., Тевелев А.В. Геологическая интерпретация линеаментов //Общая и рег. геология, геологическое картирование. Обзорная информация. М.: ВИЭМС, 1987, 61 с.

31. Кац Я.Г., Тевелев А.В., Полетаев А.И. Основы космической геологии. М.: Недра, 1988, 235 с.

32. Кац Я.Г., Козлов В.В., Полетаев А.И. Ротационные структуры земной коры //Общая и рег. геология, геология морей и океанов, геологическое картирование. Обзорная информация. Вып. 5. М.: ВИЭМС, 1990, 41 с.

33. Каchanov N.B., Tрубецкой N.A., Фрейдлин A.A. Использование цифровой и оптической обработки космоснимков при изучении нефтеперспективных структур Восточного Прикаспия //Автоматизированный анализ природных линеаментных систем. Л.: ВСЕГЕИ, 1988, с. I17-I26.

34. Кирсанов А.А. Применение материалов аэрокосмических съемок при изучении глубинного строения нефтегазоносных территорий (состояние и перспективы) //Аэрокосмические съемки при изучении глубинного строения регионов СССР. Л.: ВСЕГЕИ, 1990; с. 4-I3.

35. Космогеологическая карта линейных и кольцевых структур территории СССР. Масштаб 1:5000000. Гл. ред. А.Д.Щеглов. М.: Мингео СССР, ВАНЮ "Аэрогеология", Центральная космоаэрогеологическая экспедиция, 1979.

36. Космогеологическая карта СССР. Масштаб 1:2500000. Гл. ред. Е.А.Козловский. М.: ПГО "Аэрогоеология", 1982.
37. Красильников И.Н. Теория передачи и восприятия изображения. Теория передачи изображений и ее приложения. М.: Радио и связь, 1986, 248 с.
38. Курякова Г.А., Флоринский И.В. Анализ пространственных отношений структур центрального типа, топографии и педогеологии /Препринт. Пущино: ПНЦ АН СССР, 1991, 14 с.
39. Лисовцева Г.М. Использование аэрокосмической информации при нефтегазопоисковых работах в Красноярском крае //Аэрокосмическая информация в народном хозяйстве Красноярского края и сопредельных регионов. Тез. докл. научно-практ. конф. (Красноярск, 15-17 ноября 1990). Красноярск: Научно-координационный совет по аэрокосмическим исследованиям природных ресурсов СО АН СССР, 1990, с. 46-48.
40. Лопатин А.П., Косяков Н.А., Шолеров В.Н. Оценка дислокационного состояния земной коры на основе автоматизированного дешифрирования космических снимков //Аэрокосмическая информация в народном хозяйстве Красноярского края и сопредельных регионов. Тез. докл. научно-практической конф. (Красноярск, 15-17 ноября 1990). Красноярск: Научно-координационный совет по аэрокосмическим исследованиям природных ресурсов СО АН СССР, 1990, с. 50-51.
41. Методическое руководство по изучению планетарной трещиноватости и линеаментов /Под ред. С.С.Шульца. Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1977, 136 с.
42. Номоконова В.Ф., Трофимов Д.М., Углев Ю.В. и др. Фотографическая фильтрация - метод повышения геологической информативности космических снимков //Известия вузов. Геология и разведка, 1978, № II, с. 136-141.
43. Петров А.И., Януш Д.А. Оптические методы геологического дешифрирования аэрокосмических снимков //Известия вузов. Геология и разведка, 1989, № 12, с. 9-16.
44. Потапов О.А. Оптико-электронная обработка геолого-геофизической информации. М.: Недра, 1984, 304 с.
45. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. М.: Мир, 1982, Кн. I - 312 с., Кн. 2 - 480 с.
46. Рундквист И.К., Тарасенкова Л.В., Данилова М.Ю. и др. Автоматизированная обработка систем линеаментов и выявление глубинного строения сложнодислоцированных областей для целей металлогенического анализа //Аэрокосмические съемки при изучении

нии глубинного строения регионов СССР. Л.: ВСЕГЕИ, 1990, с. 68-78.

47. Русанов А.Б., Яброва Л.А. К характеристике некоторых концентрически-радиальных речных сетей Советского Союза //Изв. АН СССР. Сер.: Географическая, 1973, № 3, с. 95-103.

48. Рябухин А.Г., Харлова О.И., Кутуков Д.А. О возможности появления ложных аномалий на космических изображениях //Известия вузов. Геология и разведка, 1976, № II, с. 149-154.

49. Сахатов В.З., Скублова Н.В., Углев Ю.В. и др. Изучение структуры рудоносных площадей на основе фотопреобразований аэро- и космических изображений //Методы обработки аэро- и космической информации при геологогосъемочных и поисковых работах. Л.: ВСЕГЕИ, 1987, с. 72-84.

50. Скублова Н.В., Тарасенкова Л.В. Использование преобразованных на ЭВМ аэро- и космических снимков при локальном прогнозировании эндогенного оруднения //Методы обработки аэро- и космической информации при геологогосъемочных и поисковых работах. Л.: ВСЕГЕИ, 1987, с. 12-28.

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

52. 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.

53. Структуры центрального типа территории СССР по данным геолого-морфологического анализа. Объяснительная записка к Карте морфоструктур центрального типа территории СССР масштаба I:10000000 /В.В.Соловьев. Л.: ВСЕГЕИ, 1978, III с.

54. Тектоника мезокайнозойских отложений Черноморской впадины /Д.А.Туголесов, А.С.Горшков, Л.В.Мейнер и др. М.: Недра, 1985, 215 с.

55. Тектоническая карта нефтегазоносных областей СССР. Масштаб I:2500000. Гл. ред. Л.Н.Розанов. М.: ВНИГРИ, 1969.

56. Топографическая карта. Джанкой. Лист VI-L-36. Масштаб I:300000. Гл. ред. Е.И.Ардабьева. М.: ГУГК МВД СССР, 1953.

57. Топографическая карта. Севастополь. Лист VIII-L-36. Масштаб I:300000. Гл. ред. Е.И.Ардабьева. М.: ГУГК МВД СССР, 1953.

58. Топографическая карта. Симферополь. Лист IX-L-36. Масштаб I:300000. Гл. ред. Е.И.Ардабьева. М.: ГУГК МВД СССР, 1953.

59. Топографическая карта. Симферополь. Лист I2-36-4 (L-36-Г) Масштаб I:500000. М.: Генеральный штаб МО СССР, 1986.

60. Топографическая карта. Херсон. Лист V-L-36. Масштаб

- 1:300000. Гл. ред. Е.И.Ардабьева. М.: ГУГК МВД СССР, 1953.
61. Федоров А.Е. Структурно-геоморфологическая интерпретация линеаментов, выделенных по космическим снимкам на севере Европейской части СССР //Исследование Земли из космоса, 1983, № 1, с. 15-23.
62. Федоров А.Е. Гексагональные сетки линейных неоднородностей Земли. М.: Недра, 1991, 128 с.
63. Флоринский И.В. Генерализация в картографии: краткий обзор проблемы /Препринт. Пущино: ПНЦ АН СССР, 1991а, 55 с.
64. Флоринский И.В. О дешифрировании природных границ и генерализации изображений структур земной поверхности //Геометрия структур земной поверхности. Пущино: ПНЦ АН СССР, 1991б, с.60-89.
65. Чекунов А.В. Структура земной коры и тектоника юга Европейской части СССР. Киев: Наукова думка, 1972, 176 с.
66. Чурилин М.А. Спиральные системы геологических структур и некоторые приемы их выявления //Тектоника Сибири. Т. 8. Новосибирск: Наука, 1980, с. 73-80.
67. Шарый П.А. Топографический метод вторых производных //Геометрия структур земной поверхности. Пущино: ПНЦ АН СССР, 1991, с. 30-60.
68. Шарый П.А., Курякова Г.А., Флоринский И.В. О международном опыте применения методов топографии в ландшафтных исследованиях (краткий обзор) //там же, с. 15-29.
69. Шарый П.А., Степанов И.Н. О методе вторых производных в геологии //ДАН СССР, 1991, Т. 319, № 2, с. 456-460.
70. Шевырев Л.Т. Кольцевые структуры Воронежской антеклизы //Дистанционные методы при изучении геологии центральных районов Европейской части СССР. М.: Геологический фонд РСФСР, 1985, с. 18-28.
71. Яброва Л.А. Концентрически-радиальные речные сети как индикатор структур центрального типа в пределах Кавказа и других горных стран //Природа и природные ресурсы центральной и восточной части Северного Кавказа. Орджоникидзе: СОГУ им. Хетагурова, 1981, с. 16-25.
72. Януш Д.А., Ефимова З.Г., Скублова Н.В. Использование когерентной оптической обработки при геологическом дешифрировании аэрокосмоснимков //Голография и оптическая обработка информации в геологии и геофизике. Л.: ЛИАШ, 1979, с. 182-192.
73. Януш Д.А., Скублова Н.В., Прутчикова Н.О. Специализированное картографирование природных объектов по космическим снимкам с использованием оптико-электронной системы "Реал" //Кар-

тография в эпоху НТР: теория, методы, практика. Тез. докл. Всес. совещания по картографии. М.: ИГ АН СССР, 1987, с. I63-I65.

74. Burdick R.G., Speirer R.A. Development of a method to detect geologic faults and other linear features from Landsat images // Bureau of Mines, Report of Investigations. 1980. No 8413, 74 p.

75. Fukue K., Shimoda H., Sakata T. Complete lineament extraction with the aid of shadow-free Landsat image // Machine Processing of Remotely Sensed Data with Special Emphasis on Range, Forest, and Wetlands Assessment: Proc. Seventh Int. Symp., June 23-26. 1981. West Lafayette: Purdue University. 1981. P.94-102.

76. Hobbs W.H. Lineaments of the Atlantic Border region // Bull. Geol. Soc. Amer. 1904. Vol.15. P.483-506.

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

78. Lendaris G.G., Stanly G.L. Diffraction - pattern sampling for automatic pattern recognition // Proc. IEEE. 1970. Vol.58. No 2. P.198-216.

79. Masuoka P.M., Harris S., Lowman P.D. et al. Digital processing of orbital radar data to enhance geologic structure: examples from the Canadian shield // Photogramm. Eng. & Remote Sens. 1988. Vol.54. No 5. P.621-632.

80. Moor R.F., Simpson C.J. Image analysis - a new aid in morphotectonic studies // Proc. 17th Int. Symp. Remote Sens of Environment. Vol.3. Ann Arbor: Environmental Research Institute of Michigan. 1983. P.991-1002.

81. Pennock D.J., ZebARTH B.J., de Jong E. Landform classification and soil distribution in hummocky terrain, Saskatchewan, Canada // Geoderma. 1987. Vol.40. No 3-4. P. 297-315.

82. Rochon G. Geologic application of Landsat imagery enhanced by topographic data // Machine Processing of Remotely Sensed Data with Special Emphasis on Range, Forest, and Wetlands Assessment: Proc. Seventh Int. Symp., June 23-26. 1981. West Lafayette: Purdue University, 1981. P.124-131.

83. Saul J.M. Circular structures of large scale and great age on the Earth's surface // Nature. 1978. Vol.271. No 5643. P.345-349.

84. Scanvic J.Y. Methodologie de la recherche par teledetection des coupolas non affleureantes // La Teledetection au Service de la Region. Actes du Colloque tenu a Caen les 1-3

June 1983. Bull. Centre de geomorphologie, 1984, No 28. P.73-81.

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

86. Takahashi H. A lineament enhancement technique for active fault analysis // Machine Processing of Remotely Sensed Data with Special Emphasis on Range, Forest, and Wetlands Assessment: Proc. Seventh Int.Symp., June 23-26, 1981. West Lafayette: Purdue University, 1981. P.103-112.

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

88. Wise D.U. Regional and sub-regional sized fracture systems detectable by topographic shadow techniques // Proc. Conf.Research in Tectonics (Kink Bands and Brittle Deformation), Ottawa, March 1968. Geol.Survey of Canada Paper, 68-52. P.175-198.

89. Xu S.R., Li C.C., Flint N.K. Extraction of geological lineaments from Landsat imagery by using local variance and gradient trend // Machine Processing of Remotely Sensed Data with Special Emphasis on Range, Forest, and Wetlands Assessment: Proc. Seventh Int. Symp., June 23-26, 1981. West Lafayett: Purdue University, 1981, P.113-123.

90. U.S.Patent No. 4698759, 06.10.1987. G 01 V 3/18. Eliason J.R., Eliason V.L.C. Process for structural geologic analysis of topography and point data.

10.01.92 г. Зак.3892Р Тир.450 экз. Изд.№9 Уч.-изд.л. 2,9
Отпечатано с оригинала-макета в ОНТИ ЛИЦ РАН

