

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ**

На правах рукописи
УДК 528:550.814

**ФЛОРИНСКИЙ
ИГОРЬ ВАСИЛЬЕВИЧ**

**АНАЛИЗ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ВЫСОТ
ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ СТРУКТУР ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

05.24.02 - Аэрокосмические съемки, фотограмметрия, фототопография

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА - 1993

Работа выполнена в лаборатории картографии почв Института почвоведения и фотосинтеза Пушкинского научного центра Российской Академии Наук.

Научный руководитель: профессор, доктор сельскохозяйственных наук И. Н. Степанов.

Официальные оппоненты: профессор, доктор технических наук
А. И. Мартыненко
кандидат геолого-минералогических наук А. И. Полетаев

Ведущая организация: лаборатория аэрокосмических методов географического факультета Московского государственного университета

Защита состоится 28 октября 1993 г. в 10.00 часов на заседании специализированного совета К 063.01.02 в Московском государственном университете геодезии и картографии по адресу: 103064, Москва, Гороховский переулок, дом 4, ауд. 321.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГУГиК.

Автореферат разослан 15 сентября 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного совета Красно Б. В. Краснопевцев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Информация о линейных структурах земной поверхности (линеаментах и структурах центрального типа (СЦТ)) применяется при решении геологических задач (Бущ, 1986; Кац, Тевелев, 1987; Федоров и др., 1989; Коалов, 1991; Полетаев, 1992; и др.). Важным этапом изучения линеаментов и СЦТ является их выделение (визуализация) – обработка данных дистанционного зондирования (ДДЗ), топографических, геологических и других материалов для распознавания этих структур на исследуемых территориях.

Среди количественных методов выделения линеаментов и СЦТ наибольшее распространение получили подходы, основанные на использовании аппарата анализа изображений и ориентированные на обработку ДДЗ, хотя эффективность регистрации при дистанционном зондировании основных – топографических – индикаторов структур не всегда очевидна. В то же время, методы визуализации, ориентированные на обработку топографических данных, не получили должного развития. Это вызвано количественной неопределенностью концепций топографических индикаторов линеаментов и СЦТ – фрагментов сети долин/приводораздельных областей, цепочек холмов/депрессий, характеризующихся анизотропией планового распределения. Такая неопределенность затрудняет формализацию подходов. Использование известных методов выделения линейных структур земной поверхности может приводить к потерям информации и к артефактам.

Цель работы. Разработка технологии визуализации линеаментов и СЦТ с использованием аппарата количественного топографического анализа (КТА). Решены следующие задачи:

- количественно определены концепции топографических индикаторов линеаментов и СЦТ, сформулированы принципы их визуализации;
- определены требования к исходным данным – цифровым моделям высот (ЦМВ);
- выбран алгоритм обработки ЦМВ, обеспечивающий выделение линейных структур земной поверхности;
- определены принципы картографирования результатов визуализации;
- выбран метод дополнительной генерализации данных для оптимизации выделения структур;
- для обеспечения верификации разработанной технологии составлена ЦМВ части Крымского полуострова и прилегающего морского дна;
- проведена верификация разработанной технологии – компьютерная обработка составленной ЦМВ;
- осуществлена оценка достоверности результатов визуализации;
- дана их краткая геологическая интерпретация;

- оценена эффективность разработанной технологии;
- осуществлен анализ потенциала разработанной технологии для решения ряда задач тектоники, крупномасштабных геологических исследований, поиска полезных ископаемых и сейсмологии.

Научная новизна работы:

1. Разработана технология визуализации линеаментов и СЦТ с использованием аппарата КТА, включающая: а) составление ЦМВ по квадратной сетке угловых точек с шагом, определяемым по характерному плановому размеру изучаемых структур; б) расчет значений горизонтальной (K_H), вертикальной (K_V), полной гауссовой (K) и средней (H) кривизн с помощью метода Эванса; в) картографическую регистрацию рассчитанных величин с квантованием последних на два уровня относительно их нулевых значений.

2. Концепции топографических индикаторов линеаментов и СЦТ - а) фрагменты сети долин/приводораздельных областей и б) цепочки холмов/депрессий - количественно определяются локальными топографическими величинами - а) K_H , K_V и б) K , H соответственно.

3. С помощью разработанной технологии для части Крымского полуострова и прилегающего морского дна впервые воспроизводимым образом выделены линеаментные системы преимущественно субмеридионального (С), северо-восточного (СВ), северо-западного (СЗ), субширотного (В) азимутов простираения и ряд СЦТ. С-линеаментная система характеризуется ярко выраженной анизотропией.

4. Узлы пересечения линеаментов разного азимута простираения (известные косвенные поисковые признаки некоторых типов месторождений полезных ископаемых) в ряде случаев соответствуют зонам отрицательной аккумуляции, определяемым одновременно отрицательными значениями K_H и K_V (или одновременно отрицательными значениями H и положительными значениями полной аккумуляционной кривизны (K_A)).

Практическая значимость. Разработанная технология позволяет:

- расширить возможности применения ЦМВ при тематическом дешифрировании ДДЗ и картографировании;
- повысить информативность результатов геологических и других исследований ландшафта;
- объективизировать процессы выделения, картографирования и дальнейшего изучения линеаментов и СЦТ за счет: а) количественного определения концепций их топографических индикаторов; б) воспроизводимости алгоритмов; в) возможности их применения при любых масштабах исследования; г) использования исходных данных, достоверность которых гарантируется технологией топографической съемки;
- снизить стоимость работ, в которых применяются данные о линеаментах и СЦТ за счет уменьшения использования для их выделения

ДДЗ (за исключением стереопар), геофизических, геологических и ландшафтных материалов.

Аргументирована полезность применения разработанной технологии при решении ряда задач тектоники, сейсмологии и крупномасштабных инженерно-геологических исследований.

Апробации. Результаты работы докладывались на семинарах лаб. космической геологии МГУ (1991), неотектоники и сеймотектоники МГУ (1992), неотектоники и космической геологии ГИН (1993), каф. физики МИИГАиК (1991), 2 Всес. семинаре "Нетрадиционные методы геофизических исследований неоднородностей в земной коре" (1991), геологической секции МОИП (1992), совместном заседании каф. физической географии и ландшафтного дешифрирования и вычислительной техники и автоматизированной обработки информации МИИГАиК (1992).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 работ, 2 работы - в печати.

Структура и объем. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы (201 наименование) и трех приложений (133 страницы, 14 рисунков, 1 таблица).

Автор признателен Л.М.Бугаевскому, В.В.Дубиновскому, И.Г.Журкину, В.А.Малинникову, Ю.И.Маркузе (МИИГАиК), А.И.Полетаеву, Ю.И.Фивенскому (МГУ), Н.В.Лукиной, В.Г.Трифонову (ГИН РАН), Э.Ф.Повеухиной, П.А.Шарому (ИПКС) и другим коллегам за всестороннюю помощь, оказанную ими при выполнении настоящей работы.

В первой главе анализируются известные подходы визуализации линеаментов и СЦТ. Выделены шесть групп методов, ориентированных на обработку данных топографических съемок, дистанционных изображений, геофизических, геологических, ландшафтных данных и комбинаций указанных материалов (Флоринский, 1992а).

Методы обработки топографических данных предусматривают анализ информации о высотах (z) земной поверхности. Регистрируются линеаменты и СЦТ, индицируемые анизотропией планового распределения фрагментов сети долин/приводорадельных областей, цепочек холмов/депрессий. Регистраторы структур - ЦМВ, некоторые элементы картографического изображения.

Выявление линеаментов по топографическим данным инициировал W.H.Hobbs (1904): визуальный анализ рисунка горизонталей и тальвеговых линий топокарт и выделение анизотропных фрагментов планового распределения указанных элементов рельефа. Подход применялся неоднократно (Неааметдинова, 1970; Чижова, 1973; Методическое руководство..., 1977; Чурилин, 1980; и др.).

Освещение рельефной модели местности для визуализации струк-

тур применял E.S.Hills (1956). Использовалась цифровая отмывка рельефа (Rohon, 1981). Регистратором структур здесь является анизотропия планового распределения различно освещенных участков модели рельефа. Однако подобные подходы чреваты появлением артефактов (Wise, 1968; Batson et al., 1975).

Регистрация $K_n = 0$ (Соболевский, 1932) позволяет составлять карты областей конвергенции и дивергенции, наглядно и относительно воспроизводимо выделять сети долин. Использование таких карт для интуитивной визуализации линейных структур земной поверхности инициировал И.Н.Степанов (Выявление по топокартам..., 1983). Качественный алгоритм визуализации (Флоринский, 1991б) включает составление карты областей конвергенции и дивергенции, ее генерализацию с помощью приближения лапласиана функции Гаусса, построение остова полученного изображения и его согласованную фильтрацию. Апробация этого метода была достаточно успешна (Флоринский, 1991а, б, 1992б; Курякова, Флоринский, 1991).

Объективизацию выделения линеаментов и СЦТ может обеспечить аппарат КТА (Evans, 1980; Шарый, 1991; Shary, 1992) за счет: а) возможности количественного определения с его помощью концепций топографических индикаторов структур; б) использования исходных данных, характеризующихся высокой степенью достоверности - ЦМБ; в) воспроизводимости алгоритмов; г) возможности их применения при любых масштабах исследования.

Методы обработки дистанционных изображений (анализ аэрокосмических снимков различного типа без составления ЦМБ и рисовки рельефа). Регистрируются линеаменты и СЦТ, индицируемые анизотропией планового распределения элементов рельефа, растительного и почвенного покровов и фиксируемых дистанционными методами характеристик компонентов ландшафта. Регистратор структур - оптическая плотность интегрального дистанционного изображения. Однако эффективность регистрации при дистанционном зондировании индикаторов линеаментов и СЦТ не всегда очевидна. Интегральный характер ДДЗ может стать причиной появления при визуализации артефактов.

Ландшафтно-индикационный подход: выделение по ДДЗ изображений анизотропных фрагментов ландшафта, связь которых с геологическим строением установлена на ключевых участках. Метод использовался при визуальном анализе моноснимков (Мирошниченко, 1958; Lattman, 1958; и др.) и стереомоделей (Скублова и др., 1969; Аэрометоды..., 1971).

Контрастно-аналоговый подход: выделение прямолинейных и радиально-концентрических "аномалий" оптической плотности ДДЗ. Подвергается критике из-за слабой обоснованности этого признака ре-

гистрации структур, но получил широкое распространение из-за сравнительной простоты. Одним из первых его применил J.T.Wilson (1941). Широко используется аппарат анализа изображений - повышение контраста аэрокосмических снимков с помощью высокочастотной фильтрации, пространственного дифференцирования и пр. (Янутш и др., 1979; Burdic, Speirer, 1980; Takahashi, 1981; Скублова, Тарасенкова, 1987; Masuoka et al., 1988; Златопольский, 1988 и др.).

Методы обработки материалов геофизических съемок. Регистрируются линеаменты и СЦТ, индицируемые анизотропией планового распределения характеристик геофизических полей. Регистраторы структур - цифровые модели геофизических параметров и некоторые элементы картографического изображения. Визуализация структур по геофизическим данным, представленным в форме изолиний или цифровых моделей, аналогична подходу Хоббса (Можаев, Иванова, 1969; Строеие континентальной земной коры..., 1974), используется геофизический метод вторых производных (Affleck, 1969, 1970).

Методы обработки данных геологических съемок. Регистрируются линеаменты и СЦТ, индицируемые анизотропией планового распределения элементов геологической организации. Регистраторы структур - элементы картографического изображения. Выявление линеаментов по геологическим картам инициировал W.H.Hobbs (1904). Подход используется постоянно (Cloos, 1948; Hills, 1956; Штилле, 1964; Чурилин, 1980; и др.), но не всегда эффективно: нередко трудно соотнести линеаменты/СЦТ и выявленные традиционными методами элементы геологической организации (разломы и пр.).

Методы обработки ландшафтной информации (анализ почвенных, геоморфологических и геоботанических карт). Регистрируются линеаменты и СЦТ, индицируемые анизотропией планового распределения характеристик почвенного и растительного покровов, ландшафта в целом. Регистраторы структур - элементы картографического изображения. Методы этого типа применяются редко: а) пространственные связи линеаментов и СЦТ со свойствами большинства компонентов ландшафта изучены слабо; б) различия методик получения, интерпретации и картографирования ландшафтной информации (Броцкий и др., 1958; Степанов, 1990) определяют сложность использования тематических карт для визуализации структур.

Среди методов обработки комбинаций различных материалов распространен геолого-морфологический анализ В.В.Соловьева (Структуры центрального типа..., 1978), предусматривающий визуальное изучение ДДЗ, топографических и тематических карт. Телескопический метод линеаментного анализа (Полетаев и др., 1991) - комплексная обработка разномасштабных топографических и дистанционных данных.

Во второй главе описана разработанная технология визуализации линеаментов и СЦТ с использованием аппарата КТА.

КТА - система количественных методов визуализации форм земной поверхности и топографических предпосылок массопереноса вдоль нее под действием гравитации. Исходная информация - ЦМБ. Теория КТА основана на физико-математических аппаратах дифференциальной геометрии и теории поля (Шарый, 1991; Shary, 1992). Результаты обработки данных регистрируются в форме карт (Evans, 1980; Флоринский, 1992а). КТА используется для решения задач почвоведения, гидрологии, геоботаники, в других ландшафтных исследованиях (см. обзор (Ostrowski et al., 1990; Шарый и др., 1991)).

Топографически линеаменты и СЦТ индицируются анизотропией планового распределения фрагментов сети долин/приводораздельных областей и цепочек холмов/депрессий. Следовательно, выявление этих элементов рельефа и последующий анализ конфигурации их планового распределения позволит проводить визуализацию структур. Регистрация значений различных топографических величин может с той или иной степенью наглядности и смыслового соответствия выявить долинную сеть и холмы/депрессии. Наибольшая эффективность выявления должна достигаться при использовании величин, физически адекватных интересующей нас информации.

Физическая функция сети долин - перенос вещества вдоль земной поверхности под действием гравитации. Существует два механизма такого массопереноса - конвергенция и относительное замедление потоков вещества, контролируемые k_h и k_v (топографические предпосылки массопереноса) (Shary, 1992). k_v - кривизна нормального сечения земной поверхности плоскостью, включающей в себя 2 вектора: внешней нормали к поверхности и ускорения силы тяжести; $k_v < 0$ определяет области относительного замедления, $k_v > 0$ - области относительного ускорения потоков веществ, движущихся вдоль земной поверхности под действием гравитации. k_h - кривизна нормального сечения, ортогонального сечению с кривизной k_v ; $k_h < 0$ определяет области конвергенции, $k_h > 0$ - области дивергенции потоков (Zevenbergen, Thorne, 1987). Наиболее эффективное выявление сети долин/приводораздельных областей произойдет при вычислении значений k_h и k_v (Флоринский, 1992а). Долинам качественно соответствуют значения k_h , $k_v < 0$, приводораздельным областям - k_h , $k_v > 0$. Применение одной величины - k_h или k_v - для выявления долинной сети мало эффективно: k_h и k_v выделяют разные долинные сети - по признаку "используемого" ими механизма массопереноса.

Не строго изометричный холм/депрессия может быть аппроксимирован эллиптической поверхностью. Ее точкам соответствуют значе-

8

ния $K > 0$; $K < 0$ отвечает седловым точкам (Gauss, 1827). K - прогибание кривизин двух главных нормальных сечений; является инвариантом изгибания - если при деформации поверхности происходит ее изгибание без растяжений/сжатий или разрывов, значения K остаются неизменными. В силу этого выявляет структуры, скрытые депрессиями или наклоном (Шарый и др., 1991; Флоринский, 1991а). В случае "холма" выпуклость поверхности ориентирована по направлению вектора нормали в данной точке земной поверхности, в случае "депрессии" - наоборот. Это различие определяется с помощью H - полусуммы кривизин двух взаимноперпендикулярных нормальных сечений (Погорелов, 1974). Для точек вогнуто-вогнутых поверхностей $H < 0$, для выпукло-выпуклых - $H > 0$. Для топографического выделения "холмов" и "депрессий" необходимо применять данные о K с учетом знака H : значения $K > 0$, $H > 0$ соответствуют понятию "холм", $K > 0$, $H < 0$ - "депрессия" (Шарый, 1991).

Итак, если плановое распределение фрагментов сети долин/водораздельных областей, холмов/депрессий территории имеет анизотропный характер, вычисление и картографирование k_h , k_v , K и H позволит выделить линеаменты и СЦТ.

Исходной информацией при КТА служат ЦМВ. Применяемая для визуализации линеаментов и СЦТ ЦМВ должна содержать информацию о всех выраженных в рельефе линеаментах и СЦТ с некоторым характерным размером в плане (Phillips, 1988) (ширина, диаметр структур). Для этого необходимо выполнение двух условий: а) ЦМВ должна быть построена по квадратной сетке угловых точек, б) величина шага сетки w должна функционально зависеть от заданного характерного размера L изучаемых структур: $w = L/2$.

При задании функции высоты в форме $z = f(x, y)$ для выражения k_h , k_v , K и H используются ее частные производные $p = \delta z / \delta x$, $q = \delta z / \delta y$, $r = \delta^2 z / \delta x^2$, $s = \delta^2 z / \delta x \delta y$, $t = \delta^2 z / \delta y^2$ (Gauss, 1827; Погорелов, 1974; Шарый, 1991):

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

$$H = - [(1 + q^2)r - 2pqs + (1 + p^2)t] / [2(1 + p^2 + q^2)^{3/2}], \quad (2)$$

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

$$k_v = - (p^2 r + 2pqs + q^2 t) / [(p^2 + q^2)(1 + p^2 + q^2)^{3/2}]. \quad (4)$$

Для вычисление по ЦМВ k_h , k_v , K и H нами выбран метод Эванса (Evans, 1980): в центральных точках подрешеток 3×3 ЦМВ значения

p, q, r, s, t оцениваются по формулам:

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

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

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

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

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

где z_i - значение высоты в i -ой точке подрешетки 3×3 , $i = (1, \dots, 9)$, нумерация слева направо, w - шаг сетки ЦМВ.

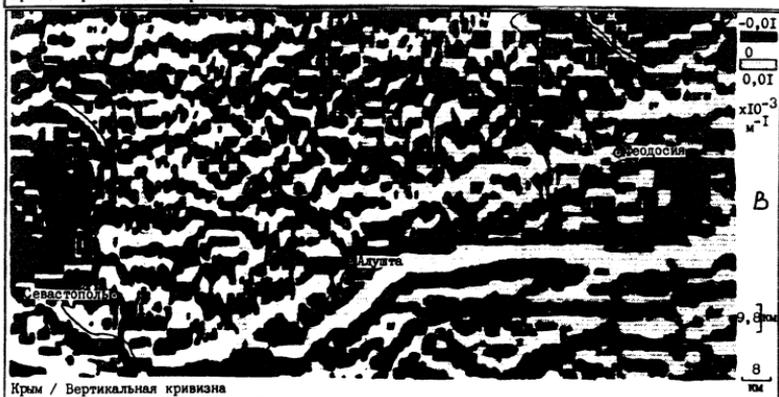
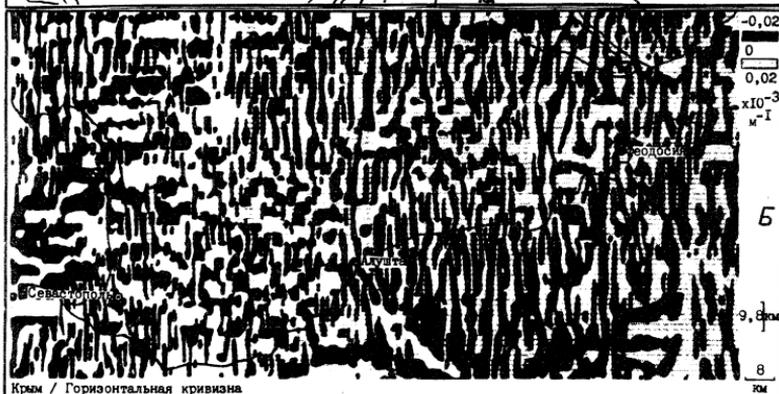
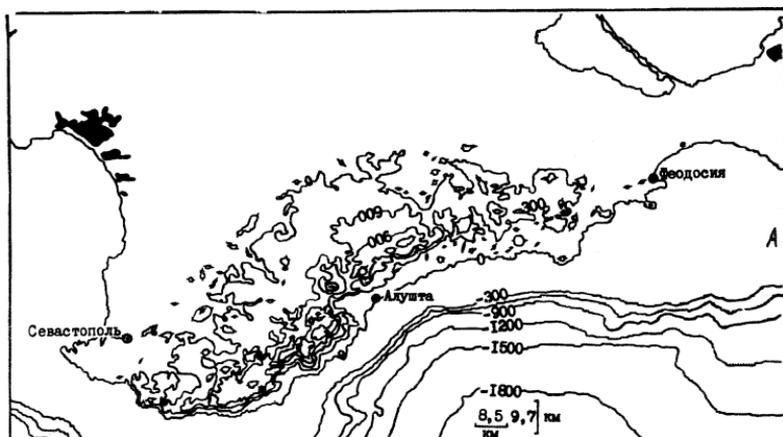
Земная поверхность - сложный природный объект, поэтому КТА предусматривает генерализацию данных о z . Необходимый уровень генерализации при изучении структур земной поверхности оценивается по L . Наличие в ЦМВ шумов определяет необходимость ее низкочастотной фильтрации. Уже само составление ЦМВ (дискретизация функции z по пространственным переменным) осуществляет предварительную генерализацию данных. Создание ЦМВ путем цифрования горизонталей топокарт, составленных на основе карт более крупных масштабов, учитывает генерализованность изолиний. Фильтрация шумов происходит и при использовании метода Эванса (Evans, 1980).

Генерализация может решать задачу выявления характерных признаков, свойств и взаимосвязей предметов изучения (Берлянт, 1975), играть роль дополнительного средства анализа данных. Применительно к визуализации линеаментов и СЦТ она может облегчить определение тенденций планового распределения структур. Дополнительная генерализация ЦМВ возможна при использовании известных подходов (Флоринский, 1991а). Нами использован метод скользящего среднего.

Результаты визуализации линеаментов и СЦТ регистрируются в форме карт. При картографировании значения вычисленных топографических величин должны быть квантованы на два уровня: больше и меньше их нулевых значений. При регистрации значений K_H и K_V получаются абсолютно контрастные карты, а при интегральной регистрации данных о K и H - изображения, "квантованные" на три уровня.

В третьей главе проведена верификация разработанной технологии выделения линеаментов и СЦТ.

ЦМВ участка (рис. 1 А) получена в результате цифрования горизонталей топографических карт масштабов 1:300000 и 1:500000. Не-



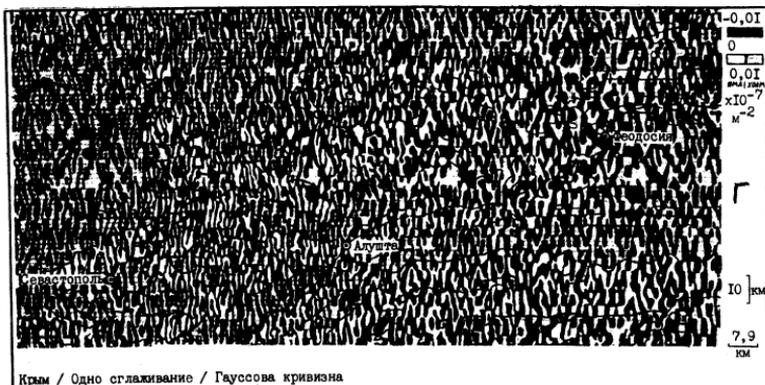


Рис. 1. Часть Крымского полуострова и прилегающего морского дна. А - горизонтали, высота сечения 300 м, заштрихованы соленые озера; Б - K_H , области конвергенции - черный цвет, дивергенции - белый; В - K_V , области относительного замедления - черный цвет, относительного ускорения - белый; Г - K (с учетом H), седловые участки - черный цвет, холмы - белый, депрессии - штриховка (А, Б, В - несглаженная ЦМВ, Г - сглаженная ЦМВ) (Флоринский, 1992а).



Рис. 2. Зоны разрывных нарушений Крымского п-ова: А - зоны глубинных трансрегиональных дорифейских С-разломов (Солдогоуб, 1960; Ковалевский, 1965; Тектоническая карта..., 1969;

Чекунов, 1972): 1 - Одесского, 2 - Евпаторийско-Скадовского, 3 - Симферопольско-Алуштинского, 4 - Конско-Беловерского, 5 - Орехово-Павлоградского, 6 - Корсакско-Феодосийского, 7 - Мариупольско-Керченского; Б - зоны трансрегиональных разрывных нарушений В, СЗ и СВ азимутов (Шалимов, 1966; Лебедев, Оровецкий, 1966; Нечаев, Тесленко, 1966; Карта разломов..., 1978): 1 - Предгорного Крымско-Кавказского, 2 - Ялтинского разломов, 3 - Херсонесско-Сарычская, 4 - Алуштинско-Симферопольская.

регулярная ЦМВ (11936 точек, 210x132 км) составлена в прямоугольной декартовой системе координат с началом в точке с географическими координатами 44°20' с.ш. и 33°13' в.д. и $z = 0$.

Регуляризация ЦМВ осуществлена с помощью программного обеспечения (авторы - П.А.Шарый, В.И.Хачко, В.А.Карпов). Применен $w = 1500$ м. Регулярная ЦМВ включает 12784 точки.

K_H (рис. 1 Б) визуализовала, в основном, С-долинные сети северного и южного склонов Крымских гор, которые при данном масштабе соответствуют областям конвергенции территории и индицируют С-систему линейных элементов. В меньшей степени визуализованы линейные элементы В, СВ и СЗ азимутов. Вычисление K_H сглаженных версий ЦМВ позволяет получить менее сложные для восприятия карты, тенденция визуализации С-линейных элементов сохраняется. При внешней неупорядоченности рельефа территории (рис. 1 А) обращает внимание анизотропия областей конвергенции (рис. 1 Б), выраженная при характерной ширине структур около 3 км. В пределах данной территории столь плотная и анизотропная сеть С-линейных элементов выделена впервые.

K_V (рис. 1 В) выделила, в основном, долинную сеть СЗ склонов гор и продольные долины СВ и В простирания, которые при данном масштабе лежат в областях относительного замедления. Выявляются элементы рельефа генерального СВ азимута: гряды Крымских гор, фрагменты шельфа и материкового склона. Таким образом, выделены СВ и СЗ системы линейных элементов и, частично - В. Выявляется несколько СЦТ. Вычисление K_V сглаженных версий ЦМВ упрощает карты, тенденция визуализации указанных структур сохраняется.

K (рис. 1 Г) визуализовала С-цепочки седловин и холмов/депрессий, которые индицируют С-линейную систему. Учет H позволяет выделить цепочки седловин-депрессий и седловин-холмов СВ простирания, индицирующих соответствующую систему линейных элементов.

Проведена оценка достоверности результатов верификации разрабатываемой технологии. Яркая анизотропия С-линейных элементов и выделенность направлений простирания структур артефактами не являются.

Сравнительный анализ (Флоринский, 1992а) результатов выделения линейных структур и опубликованных геолого-геофизических данных определил, что 98 линейных элементов и СЦТ - фактически все известные структуры данного масштаба - регистрируются при расчете K_H , K_V , K и H . Впервые выделены 26 СЦТ и около 270 линейных элементов.

Геологическая интерпретация результатов визуализации осуществлена (Флоринский, 1992а) путем сравнительного анализа опубликованных геолого-геофизических материалов и полученных карт. Выделенные С-линейные элементы (рис. 1 Б, Г) представляют собой, вероятно, зоны трещиноватости осадочного чехла, связанные с системой глубинных трансрегиональных дорифейских С-разломов (рис. 2 А). Линейные элементы СВ, СЗ и В азимутов (рис. 1 В), видимо, в основном, также зоны трещиноватости осадочного чехла, связанные с трансрегиональными разломами - Предгорным Крымско-Кавказским и Ялтинским (рис. 2 Б), а также со структурами Крымского альпийского мегантиклинория, имеющего генеральное СВ простирание. Часть выделенных на

данной территории СЦТ являются купольными поднятиями, часть - депрессиями.

Научная эффективность разработанной технологии визуализации линеаментов и СЦТ определяется: а) возможностью объективизации процессов выделения, картографирования и дальнейшего изучения структур за счет количественного определения концепций их топографических индикаторов; б) возможностью получения информации о линеаментах и СЦТ воспроизводимым образом; в) отсутствием ограничений к использованию технологии при любых масштабах исследования; г) достоверностью используемых исходных данных - ЦМБ.

Применение разработанной технологии эффективно в техническом плане: время построения на экране монитора одной карты размером 162x195 - около 10 мин при использовании IBM-PC/AT 80386.

Экономическая эффективность разработанной технологии определяется возможностью снижения стоимости работ, в которых применяются данные о линеаментах и СЦТ, за счет уменьшения применения для их визуализации ДДЗ (за исключением стерепар), геологических, геофизических и ландшафтных данных (использование указанных материалов на других этапах изучения структур не исключается).

В четвертой главе проведен анализ потенциала разработанной технологии для решения ряда задач тектоники, крупномасштабных геологических исследований, поиска полезных ископаемых и сейсмологии. Материал носит характер оценки перспективы.

К - инвариант изгибания (Gauss, 1827); это свойство дает возможность реконструкции форм палеорельефа. Карта К (рис. 1 Г) регистрирует С-линеаменты, игнорируя генеральное СВ простирание мегантиклинория - наиболее молодой и выраженной в рельефе структуры Крыма. Вероятно, это указывает, что в период формирования С-линеаментов мегантиклинория еще не существовало. Отсутствие на карте К структур мегантиклинория свидетельствует также, что деформации рельефа, связанные с поднятием Крымских гор, проходили без заметных для данного масштаба и в пределах рассматриваемой территории поверхностных разрывов, сжатий и растяжений. Учитывая амплитуду поднятия, это обстоятельство можно объяснить отрывом от прилегающих южных областей части геологических слоев и постепенным перемещением их к северу для компенсации поднятия. Такая гипотеза не противоречит представлениям ряда геологов о механизме образования Черноморской впадины (Беляевский, Михайлов, 1980).

При решении некоторых задач инженерной геологии необходимо иметь представление о структуре поверхности горизонтов подстилающих пород. Для этого может быть полезен крупномасштабный линеа-

ментный анализ (Шульц, 1965, 1970). В г. Пущино на глубине от 4 до 8 м залегают трещиноватые известняки среднего карбона. Обработка (вычисление и картографирование K) ЦМВ отрога оврага, полученной при тахеометрической съемке масштаба 1:200, выделяет топографические линеаменты СВ и СЗ азимутов, индицируемые цепочками эллиптических поверхностей (Флоринский, 1991а). Возможно, это является проявлением трещиноватости известняков. По карте K мощность последних может быть оценена (Шульц, 1966) около 3 м, что не противоречит данным по соседним участкам (Басаев и др., 1984).

Узлы пересечения линеаментов разных азимутов простирания - косвенные поисковые признаки для некоторых типов месторождений полезных ископаемых (Металлогения..., 1984; Федоров и др., 1989; Полетаев, 1992; и др.). Для определения части таких узлов достаточно совместить карты k_H и k_V (рис. 1 Б и В). Узлы пересечения линеаментов, индицируемых фрагментами областей конвергенции, с линеаментами, индицируемыми фрагментами областей относительного замедления, соответствуют зонам относительной аккумуляции ($k_H, k_V < 0$ или $K_A > 0, H < 0$, где K_A - произведение k_H и k_V (Shary, 1992)) - топографическим предпосылкам накопления перемещаемых под действием гравитации масс (Шарый и др., 1991).

При изучении сейсмоактивных зон внимание также уделяется узлам пересечения линеаментов разных азимутов, к которым могут быть приурочены эпицентры землетрясений (Коалов, 1991; Полетаев, 1992). В Крыму некоторые из них группируются в узлах пересечения трансрегиональных С-разломов с Ялтинским разломом (Горшков, Левичкая, 1946; Пустовитенко, Тростников, 1977; Кармазин, 1981). Линеаменты С-разломов визуализованы k_H (рис. 1 Б), линеаменты В, СВ и СЗ систем индицирует, преимущественно, k_V (рис. 1 В). Часть морских эпицентров группируется по СЗ-линеаментам, с которыми генерально совпадают направления долин рек Черной, Бельбена, Качи (Шалимов, 1966). k_H четко регистрирует эти структуры (рис. 1 Б).

ВЫВОДЫ

1. Разработана технология визуализации линеаментов и СЦТ с использованием аппарата КТА, включающая: а) составление ЦМВ по квадратной сетке узловых точек с шагом, определяемым по характерному плановому размеру изучаемых структур; б) расчет значений k_H, k_V, K и H с помощью метода Эванса; в) картографическую регистрацию рассчитанных величин с квантованием последних на два уровня относительно их нулевых значений.

2. Концепции топографических индикаторов линеаментов и СЦТ - а) фрагменты сети долин/приводорадельных областей и б) цепочки

холмов/депрессий - количественно определяются локальными топографическими величинами - а) K_H , K_V и б) K , H соответственно.

3. С помощью разработанной технологии для части Крымского полуострова и прилегающего морского дна впервые воспроизводимым образом визуализованы линеаментные системы преимущественно С, СВ, СЗ, В азимутов простирания и ряд СЦТ. С-линеаментная система характеризуется ярко выраженной анизотропией и связана, вероятно, с системой зон С-трансрегиональных дорифейских глубинных разломов юга Восточно-Европейской платформы. Линеаменты СВ, СЗ и В азимутов связаны, видимо, со структурами альпийского Крымского мегантиклинория и зонами Предгорного Крымско-Кавказского и Ялтинского разломов.

4. Уалы пересечения линеаментов разного азимута простирания (известные косвенные поисковые признаки некоторых типов месторождений полезных ископаемых) в ряде случаев соответствуют зонам носительной аккумуляции, определяемым K_H , $K_V < 0$ ($H < 0$, $K_A > 0$).

5. Сравнительный анализ карт K_H , K_V , K , H и известных геолого-геофизических данных позволяет аргументировать относительный возраст линеаментов разных азимутов простирания, оценивать достоверность региональных тектонических гипотез.

6. Разработанная технология выделения линеаментов и СЦТ эффективна в научном, техническом и экономическом плане. Она позволяет:

- расширить возможности применения ЦМБ для целей тематического дешифрирования ДДЗ и картографирования;
- повысить информативность результатов геологических и других исследований ландшафта;
- объективизировать процессы выделения, картографирования и дальнейшего изучения линеаментов и СЦТ за счет: а) количественного определения концепций их топографических индикаторов; б) воспроизводимости алгоритмов; в) возможности их применения при любых масштабах исследования; г) использования исходных данных, достоверность которых гарантируется технологией топографической съемки;
- снизить стоимость работ, в которых применяются данные о линеаментах и СЦТ, за счет уменьшения использования для их визуализации ДДЗ (за исключением стереопар), геофизических, геологических и ландшафтных материалов.

7. Аргументирована полезность применения разработанной технологии визуализации линеаментов и СЦТ для решения ряда сейсмологических и крупномасштабных инженерно-геологических задач.

Публикации по теме диссертационной работы

1. Курякова Г.А., Флоринский И.В. Анализ пространственных отношений структур центрального типа, топографии и педогеологии. Пушино: ПНЦ АН СССР, 1991, 14 с.

2. Степанов И.Н., Флоринский И.В., Шарый П.А. О концептуальной схеме исследований ландшафта //Геометрия структур земной поверхности. Пушино: ПНЦ АН СССР, 1991, с. 9-15.

3. Флоринский И.В. О дешифрировании природных границ и генерализации изображений структур земной поверхности //там же, с. 80-89.

4. 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.

5. Флоринский И.В. Генерализация в картографии: краткий обзор проблемы. Пушино: ПНЦ АН СССР, 1991а, 55 с.

6. Флоринский И.В. О воспроизводимом алгоритме картографического выявления структур центрального типа (СЦТ) //Кольцевые структуры и морфоструктуры (теоретические и прикладные аспекты). Тез. докл. Всес. сов., апр. 1991. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1991б, с. 6.

7. Флоринский И.В. Визуализация линеаментов и структур центрального типа: количественные топографические подходы. Пушино: ПНЦ РАН, 1992а, 47 с.

8. Флоринский И.В. Структуры центрального типа Средней Азии и южных районов Казахстана. Пушино: ПНЦ РАН, 1992б, 44 с.

9. Курякова Г.А., Флоринский И.В. О двух закономерностях пространственных связей структур центрального типа (СЦТ), топографии и педогеологии //Проблемы очагового геотектогенеза. Владивосток, 1993 (в печати).

10. Флоринский И.В. Количественные топографические подходы визуализации линеаментов и структур центрального типа. - Бюлл. МОИП, 1993 (в печати).

17.12.92 г. Зак.5685Р. Тир.120 экз. Уч.-изд.л. 1,0
Отпечатано на роталпринте в СНТИ ПИЦ РАН

