

УДК 550.341

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТ РАЗДРОБЛЕННОСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ ФОРМАЛИЗОВАННЫМ АЛГОРИТМОМ ПО ГРАВИТАЦИОННЫМ И ТОПОГРАФИЧЕСКИМ ДАННЫМ

В.А. Желиговский, О.М. Подвигина, А.М. Садовский

*Международный институт теории прогноза землетрясений  
и математической геофизики Российской академии наук*

Изучается раздробленность Земной коры на территории Калифорнии применением к данным о топографии и гравитационных аномалиях Буге формализованного алгоритма определения линейных структур по значениям геофизических полей на регулярной сетке. Распознанные линейные структуры в ряде случаев совпадают с известными разломами. Они могут быть интерпретированы как границы геологических отдельностей, глубинные при распознавании по данным об аномалиях Буге, и приповерхностные при распознавании по данным об альтитудах. Предсказаны области, где могут быть расположены горизонтальные разломы. Показана приуроченность слабой ( $M \geq 3$ ) и сильной ( $M > 6$ ) сейсмичности к территориям, где выявлена раздробленность Земной коры.

## ON DETERMINATION OF FRACTALITY AREAS OF THE EARTH'S CRUST BY A FORMALIZED ALGORITHM FROM GRAVITY AND TOPOGRAPHY DATA

V. A. Zheligovsky, O. M. Podvигина, A. M. Sadovsky

*International Institute of Earthquake Prediction Theory  
and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences*

The fractality of the Earth's crust on the territory of California is studied by application of formalized algorithm of determination of linear structures to data on the Bouguer gravity anomaly and topography. The recognized linear structures coincide in certain cases with the known faults. They can be interpreted as the boundaries of geological partitions of the crust, which are deep in the case of recognition based on the Bouguer anomalies data, or shallow, if the recognition is based on the data on altitudes. The regions where horizontal faults can reside are predicted. The correlation of weak ( $M \geq 3$ ) and strong ( $M > 6$ ) seismicity with the recognized regions of the fractality of the Earth's crust is shown.

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящее исследование является непосредственным продолжением работ [1,2].

Согласно современным представлениям о сейсмическом процессе землетрясения могут иметь место только там, где достаточно велика степень нарушения сплошности Земной коры, а их максимально возможная магнитуда зависит от величины разрушенного объема Земной коры, участвующего в геотектонических процессах [3–5]. Поэтому представляет интерес задача об определении мест значительных нарушений сплошности Земной коры и оценке объема ее разрушенной части.

Там, где происходят тектонические движения, плотностные неоднородности внутри Земной коры можно интерпретировать как геологические отдельности, которые характеризуются определенными физико-механическими свойствами, постоянными внутри каждой из них. Границы между такими отдельностями являются переходными зонами, в которых напряжения достигают максимальных значений [6]. Наличие высокой концентрации плотностных неоднородностей и резких изменений мощности Земной коры указывают на то, что в этих местах происходили или происходят тектонические движения, сопровождаемые разрушением Земной коры.

Эти изменения хорошо коррелируются с аномалиями Буге: при вертикальных тектонических движениях, как древних, так и современных, границы между взаимосмещающимися блоками Земной коры характеризуются повышенными значениями горизонтального градиента (т.е. вектора частных производных вдоль направлений, касательных к поверхности Земли) аномалий Буге (см. [6]).

Основной показатель деформированности Земной коры на дневной поверхности и нарушения сплошности приповерхностных слоев Земной коры – это наличие гор. Объемы земной коры, охваченные горообразованием, характеризуют масштабы тектонических процессов, которые привели к образованию гор.

Таким образом, информация о степени раздробленности Земной коры содержится в данных о гравитационных аномалиях и топографии, точнее, – наличие локальной раздробленности проявляется в повышенной локальной вариации этих полей. В ряде работ предприняты успешные попытки извлечь эту информацию, изучая горизонтальный градиент синтетического параметра  $S = H + 10B$  ( $H$  – альтитуда в метрах,  $B$  – величина гравитационной аномалии Буге в миллигальах) [7], и продемонстрировать корреляцию больших величин  $\nabla S$  с сейсмичностью [7–9].

В [1] предложен формализованный алгоритм определения линейных структур, соответствующих относительно большим горизонтальным градиентам некоторого поля, заданного на достаточно подробной для данной конкретной задачи прямоугольной сетке. Распознанные линейные структуры в ряде случаев совпадают с известными разломами и могут быть интерпретированы как границы геологических отдельностей, а их площадная плотность может характеризовать степень раздробленности Земной коры.

В данной работе мы исследуем раздробленность Земной коры в Калифорнии, применяя этот алгоритм к данным о топографии, гравитационных аномалиях Буге и параметру  $S$ , и рассматриваем приуроченность слабой ( $M \geq 3$ ) и сильной ( $M > 6$ ) сейсмичности к территориям, где распознана эта раздробленность.

## АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ СТРУКТУР

Для полноты изложения ниже воспроизведен алгоритм определения линейных структур (см. [1]) по относительно большим горизонтальным градиентам некоторого поля  $\mathbf{f}$ .

Пусть на поверхности Земли задана прямоугольная топографическая сетка, сориентированная вдоль осей  $x$  и  $y$ , и область  $G$ , внутри которой в узлах сетки задано поле  $\mathbf{f}$ . Значения поля  $\mathbf{f}$  в узле  $(i_x, i_y)$  обозначим через  $\mathbf{f}(i_x, i_y)$ .

Алгоритм аппроксимирует распознаваемые линейные структуры ломанными линиями, состоящими из сегментов, сориентированных вдоль осей  $x$  и  $y$  и соединяющих отдельные узлы сетки. Такая аппроксимация корректна с геофизической точки зрения, если сетка, на которой задано поле  $\mathbf{f}$ , достаточно подробна. Так, в настоящей работе использованы данные, представленные на сетке с размерами ячейки  $1\text{км} \times 1\text{км}$ .

Для сегмента, сориентированного вдоль оси  $x$  и соединяющего соседние узлы сетки с координатами  $(i_x, i_y)$  и  $(i_x + 1, i_y)$ , определим скачок поля  $\Delta_x(i_x, i_y) = |\mathbf{f}(i_x, i_y) - \mathbf{f}(i_x + 1, i_y)|/\delta_x$ , где  $\delta_x$  – длина данного сегмента. Аналогично для сегмента, сориентированного вдоль оси  $y$  и соединяющего узлы сетки с координатами  $(i_x, i_y)$  и  $(i_x, i_y + 1)$ , определим скачок  $\Delta_y(i_x, i_y) = |\mathbf{f}(i_x, i_y) - \mathbf{f}(i_x, i_y + 1)|/\delta_y$ , где  $\delta_y$  – длина данного сегмента.

Алгоритм синтезирует распознаваемые линейные структуры из тех сегментов, которые удовлетворяют следующим трем условиям:

для сегмента, сориентированного вдоль оси  $x$ :

1.  $\Delta_x(i_x, i_y) \geq \Delta$ ;
2.  $\Delta_x(i_x, i_y) \geq \alpha \Delta_x(i_x + k, i_y)$  для всех  $k \neq 0$ ,  $|k| \leq K$  таких, что пара узлов  $(i_x + k, i_y)$  и  $(i_x + k + 1, i_y)$  принадлежит  $G$ ;
3.  $\Delta_x(i_x, i_y) \geq \beta \bar{\Delta}_x(i_x, i_y)$ , где  $\bar{\Delta}_x(i_x, i_y) = \sum \Delta_x(i_x + k, i_y)/N_x(i_x, i_y)$ , суммирование производится по всем  $k \neq 0$ ,  $|k| \leq \bar{K}$ , таким, что пара узлов  $(i_x + k, i_y)$  и  $(i_x + k + 1, i_y)$  принадлежит  $G$ , а  $N_x(i_x, i_y)$  – число слагаемых в этой сумме;

для сегмента, сориентированного вдоль оси  $y$ :

1.  $\Delta_y(i_x, i_y) \geq \Delta$ ;
2.  $\Delta_y(i_x, i_y) \geq \alpha \Delta_y(i_x, i_y + 1)$  для всех  $k \neq 0$ ,  $|k| \leq K$  таких, что пара узлов  $(i_x, i_y + k)$  и  $(i_x, i_y + k + 1)$  принадлежит  $G$ ;
3.  $\Delta_y(i_x, i_y) \geq \beta \bar{\Delta}_y(i_x, i_y)$ , где  $\bar{\Delta}_y(i_x, i_y) = \sum \Delta_y(i_x, i_y + k)/N_y(i_x, i_y)$ , суммирование производится по всем  $k \neq 0$ ,  $|k| \leq \bar{K}$ , таким, что пара узлов  $(i_x, i_y + k)$  и  $(i_x, i_y + k + 1)$  принадлежит  $G$ , а  $N_y(i_x, i_y)$  – число слагаемых в этой сумме.

Таким образом, регулярность работы алгоритма нарушается вблизи границы области  $G$  (на расстоянии ближе  $\max(K, \bar{K})$ ), так как здесь число неравенств, проверяемых в условии 2, оказывается меньше  $2K$ , а число интервалов, по которым рассчитываются средние  $\bar{\Delta}$  в условии 3, становится меньше  $2\bar{K}$ .

Константы  $\Delta$ ,  $\alpha$ ,  $K$ ,  $\beta$  и  $\bar{K}$  являются параметрами алгоритма. При  $K \geq \bar{K}$  и  $\alpha \geq \beta$  условие 3, очевидно, слабее условия 2. Увеличение любого из параметров  $\Delta$ ,  $\alpha$ ,  $K$ ,  $\beta$  отвечает ужесточению условий, которым удовлетворяют сегменты распознаваемых линейных структур, т.е. соответствует распознаванию более контрастных структур (разломов более высокого ранга). При  $\alpha > 1$ , если

два распознанных сегмента принадлежат одной и той же прямой  $x = \text{const}$ , то расстояние между ними не меньше  $K\delta_x$ ; если они принадлежат одной и той же прямой  $y = \text{const}$  – то не меньше  $K\delta_y$ . Таким образом, при  $\alpha > 1$  параметр  $K$  контролирует расстояние между выявляемыми линейными структурами и, как следствие, их площадную плотность.

## ТЕКТОНИКА ИССЛЕДУЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ

В настоящей работе мы выбрали для исследования территорию Калифорнии, так как для нее имеются подробные базы данных о геофизических полях, сейсмичности и разломах.

Рассмотрим тектонические особенности системы разломов Сан-Андреас [10]. На рис. 1 приведены карты-схемы, где номерами обозначены тектонические объекты, упоминаемые в тексте.

Разлом Сьерра-Приэто, отделяющий Тихоокеанскую плиту от континентальной, на территории Северной Мексики (широта около  $32^{\circ}30' \text{N}$ ) делает довольно крутой (примерно на  $20^{\circ}$ ) поворот на восток, и только на широте  $33^{\circ}30' \text{N}$  вновь принимает прежнее направление (под новым названием – Сан-Андреас). Тихоокеанская плита в этом регионе движется на северо-восток, и в силу упомянутого выше отклонения разлома Сьерра-Приэто здесь возникли две зоны растяжения земной коры: южная геотермальная зона Сьерра-Приэто и северная сейсмичная зона Бравлея, которые соединены Имперским разломом. Южнее широты  $33^{\circ}30' \text{N}$ , где собственно и начинается разлом Сан-Андреас, параллельно ему со стороны Тихоокеанской плиты находятся две другие разломные зоны: Сан-Джасинто, пересекающая Южно-Калифорнийский Батолит, и Эльсиноре, проходящая через Полуостровные Хребты и упирающаяся своим северным окончанием в восточные предместья Лос-Анжелеса.

На широте около  $34^{\circ}10' \text{N}$  к системе разломов Сан-Андреас примыкает с востока разлом Пинто Маунтен, являющийся южной границей буферной зоны между Горячей пустыней и пустыней Мохави. Со стороны пустыни Мохави находится значительное число разломов, близких по простиранию к разлому Сан-Андреас, а со стороны Тихоокеанской плиты расположены Поперечные Хребты и сопровождающие их разломы, самый значительный из которых – Санта-Моника. Появление Поперечных Хребтов к западу от разлома Сан-Андреас связано с тем, что со стороны континентальной плиты в зоне тройного сочленения Великой Долины, Сьерра-Невадского Батолита и мегаблока Мохави система Сан-Андреас делает резкий поворот на запад, что создает обширную зону сжатия со стороны Тихоокеанской плиты между разломами Санта-Моника и Биг Пайн. Причиной этого поворота принято считать рост и соответствующее расширение Сьерра-Невадского Батолита в западном направлении.

На широте  $35^{\circ} \text{N}$  система Сан-Андреас снова поворачивает на север и практически не меняет своего направления до широты  $36^{\circ}40' \text{N}$ , после чего плавно поворачивает на запад, огибая Бэй Эреа, что, по-видимому, обусловило появление разломов Калаверас и Хайвард, огибающих Бэй Эреа с востока. Этот поворот не привел к появлению зоны поперечного сжатия Тихоокеанской плиты.

Таким образом, в целом для системы разломов Сан-Андреас характерно текто-

ническое движение типа strike-slip. При этом в самой южной ее части – зона растяжения, а в районе Поперечных Хребтов – зона сжатия со стороны Тихоокеанской плиты, способствовавшая возникновению систем разломов Сан-Джасинто и Эльсиноре, самих Поперечных Хребтов и связанных с ними разломов и небольшой зоны субдукции в восточной части пролива Санта-Барбара. В целом в Южной Калифорнии развитая сеть разломов располагается на обширной территории.

В Северной Калифорнии векторы движения Тихоокеанской плиты и системы разломов Сан-Андреас расходятся под острым углом. Здесь к востоку от системы Сан-Андреас параллельно располагается Великая Долина – гигантский синклиниорий, внутри которого нет хорошо развитой системы разломов. В силу этого разломная зона Северной Калифорнии по сравнению с Южной сильно сужена, и контраст между разрушенной и неразрушенной частями Земной коры выглядит значительно ярче.

В дальнейшем мы рассматриваем регионы Северной ( $36^{\circ}$ – $39^{\circ}$ N,  $120^{\circ}$ – $124^{\circ}$ W) и Южной ( $32^{\circ}$ – $36^{\circ}$ N,  $115^{\circ}$ – $122^{\circ}$ W) Калифорнии отдельно из-за наличия в них перечисленных выше тектонических особенностей.

Сложность распознавания разломов и определения областей с разрушенной Земной корой обусловлена тем, что основные тектонические движения на исследуемой территории происходят вдоль линии контакта Северо-Американского континента и Тихоокеанской плиты и являются чисто горизонтальными, а вызванные ими вторичные вертикальные движения незначительны. Таким образом, на этой территории нет нарушений изостатического равновесия, которые всегда присутствуют при вертикальных движениях и хорошо представлены в гравитационных аномалиях Буге как смещение границы Мохо. В рассматриваемом случае вариации аномалий Буге отражают в основном локальные плоскостные неоднородности, возникающие при движении типа strike-slip, которые могут быть либо плутонами, либо объемами Земной коры, перенесенными в процессе геотектонического движения в зоны с другой среднекоровой плотностью.

## РАСПОЗНАВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ СТРУКТУР ПО ДАННЫМ ОБ АНОМАЛИЯХ БУГЕ И ТОПОГРАФИИ

Карты для Северной и Южной Калифорнии с линейными структурами, распознанными описанным выше алгоритмом, представлены на рис. 2, 3. Анализ карт показывает, что площадную плотность распознанных линейных структур можно рассматривать как характеристику степени разрушенности Земной коры, а сами линейные структуры интерпретировать как границы геологических формаций в Земной коре. Отметим, что при распознавании по топографическим данным эта интерпретация может быть не состоятельна в тех местах, где рельеф сформировался под действием процессов эрозии.

Так, при использовании данных об аномалиях Буге в Северной Калифорнии не распознаны линейные структуры в консолидированной Великой долине и в горах Дьявола, а в Южной – в некоторых частях пустыни Мохави, в Имперской долине и в южной части Великой долины. При использовании данных о топографии распознаны долины и хребты Сьерра-Невадского Батолита, а также отдельные границы блоков Земной коры.

В ряде случаев распознанные линейные структуры можно идентифицировать с известными из [10] разломами. Приведенные выше значения параметров алгоритма распознавания были выбраны из условия максимально возможной корреляции между линейными структурами и известными разломами. При использовании данных как об аномалиях Буге, так и о топографии уровень корреляции составляет до 75% от длины известных разломов на суше в Северной Калифорнии (отдельные сегменты разломов Сан-Андреас, Калаверас и Хайвард) и до 50% от длины известных разломов на суше в Южной (отдельные сегменты разломов Сан-Андреас, Гарлок, Сан-Джасинто, Эльсиноре, Пинто Маунтен, Санта-Моника, Санта-Инесса и других). (Отметим, что указанные оценки получены при корреляции с распознанными разломами вручную, и они могут оказаться завышенными по сравнению с подобными оценками при попытках формализации такой идентификации. В связи с этим см. ниже обсуждение рис. 5.)

Вместе с тем, при использовании данных о гравитационных аномалиях и не следует ожидать распознавания всех известных разломов, так как:

- если зеркало скольжения разлома не вертикально, то распознанная граница, как правило, сдвинута относительно разлома на дневной поверхности и может быть слабее выражена.
- в рассматриваемом регионе средняя скорость относительного движения плит – 3.5 мм/год, и за время существования разлома (порядка  $10^7$  лет [11, 12]) относительный сдвиг берегов разлома составляет 35 км, что невелико в масштабе карт, приведенных на рис. 2; следовательно, если разлом образовался при нарушении сплошности первоначально единой геологической структуры, то из-за малости сдвига скачок аномалии Буге на берегах разлома может не достигнуть значительной (большей выбранного значения порога  $\Delta$ ) величины.

## ПРОВЕРКА ОБЪЕКТИВНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ СТРУКТУР

Два факта указывают на неслучайный характер карт распознанных линейных структур (см. рис. 2, 3):

1. Алгоритм [1] распознает независимым образом отдельные сегменты линейных структур, и *a priori* ниоткуда не следует, что они будут выстраиваться вдоль некоторых линий. Однако этот феномен несомненно имеет место как при использовании данных об аномалиях Буге, так и, в меньшей степени, топографических данных.

2. Часть распознанных линейных структур приурочена к известным разломам. Более того, в ряде случаев распознанные линейные структуры гладко продолжают эти разломы или заполняют промежутки между известными разломами одинакового простирания.

Вместе с тем, существуют причины, в силу которых распознанные алгоритмом [1] линейные структуры могут носить случайный характер:

*Зашумленность данных.* Помимо ошибок измерений, причиной зашумленности топографических данных могут быть протекающие на дневной поверхности эрозионные процессы (нас интересуют проявления только тектонических процессов!), а для аномалий Буге шумы могут быть привнесены при исключении влияния мест-

ных особенностей рельефа. Ввиду неустойчивости операции численного дифференцирования, фактически используемой в алгоритме [1], можно ожидать, что он окажется чувствителен к шуму в исходных данных. Например, распознавание, представленное на рис. 4, фактически свелось к выявлению двух регионов, в которых исходные данные имеют разную точность: суши с прибрежным шельфом и морского дна.

*Произвол в выборе параметров  $\Delta, \alpha, K, \beta$  и  $\bar{K}$ , определяющих работу алгоритма.* Примером возможного результата при некорректном выборе этих параметров служит рис. 5. Линейная структура, простирающаяся вдоль Великой долины в середине ее, – артефакт! (Она отвечает нескольким независимым локальным максимумам аномалии Буге, распознанные проявления которых случайно выстроились вдоль гладкой непрерывной линии.) Этот пример также показывает необходимость известной осторожности и контроля экспертом при идентификации линий, визуально выделяемых на картах выявленных линейных структур.

Чтобы убедиться в объективном характере распознавания линейных структур, представленных на рис. 2, 3, были проделаны следующие вычислительные эксперименты.

1. Линейные структуры, распознанные по сглаженным исходным данным, представлены на рис. 6, 7. От исходных данных цифровым 11-точечным фильтром Хемминга [13] была отфильтрована высокочастотная компонента с пространственными частотами, превышающими 0.4 частоты Найквиста для рассматриваемой сетки (т.е. с длиной волны менее 5 км). Уменьшение порога  $\Delta$  вдвое отвечает приблизительно такому же уменьшению максимального скачка на соответствующей территории, а именно: с 15.9 до 7.2 мгалл/км в Северной и от 13.8 до 6.6 мгалл/км в Южной Калифорнии по гравитационным данным, соответственно от 596 до 196 м/км в Северной и от 972 до 265 м/км в Южной Калифорнии по топографическим данным.

Распознаванию линейных структур по сглаженным данным можно дать геофизическую интерпретацию. Распознанные по сглаженным данным линейные структуры имеют большую среднюю длину, тогда как доля распознанных известных разломов не уменьшилась, увеличивается средняя площадь обрамляемых ими областей. При первоначальном распознавании (рис. 2, 3) выявлено большое число нарушений сплошности в зонах, оконтуривающих известные разломы. Очевидно, часть из них является локальными нарушениями сплошности внутри в целом консолидированных образований большего масштаба и не носит принципиальный характер. Распознанные по сглаженным данным линейные структуры можно интерпретировать как проявления границ этих консолидированных образований.

2. Естественный способ проверки корректности выбора параметров, определяющих работу алгоритма распознавания, – варьирование значений этих параметров и проведение повторных экспериментов. Мы проделали это и убедились в стабильности наблюдаемых эффектов. Кроме того был проведен эксперимент по так называемому интегральному распознаванию сегментов, составляющих исходные линейные структуры, где работа алгоритма не зависит от выбора используемых параметров.

Каждый из  $P$  определяющих параметров  $A_p$  имеет конечный интервал возможных естественных значений  $[A_p^1, A_p^2]$ . Проведем распознавание для каждой сово-

купности значений определяющих параметров

$$\mathcal{A}_p = (k_p \mathcal{A}_p^1 + (M - 1 - k_p) \mathcal{A}_p^2) / (M - 1), \quad 0 \leq k_p \leq M - 1 \quad (k_p \text{ -- целые}),$$

которые разбивают интервалы возможных значений параметров на  $M - 1$  равных частей. Рассмотрим для некоторого фиксированного порога  $\gamma$  ( $0 < \gamma < 1$ ) множество сегментов, распознанных в ходе этих  $M^p$  распознаваний не менее, чем  $\gamma M^p$  раз. Контрольный эксперимент считается успешным (т.е. подтверждающим правильность первоначального распознавания), если это множество сегментов можно интерпретировать как совокупность линейных структур, не имеющую радикальных качественных отличий от совокупности первоначально распознанных линейных структур.

Мы проводили интегральное распознавание при  $M = 4$ , положив  $K = \tilde{K} \in [4, 13]$  ( $P = 4$ ),  $\alpha \in [0.95, 1.1]$ ,  $\beta \in [1, 2]$ ,  $25 \text{ м/км} \leq \Delta \leq 100 \text{ м/км}$  и  $\gamma = 0.2$  для топографических данных,  $1.5 \text{ мгалл/км} \leq \Delta \leq 3 \text{ мгалл/км}$  и  $\gamma = 0.1$  для данных об аномалиях Буге. Его результаты представлены на рис. 8, 9.

## СОВМЕСТНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСПОЗНАВАНИЯ

Из полученных результатов следует, что зоны, где распознанные по гравитационным данным линейные структуры имеют относительно высокую площадную плотность и ограничивают относительно малые геологические отдельности, могут не совпадать с зонами относительно высокой плотности линейных структур, распознанных по топографическим данным.

К указанным несовпадениям на территории Северной Калифорнии относятся горы Дьявола (где велика плотность линейных структур, распознанных по топографическим данным, и соответственно мала – по данным о гравитационных аномалиях), и территории: Бэй Эреа, окрестности Монтерей Бэй, долина между Береговыми Хребтами и блоком Салинас (где, наоборот, велика плотность линейных структур, распознанных по гравитационным данным и соответственно мала – по топографическим). На остальной части Северной Калифорнии плотность линейных структур, выделенных по разным типам использованных данных, взаимно скоррелирована. Так, практически не распознаны линейные структуры ни по гравитационным, ни по топографическим данным на территории неразрушенной Великой Долины, огромного синклиниория, ограниченного Береговыми Хребтами, с одной стороны, и Провинцией Впадин и Хребтов и Сьерра-Невадским Батолитом – с другой.

На территории Южной Калифорнии места несовпадения высоких плотностей распознанных линейных структур исчерпываются плато Карризо, западной частью пустыни Мохави, окрестностями Лос-Анжелеса, Соленым озером и Имперской долиной (мала плотность линейных структур, распознанных по топографическим данным, и соответственно велика – по гравитационным), а также горными массивами Сан-Бернардино и Сан-Джасинто (велика плотность линейных структур, распознанных по топографическим данным, и соответственно мала – по гравитационным). Отметим, что на обширном участке дна Тихого океана, призывающего к рассматриваемой территории Южной Калифорнии, аномалии Буге в соответствии с методом их определения отражают топографию морского дна.

Общепринято считать, что наличие значительных градиентов величины гравитационной аномалии Буге отвечает повышенной деформированности и раздробленности в глубине Земной коры, а мозаичность топографических данных является признаком деформированности и раздробленности в приповерхностных слоях Земной коры. Таким образом, большую площадную плотность линейных структур, распознаваемых нашим алгоритмом по данным об аномалиях Буге, можно интерпретировать, как значительную раздробленность в толще Земной коры, а большую площадную плотность линейных структур, выявляемых по данным о топографии, можно считать указанием на повышенную степень деформированности и разрушенности приповерхностных слоев Земной коры. Следовательно, в достаточно больших по площади областях несовпадения значительных площадных плотностей линейных структур, которые распознаны по гравитационным и топографическим данным, уровень разрушенности Земной коры на разных глубинах различен. Поэтому можно предположить, что в таких областях существуют разломные зоны с залеганием, близким к горизонтальному. Этот вывод может оказаться полезным при оценке объемов разрушенной Земной коры для определения максимально возможной магнитуды землетрясений в изучаемом регионе по методике [3]. Представляет интерес его проверка по данным о строении Земной коры в исследуемом регионе, полученным сейсмологическими методами.

На рис. 10 представлены карты линейных структур, отдельно распознанных по данным либо об аномалиях Буге, либо о топографии, но построенные наложением одного результата (рис. 2 и 3) на другой. В соответствии с интерпретацией этих карт, изложенной выше, в областях с малой плотностью выявленных линейных структур на картах рис. 10 имеет место консолидированность Земной коры по всей ее глубине.

Отметим, что там, где плотность выявленных алгоритмом линейных структур достаточна велика, характерный размер ограничиваемых ими областей при распознании по топографическим данным существенно меньше, чем при использовании данных об аномалиях Буге. Этот эффект, но в существенно меньшей степени, проявляется и на картах рис. 8, 9, построенных по сглаженным данным.

### РАСПОЗНАВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ СТРУКТУР ПО ПАРАМЕТРУ $S$

Синтетический параметр  $S = H + 10B$  функционально соответствует аномалии в свободном воздухе. В [14–16] была показана его информативность при распознавании мест возможных сильных землетрясений. Было обнаружено, что на территории Калифорнии расположение эпицентров сильных и средних землетрясений коррелирует с относительно низкими значениями этого параметра, а на территории Италии эпицентры сильных землетрясений сосредоточены в местах с большими значениями  $S$ . В [7–9] была зафиксирована приуроченность сейсмичности к зоне с большой величиной горизонтального градиента  $S$ , упрощенная теоретическая модель, объясняющая подобное явление, представлена в [17]. В [7] сделана попытка идентифицировать разломы Калифорнии как места повышенной плотности изолиний поля  $S$ .

На рис. 11 представлены карты линейных структур, выявленных рассматриваемым алгоритмом по данным о величине параметра  $S$ . Они имеют определенное

сходство с картами рис. 3, построенными по результатам распознавания по топографическим данным, и с картами рис. 9, отражающими совместные результаты распознавания по данным о гравитационных аномалиях Буге и/или о топографии. К недостаткам карт рис. 10 и 11 относится значительная концентрация мелких непринципиальных деталей, вызванная наложением контрастных деталей исходных полей, отвечающих различным горизонтам Земной коры. Кроме того, при сведении данных о первичных независимых полях в единую линейную комбинацию возможна потеря информации, которая может осложнить или сделать невозможной выделение скрытых разломных зон.

### **ЛИНЕЙНЫЕ СТРУКТУРЫ, РАСПОЗНАННЫЕ ПО ДАННЫМ ОБ АНОМАЛИЯХ БУГЕ И ТОПОГРАФИИ, И СИЛЬНАЯ ( $M > 6$ ) СЕЙСМИЧНОСТЬ**

Для подтверждения нашей интерпретации построенных линейных структур было рассмотрено распределение эпицентров сильных землетрясений, информация о которых получена из [18, 19].

В целом (за исключением четырех землетрясений, произошедших в рифтовой зоне Имперской Долины, и землетрясений с эпицентрами в океане) эпицентральные области этих землетрясений оказались приурочены к зонам с повышенной площадной плотностью распознанных линейных структур, указывающей на значительное локальное нарушение сплошности Земной коры. Напротив, там, где линейные структуры не были распознаны, или их плотность мала, сильные землетрясения не наблюдались.

На территории Береговых хребтов в Северной Калифорнии обращает на себя внимание привязка эпицентров сильных землетрясений к границам геологических отдельностей, распознанным по гравитационным данным, и к границам между зонами большой и низкой плотности линейных структур, распознанных по топографическим данным, т.е., согласно нашей интерпретации, к границам между территориями с разной степенью разрушенности приповерхностной части Земной коры. Это находится в соответствии с тем, что большинство сильных землетрясений происходит на границах морфоструктурных стран [20], хотя масштаб тектонических явлений в исследуемом случае несколько меньше.

В Южной Калифорнии, где контраст между разрушенной и неразрушенной частями Земной коры выражен не столь ярко, степень приуроченности эпицентральных областей сильных землетрясений к линейным структурам, распознанным по данным об аномалиях Буге, и к границам зон большой плотности линейных структур, распознанных по топографическим данным, ниже, чем в Северной. Это обусловлено тем, что на территории Южной Калифорнии, в отличие от Северной, происходят землетрясения, связанные с тектоническими движениями, иными, чем strike-slip. К ним относятся землетрясения центральной части Имперской долины, где расположены две небольшие рифтовые зоны, и землетрясения сводово-глыбового поднятия Сьерра-Невадского Батолита, где эпицентры землетрясений находятся на территориях с большой плотностью линейных структур. В Имперской долине, напротив, плотность распознанных линейных структур в эпицентральных зонах мала.

## ЛИНЕЙНЫЕ СТРУКТУРЫ, РАСПОЗНАННЫЕ ПО ДАННЫМ ОБ АНОМАЛИЯХ БУГЕ И ТОПОГРАФИИ, И СЛАБАЯ ( $M \geq 3$ ) СЕЙСМИЧНОСТЬ

Мы проверяли гипотезу о том, что эпицентры слабых ( $M \geq 3$ ) землетрясений (информация о них получена из [19, 21]) приурочены к областям повышенной плотности линейных структур, распознанных либо по гравитационным, либо по топографическим данным (см. рис. 10). Эта гипотеза является логическим следствием нашей интерпретации линейных структур, построенных с помощью алгоритма распознавания, а также представляет и самостоятельный интерес в связи с проблемой прогноза места возможных землетрясений.

Территорию каждого из двух рассматриваемых регионов разобъем на непересекающиеся квадраты размером 5 км×5 км. Обозначим через  $\mathcal{M}$  множество квадратов, на всей площади которых известны данные об использованных полях. В Северной Калифорнии  $|\mathcal{M}| = 3029$ , в Южной –  $|\mathcal{M}| = 10756$  ( $|\cdot|$  – мощность множества, т.е. число его элементов). В дальнейшем рассмотрение ограничивается площадью, покрываемой квадратами из множества  $\mathcal{M}$ . В каждом из таких квадратов были подсчитаны:  $E_s$  – число землетрясений с  $M \geq 3$ , эпицентры которых лежат в данном квадрате;  $L_s^g$  и  $L_s^h$  – число сегментов линейных структур, распознанных по гравитационным и, соответственно, по топографическим данным (здесь индекс "s" нумерует квадраты из множества  $\mathcal{M}$ ).  $L_s^g$  и  $L_s^h$  являются грубой оценкой площадной плотности линейных структур (в этих величинах не учитывается общее направление простирания линейных структур), однако они просты для подсчета и вполне приемлемы для проведения тестов.

Для обеих исследуемых территорий были проведены следующие статистические тесты.

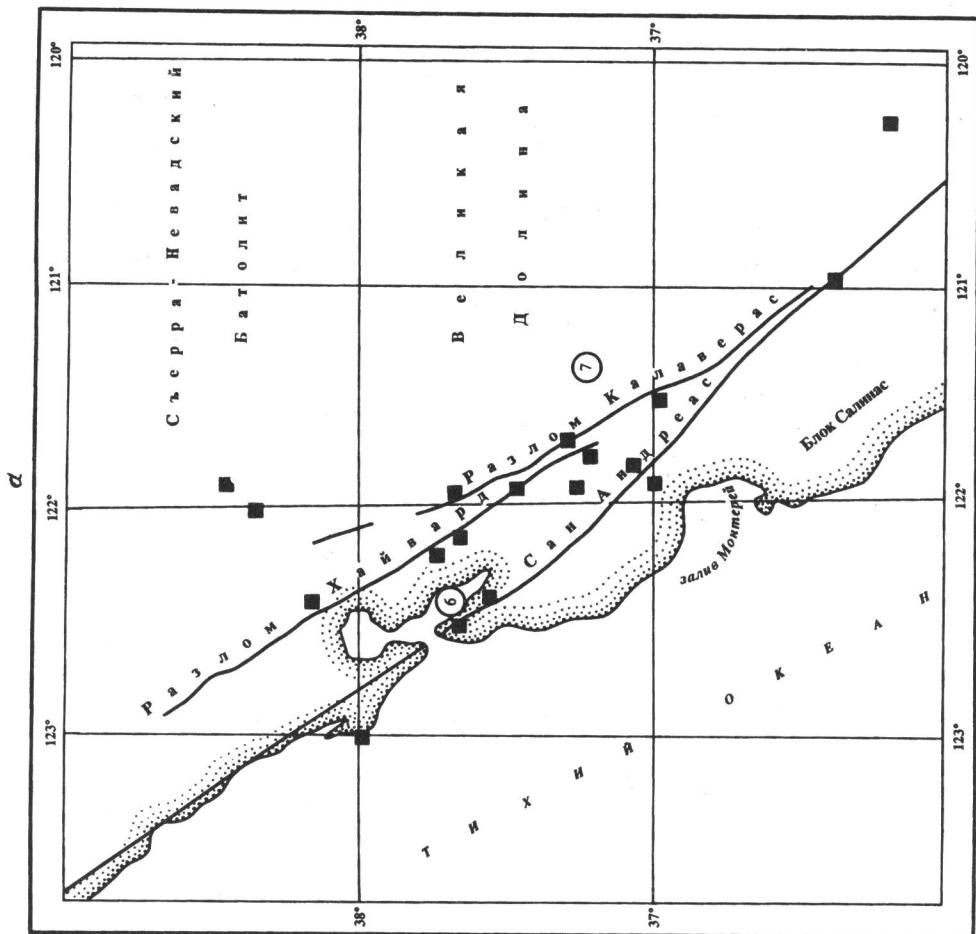
1. Применение критерия Кендалла [22, 23] показало наличие положительной ранговой корреляции случайных величин  $L_s^g$  и  $L_s^h$  с  $E_s$ . При этом для обоих типов исходных данных нулевая гипотеза о независимости этих пар случайных величин может быть отвергнута с уровнем значимости не выше  $10^{-14}$  для территории Северной Калифорнии и не выше  $10^{-9}$  – для Южной.

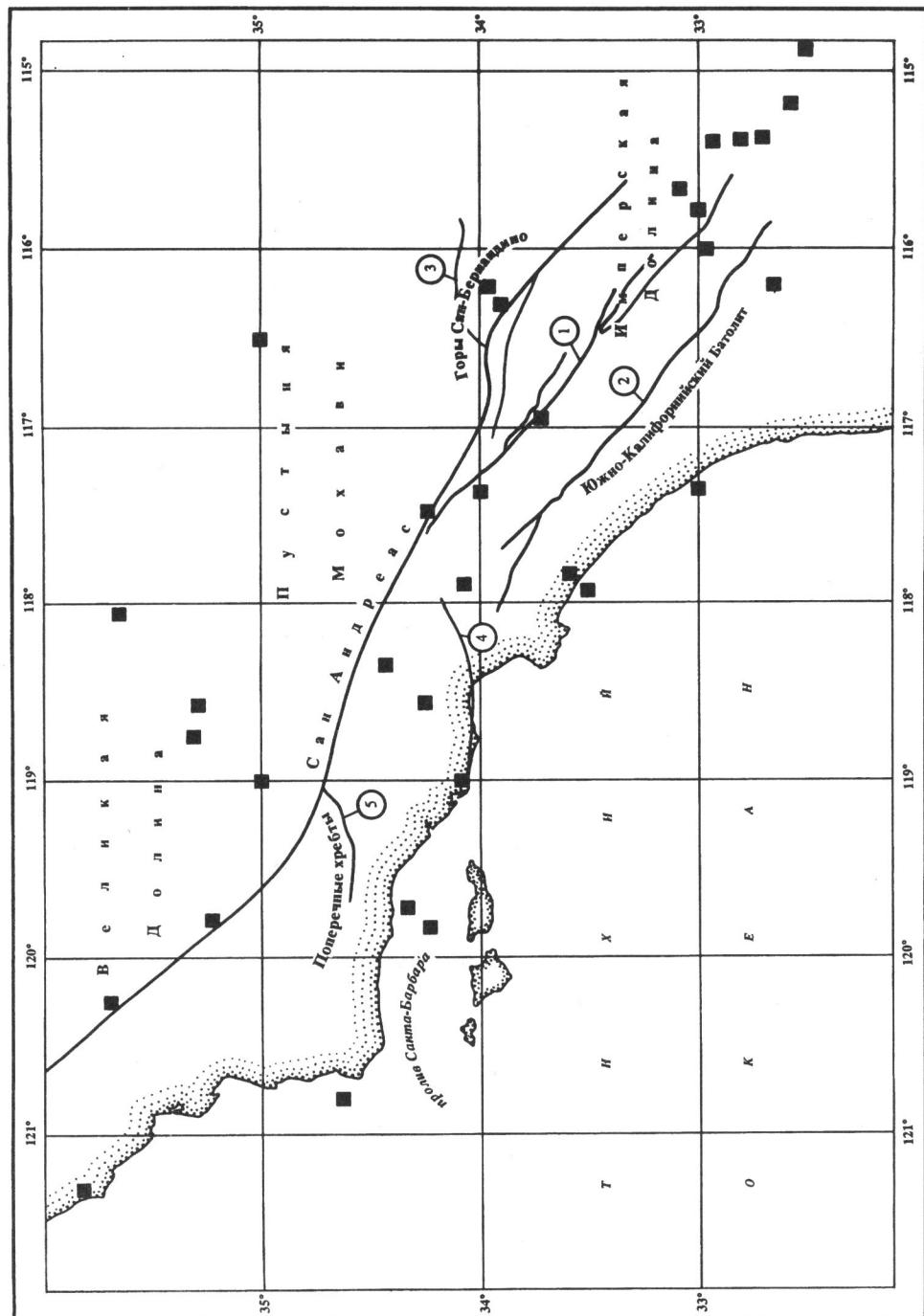
2. Сравним распределения случайных величин  $L_s^g$  и  $L_s^h$  в асейсмичных ( $E_s = 0$ ) квадратах с распределением в квадратах, где зарегистрированы землетрясения ( $E_s > 0$ ) (см. таблицу). В таблице приведено распределение числа квадратов из множеств  $\mathcal{M}$  по сейсмичности и в соответствии с распознанной консолидированностью или раздробленностью Земной коры, для Северной Калифорнии (верхняя строка) и для Южной Калифорнии (нижняя)

$E_s = 0$	$E_s > 0$	$L_s^g = 0$	$L_s^g > 0$	$L_s^h = 0$	$L_s^h > 0$
2341	688	2075	954	1820	1209
7934	2822	7639	3117	7707	3049

Применение критерия Смирнова [22, 23] показало, что величины  $L_s^g$  и  $L_s^h$  в асейсмичных квадратах стохастически меньше, чем в сейсмичных, а нулевая гипотеза о тождестве функций распределения  $L_s^g$  и  $L_s^h$  в этих выборках может быть отброшена с уровнем значимости не выше  $10^{-15}$  для обеих территорий.

Рис. 1. Карта-схема тектонических объектов изучаемой территории  
 а — Северная Калифорния, б — Южная Калифорния. 1 — разлом Сан-Джасинто, 2 — разлом Эпльсиноре, 3 — разлом Пинто Маунтэн, 4 — разлом Санта-Моника, 5 — разлом Биг Пайн, 6 — Бей Эреа, 7 — горы Дьявола; квадраты — эпицентры землетрясений





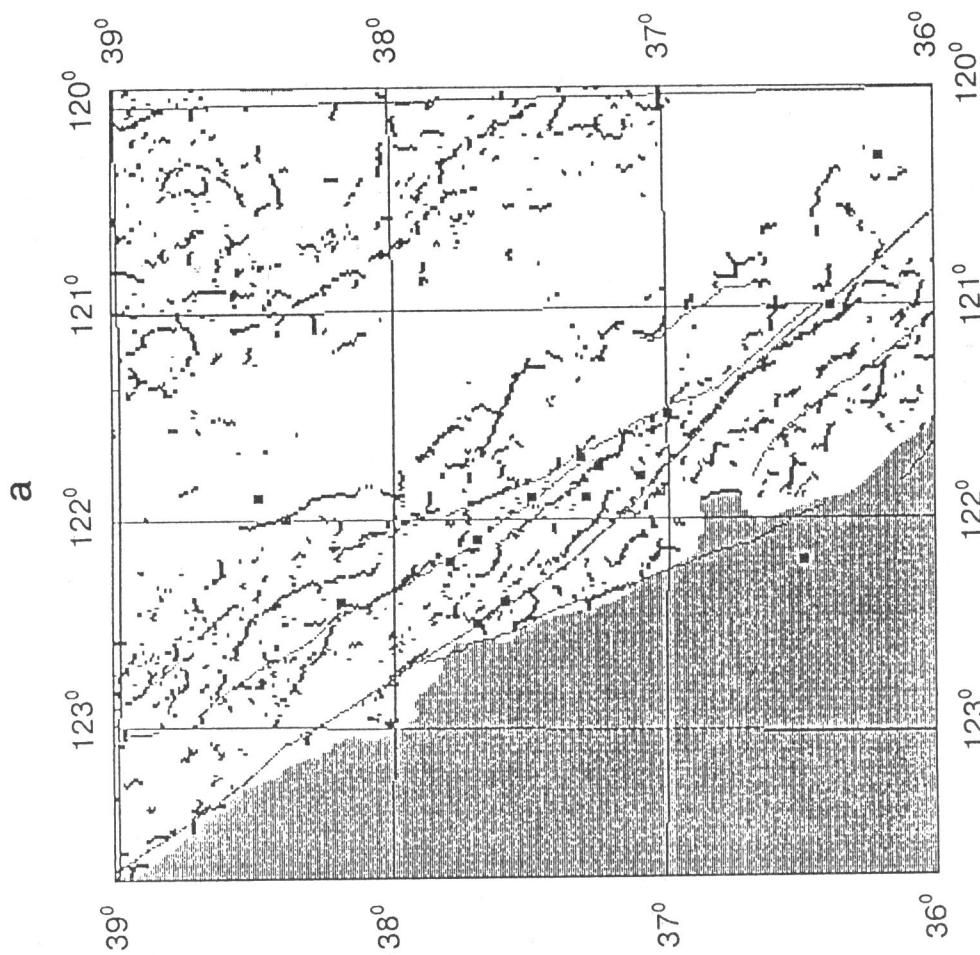
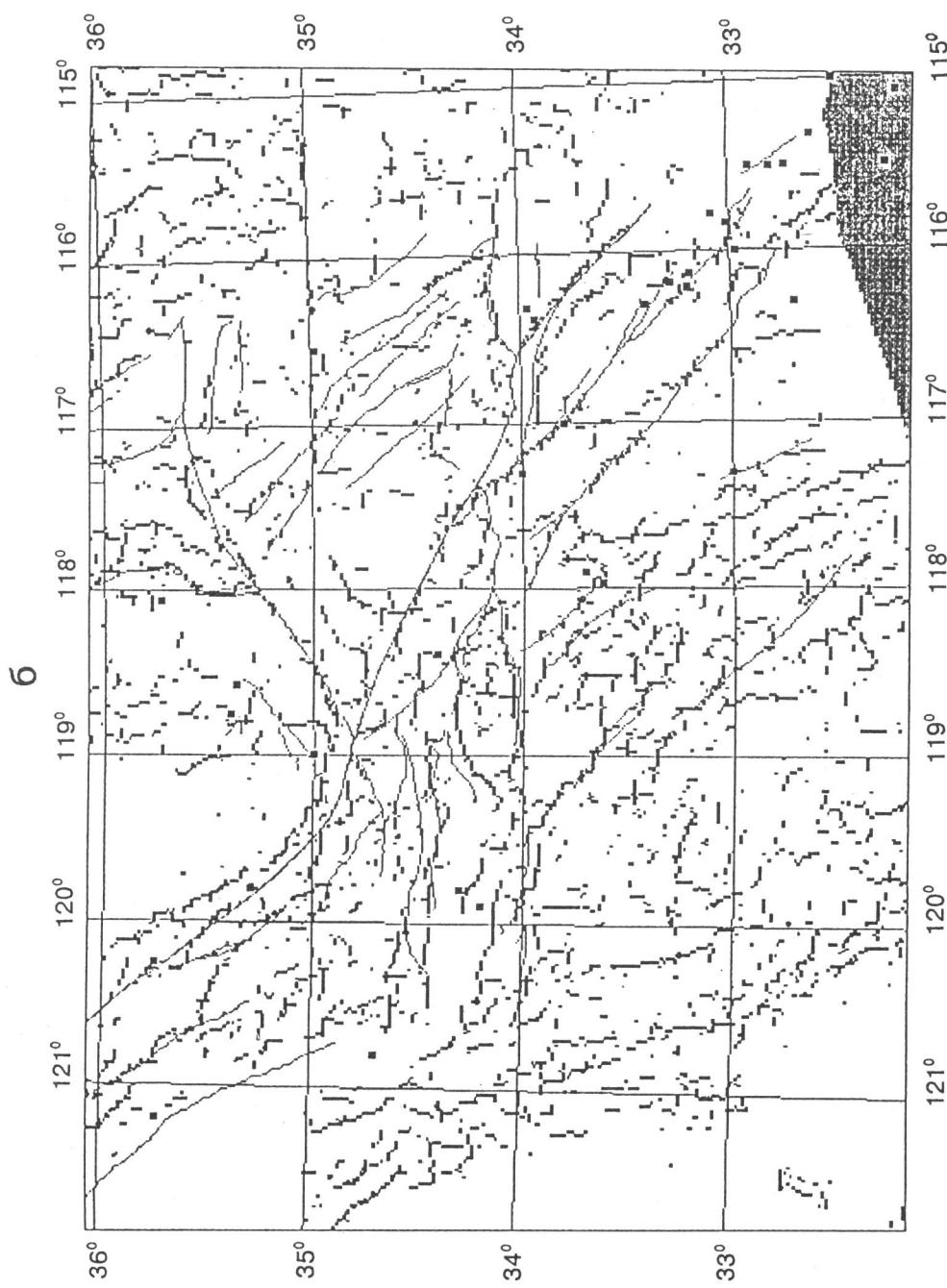


Рис. 2. Результаты алгоритмического распознавания по данным о гравитационных аномалиях Буте  $a$  – для Северной Калифорнии при  $\Delta = 2$  мгалл/км,  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 1.5$ ,  $K = K = 9$ ;  $b$  – для Южной Калифорнии при  $\Delta = 2.5$  мгалл/км,  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 1.2$ ,  $K = K = 9$ . Жирные линии, составленные из сегментов, – линейные структуры, тонкие – известные из [10] разломы. Серый фон обозначает отсутствие данных



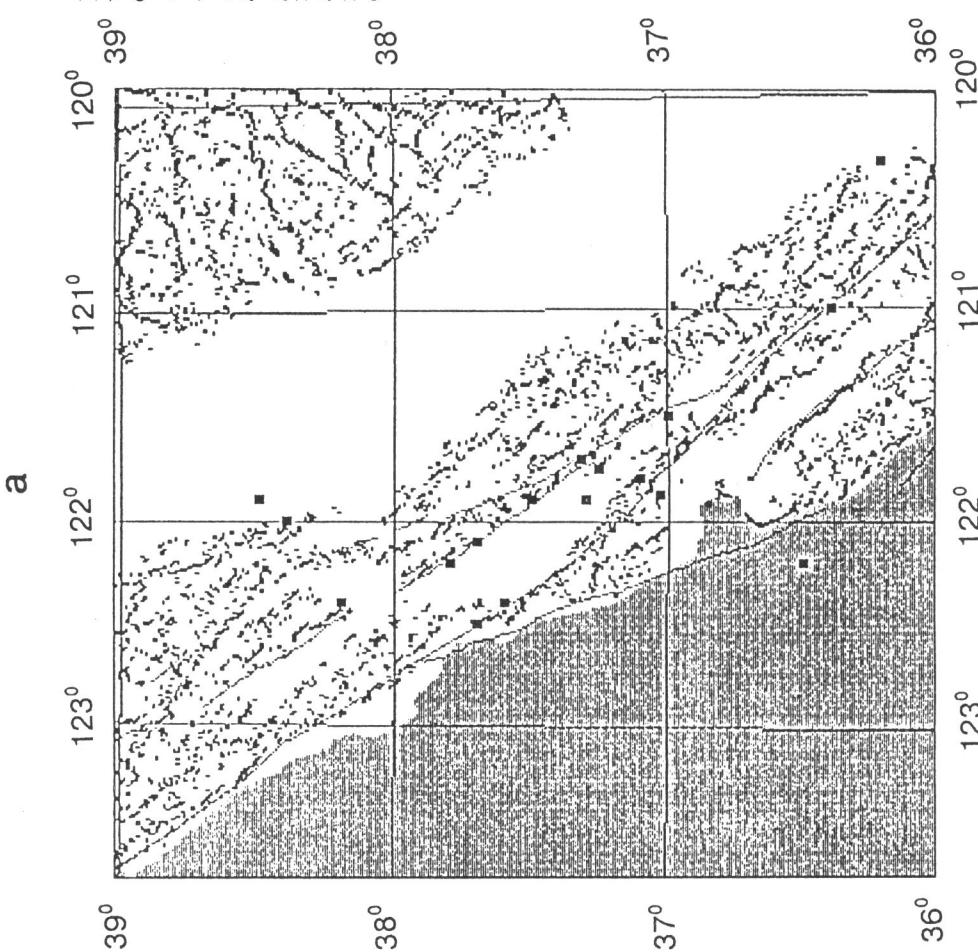
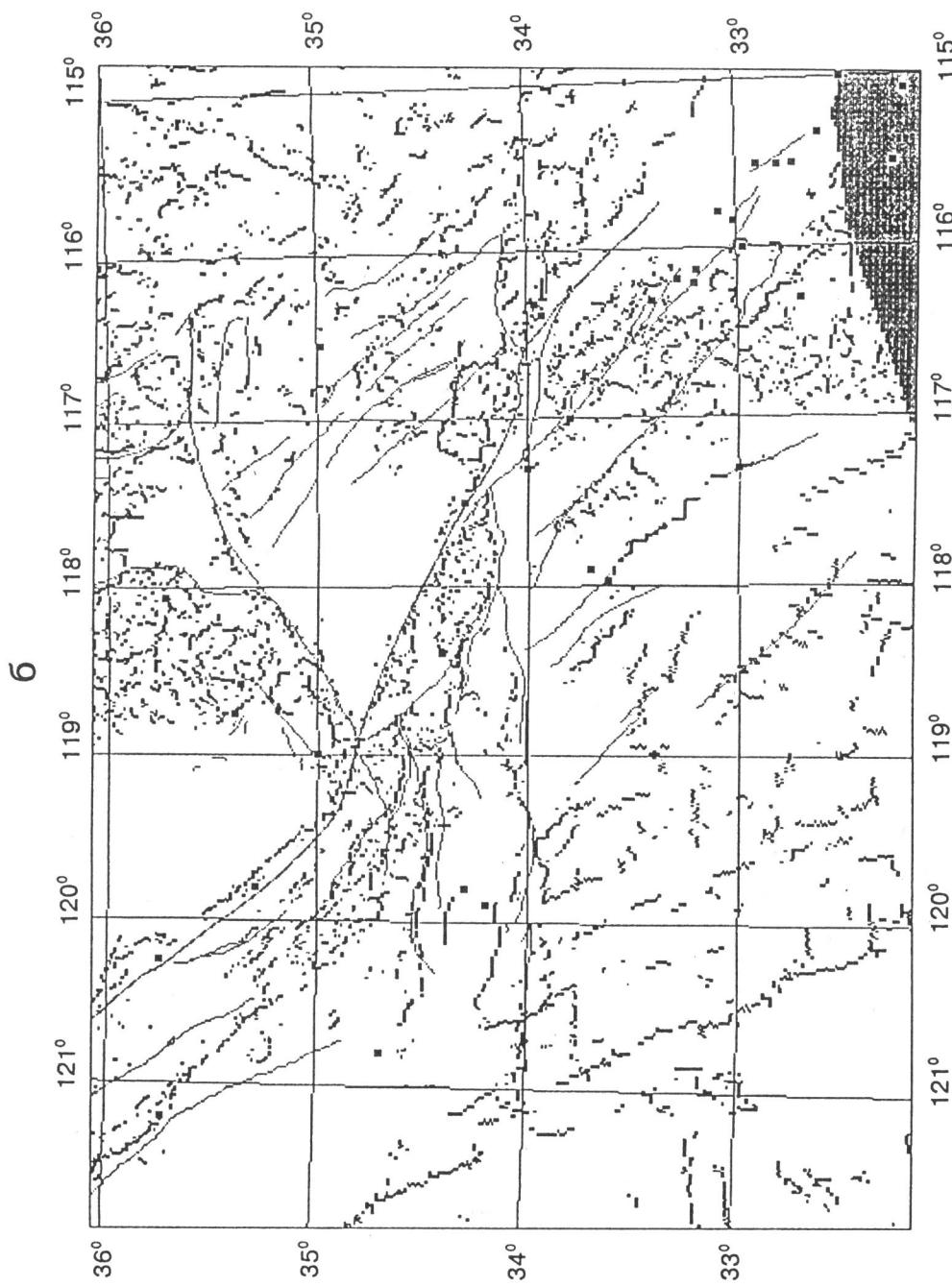


Рис. 3. Результаты алгоритма топографического распознавания по геофизическим данным  
 $\alpha$  – для Северной Калифорнии при  $\Delta = 60 \text{ м/км}$ ,  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 1.5$ ,  $K = \bar{K} = 9$ ;  $\delta$  – для Южной Калифорнии при  $\Delta = 80 \text{ м/км}$ ,  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 1.2$ ,  $K = \bar{K} = 9$ . Жирные линии, составленные из сегментов, – линейные структуры, тонкие – известные из [10] разломы. Серый фон обозначает отсутствие данных



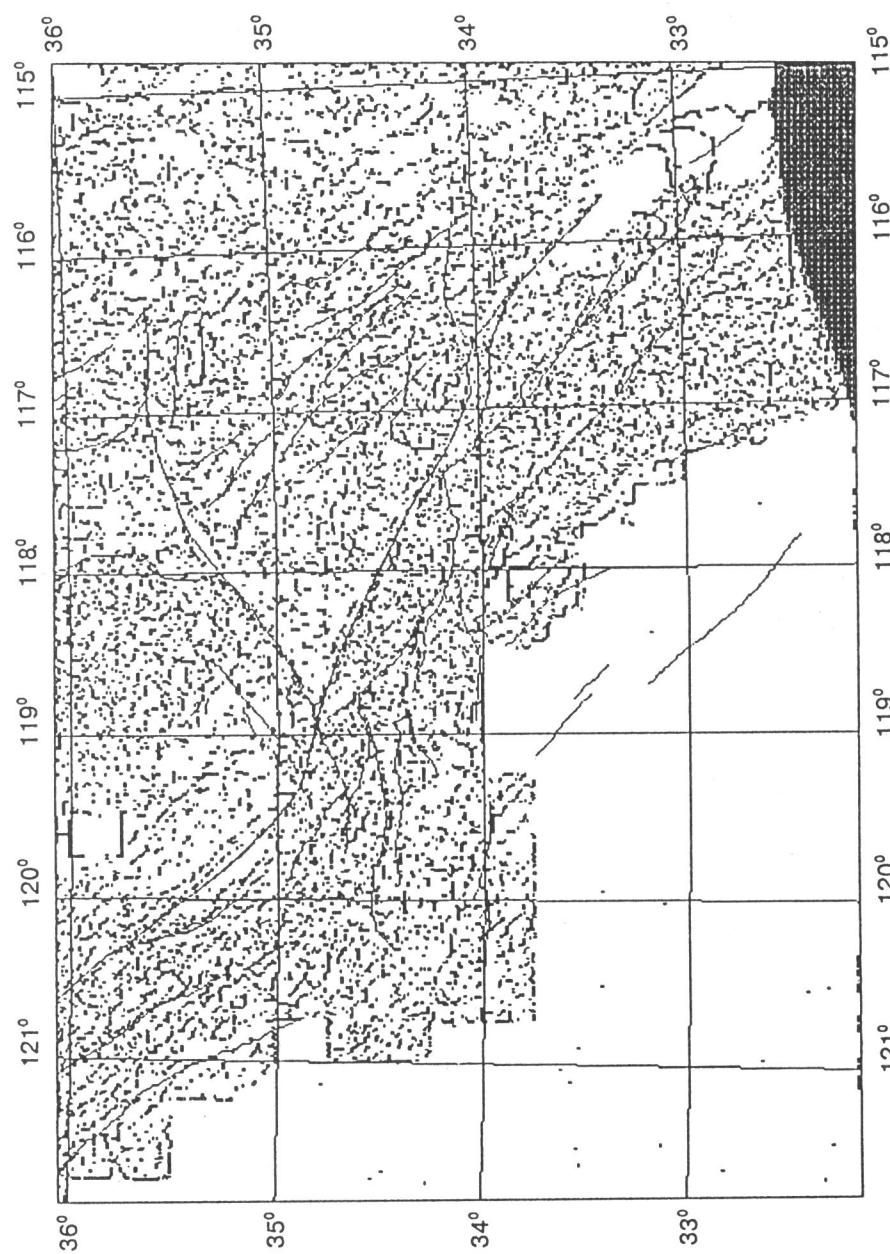
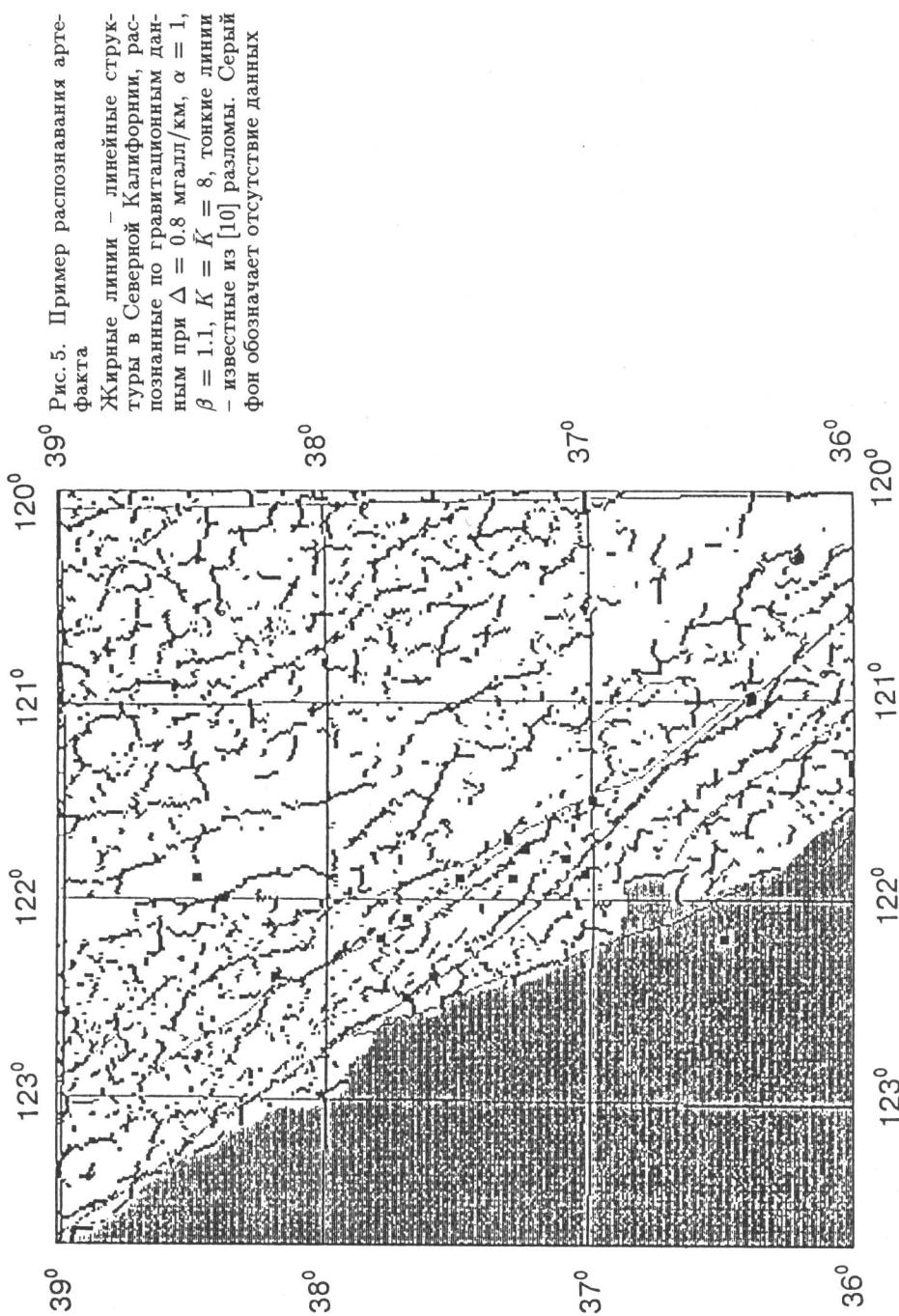


Рис. 4. Пример вредного влияния шума в исходных данных  
Жирные линии – линейные структуры в Южной Калифорнии, расположенные по данным о топографии  
при  $\Delta = 0$ ,  $\alpha = 1.1$ ,  $\beta = 0$ ,  $K = \bar{K} = 4$ , тонкие линии – известные из [10] разломы. Серый фон обозначает  
отсутствие данных



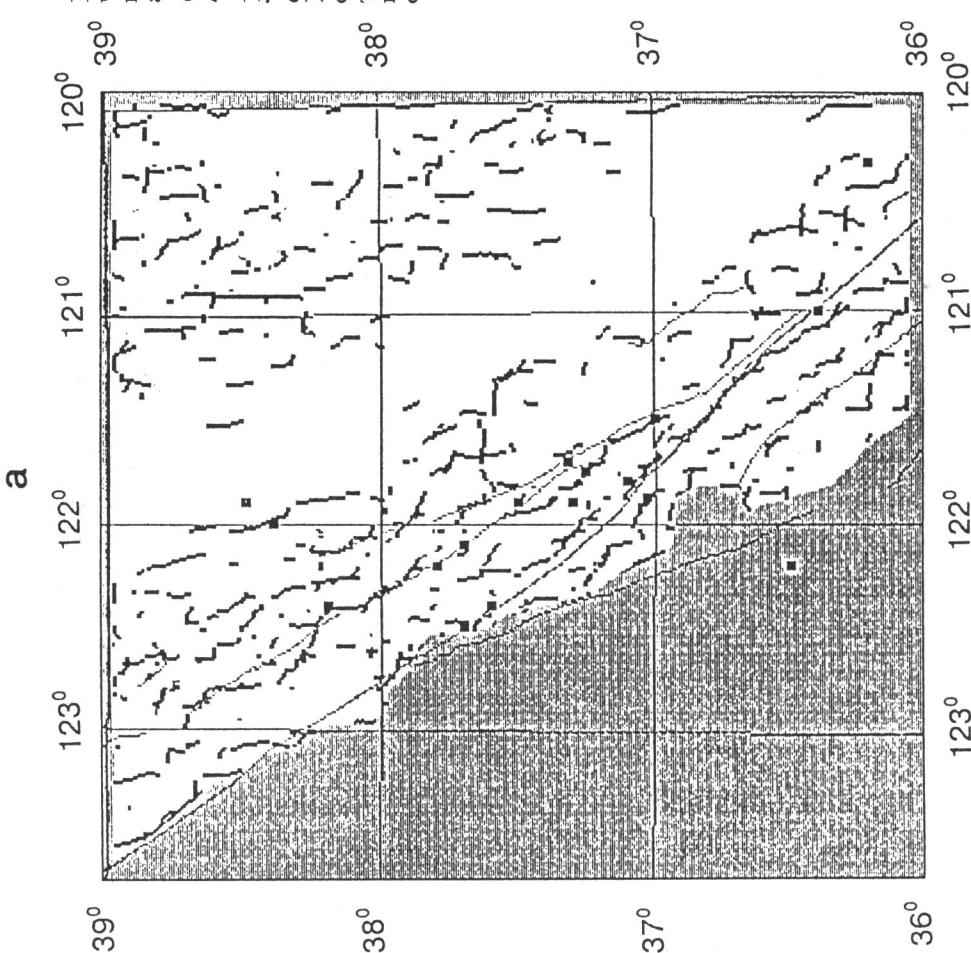
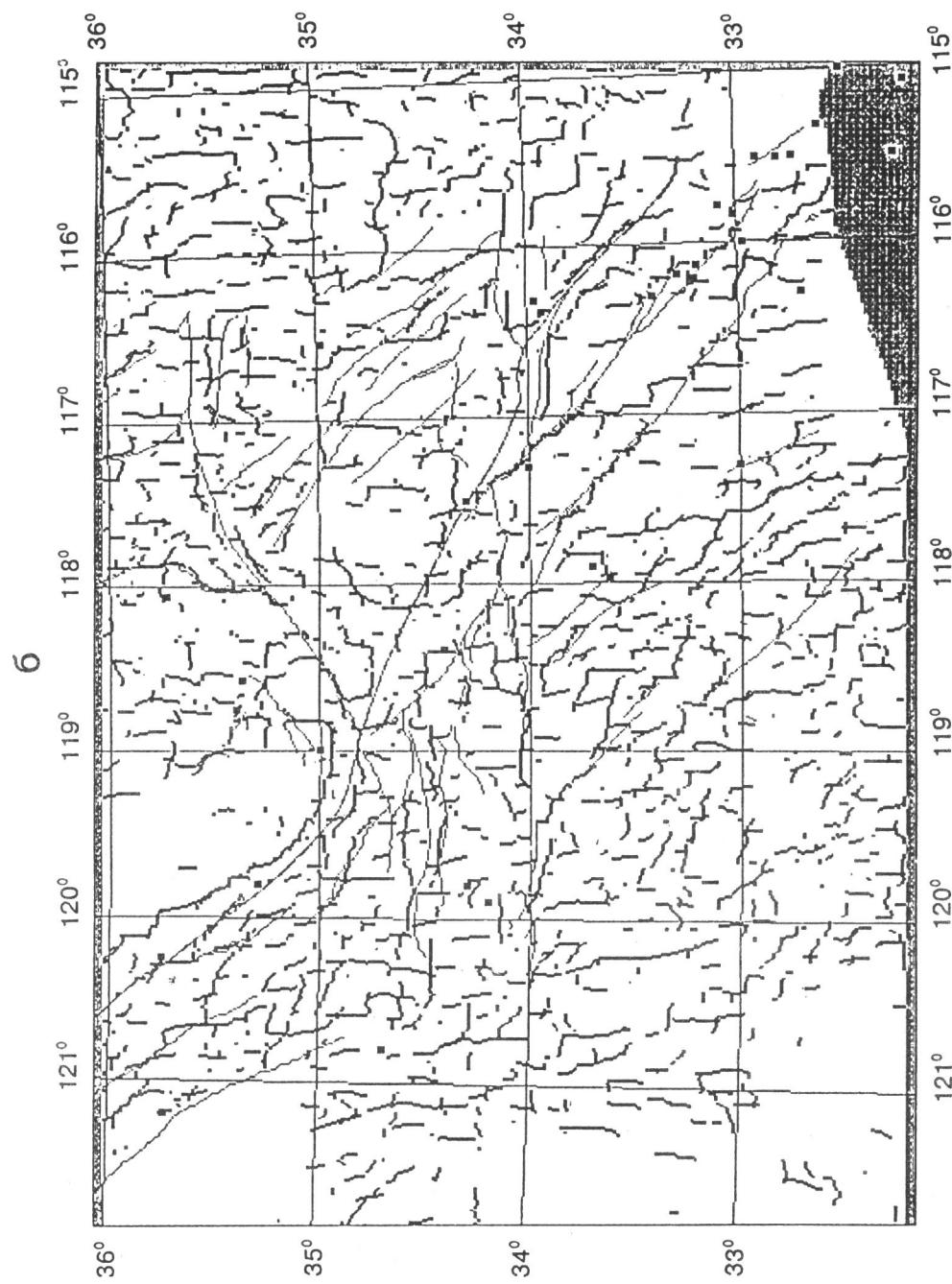


Рис. 6. Результаты алгоритмического распознавания по слаженным данным о гравитационных аномалиях Буге  
а – для Северной Калифорнии при  $\Delta = 1$  мгалл/км,  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 1.5$ ,  $K = K = 9$ ; б – для Южной Калифорнии при  $\Delta = 1.2$  мгалл/км,  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 1.2$ ,  $K = K = 9$ . Жирные линии, составленные из сегментов, – линейные структуры, тонкие – известные из [10] разломы. Серый фон обозначает отсутствие данных



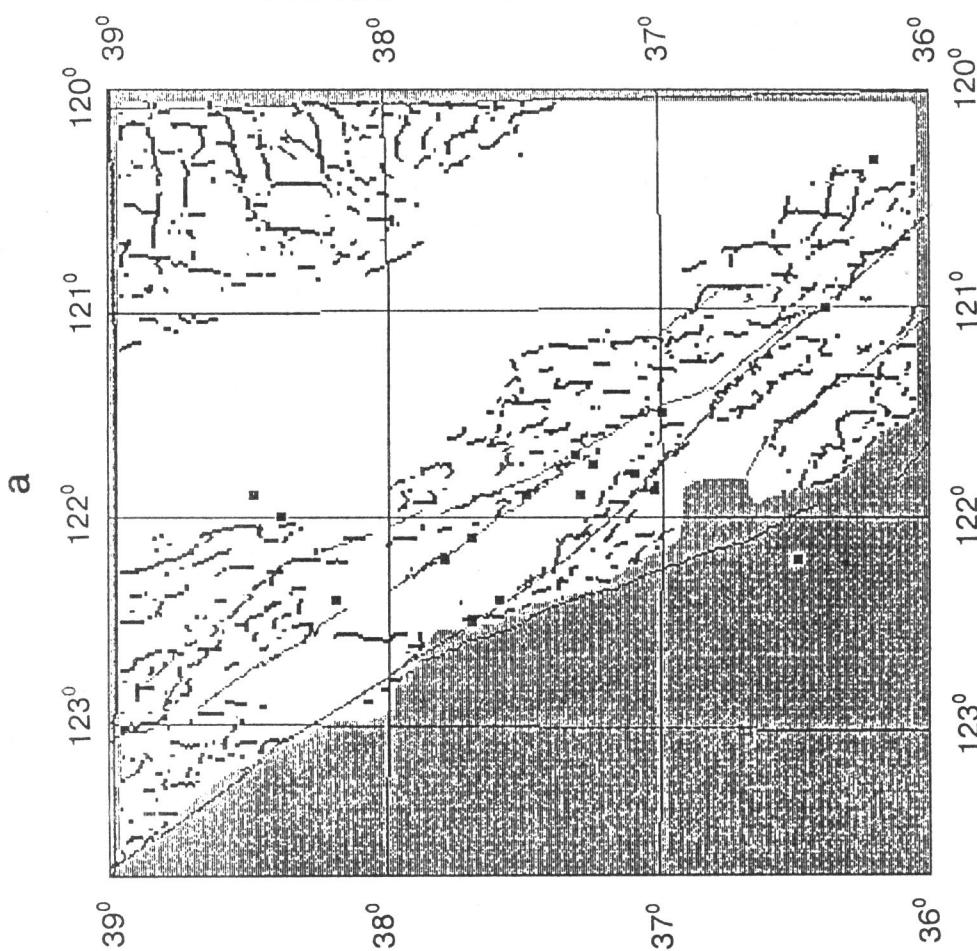
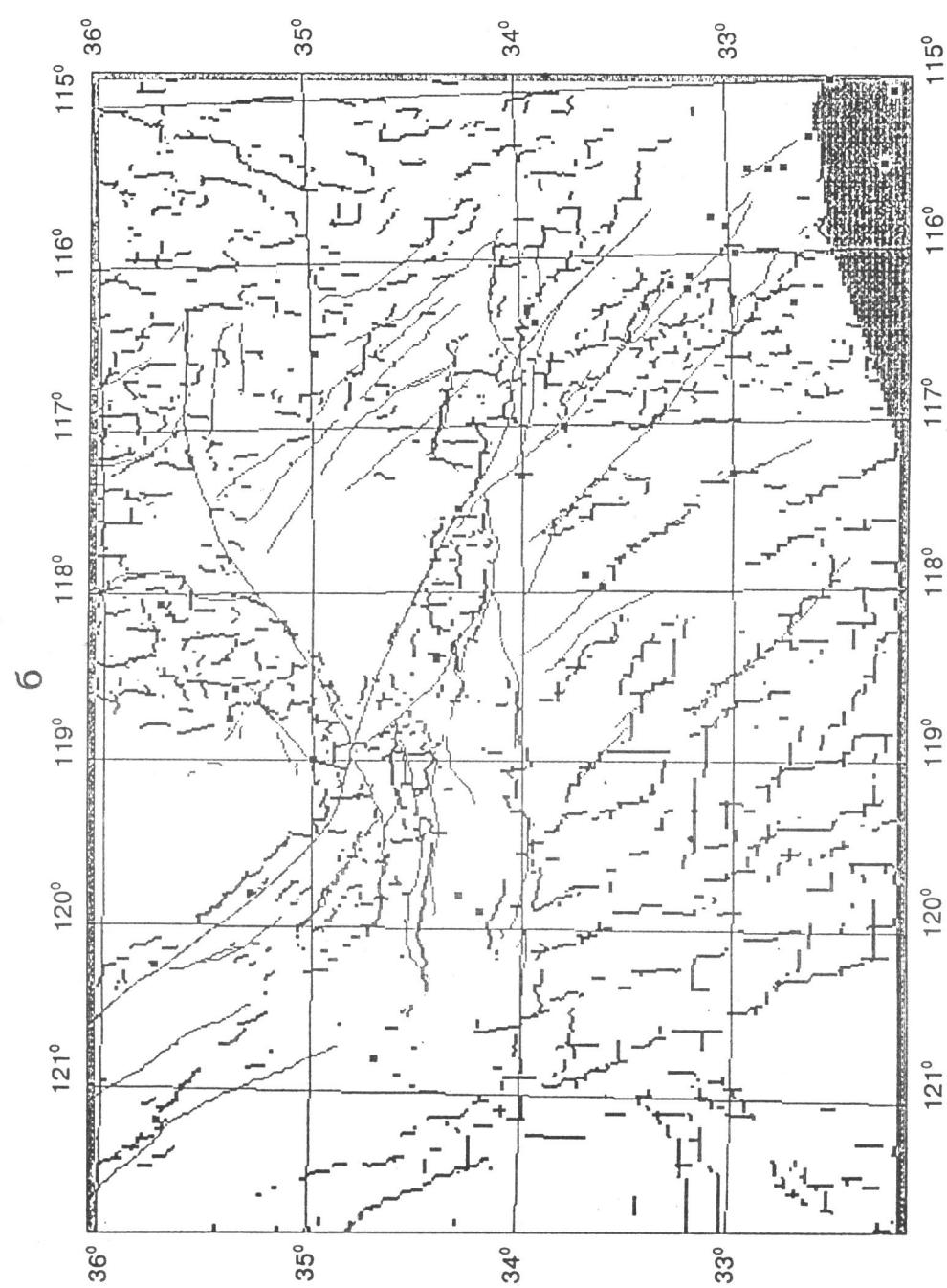


Рис. 7. Результаты алгоритма  
ческого распознавания по слажен-  
ным данным о топографии  
*a* – для Северной Калифорнии при  
 $\Delta = 30 \text{ м}/\text{км}$ ,  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 1.5$ ,  
 $K = K = 9$ ; *b* – для Южной Ка-  
лифорнии при  $\Delta = 40 \text{ м}/\text{км}$ ,  $\alpha = 1$ ,  
 $\beta = 1.2$ ,  $K = K = 9$ . Жирные ли-  
нии, составленные из сегментов, –  
линейные структуры, тонкие – из-  
вестные из [10] разломы. Серый  
фон обозначает отсутствие данных



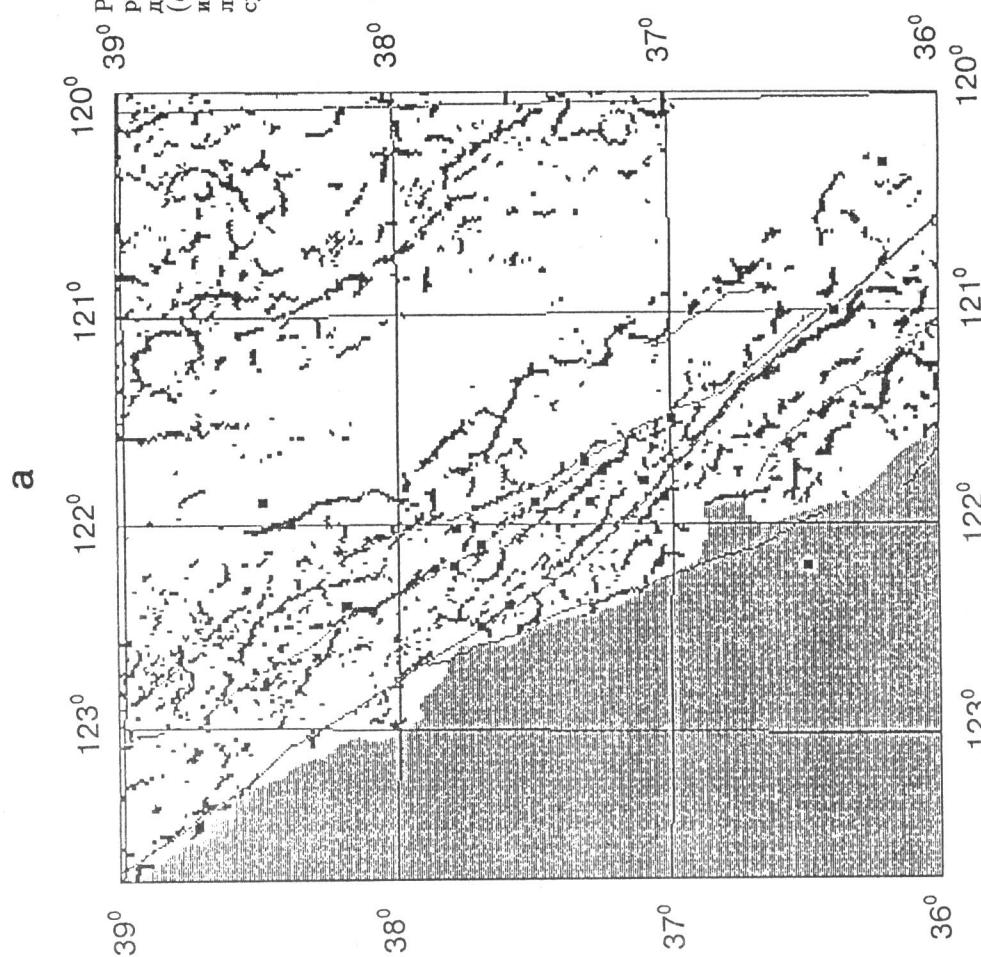
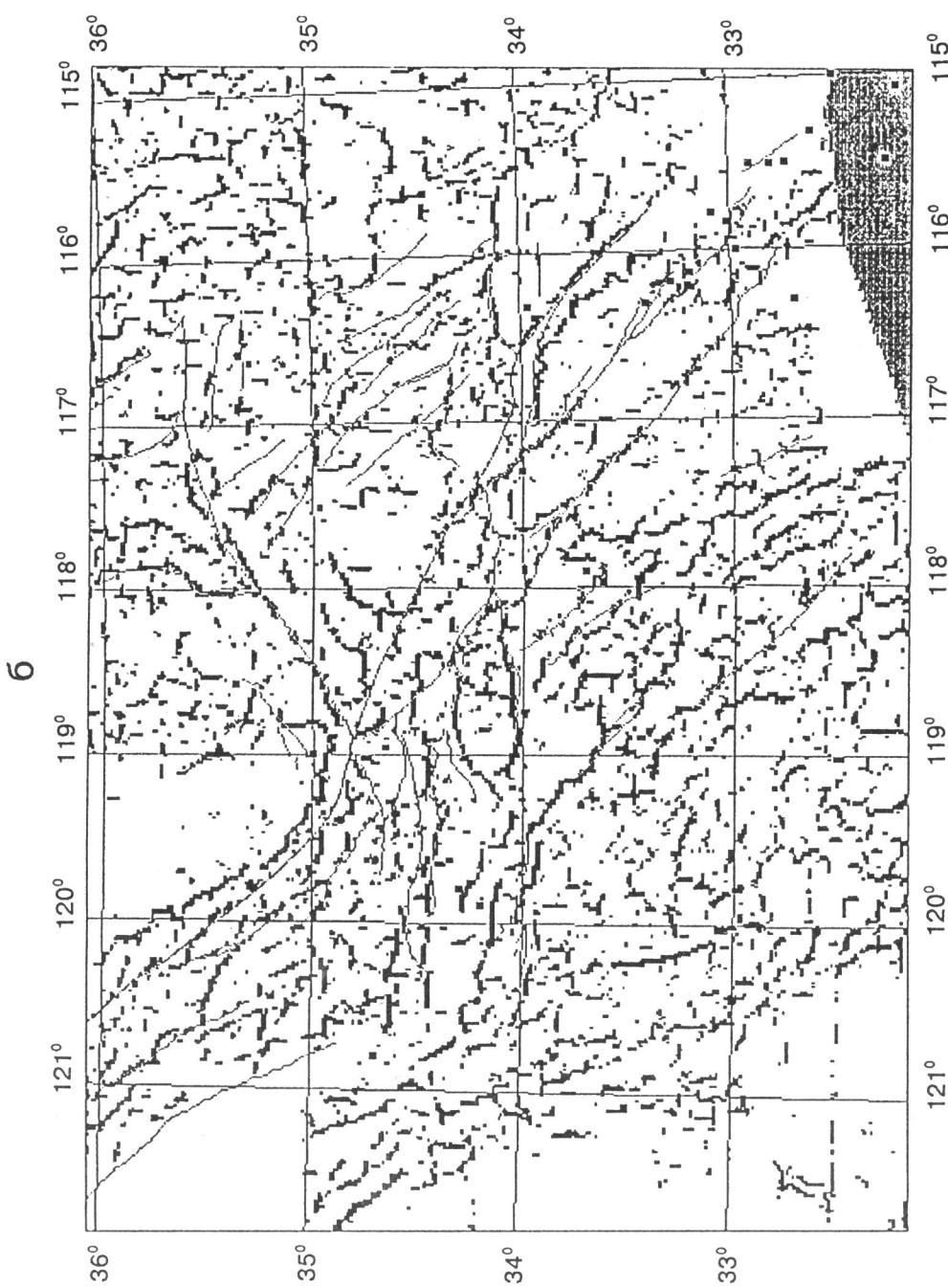
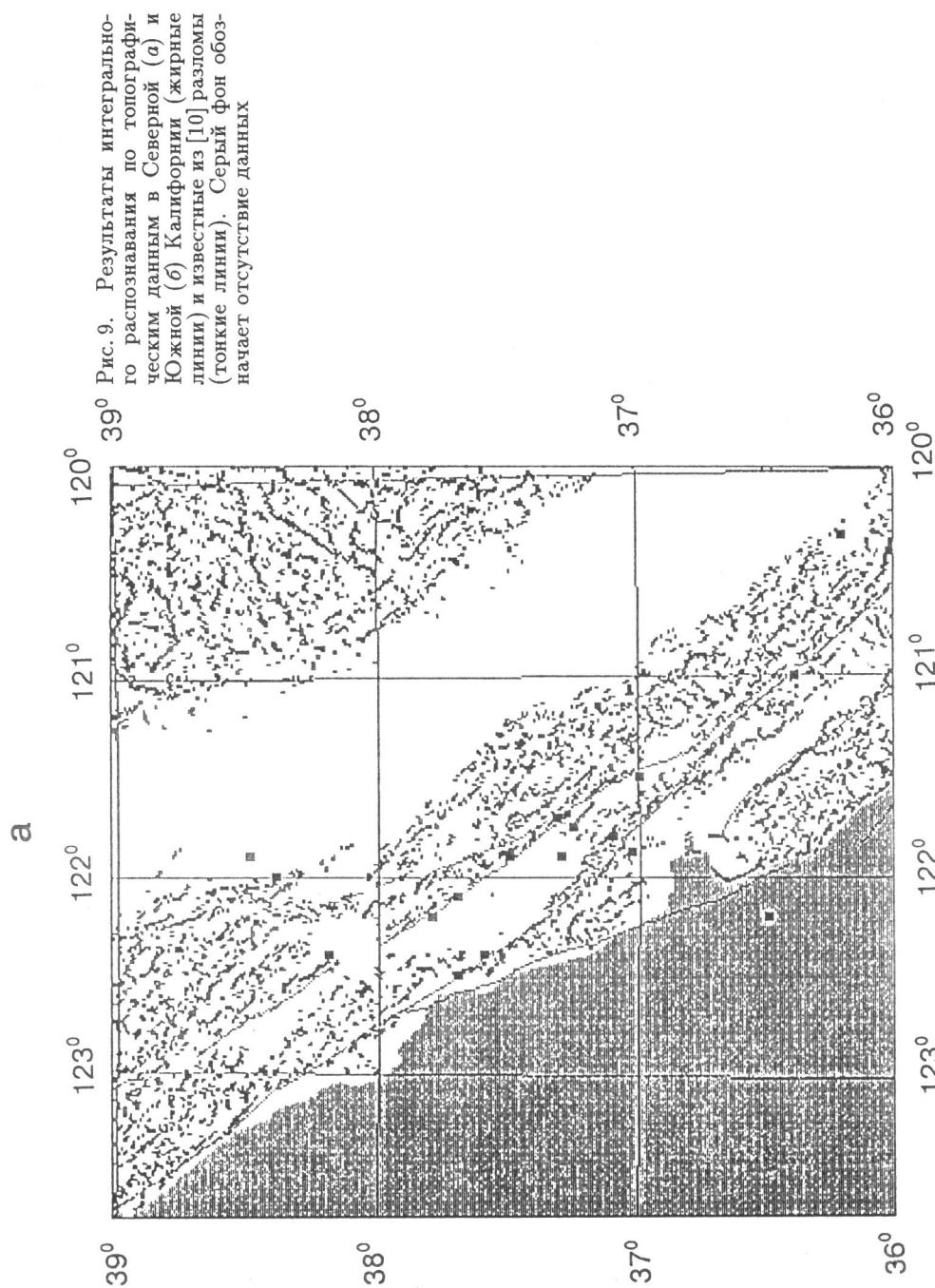
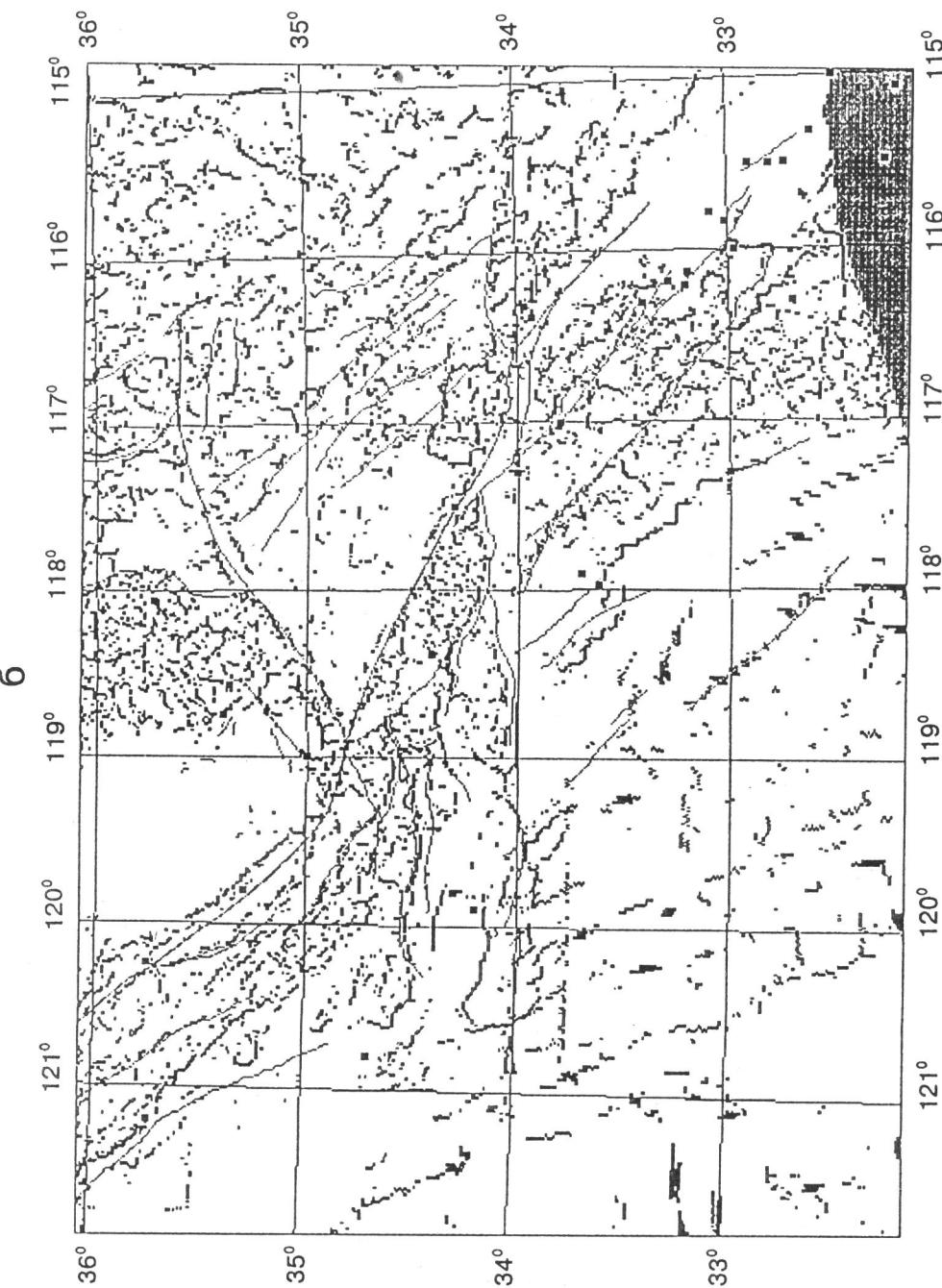
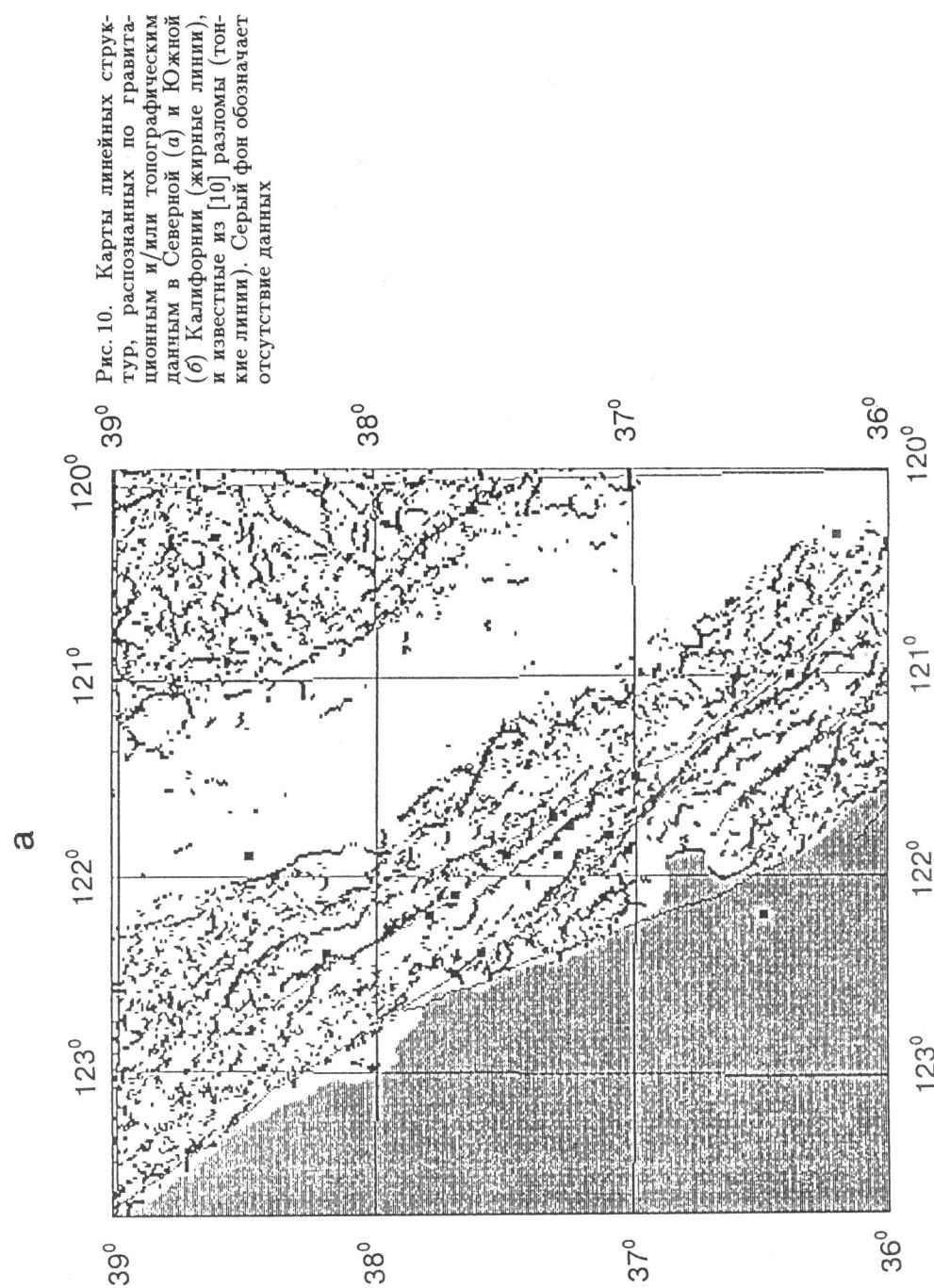


Рис. 8. Результаты интегрального расположивания по гравитационным данным в Северной (а) и Южной (б) Калифорнии (жирные линии) и известные из [10] разломы (тонкие линии). Серый фон обозначает отсутствие данных

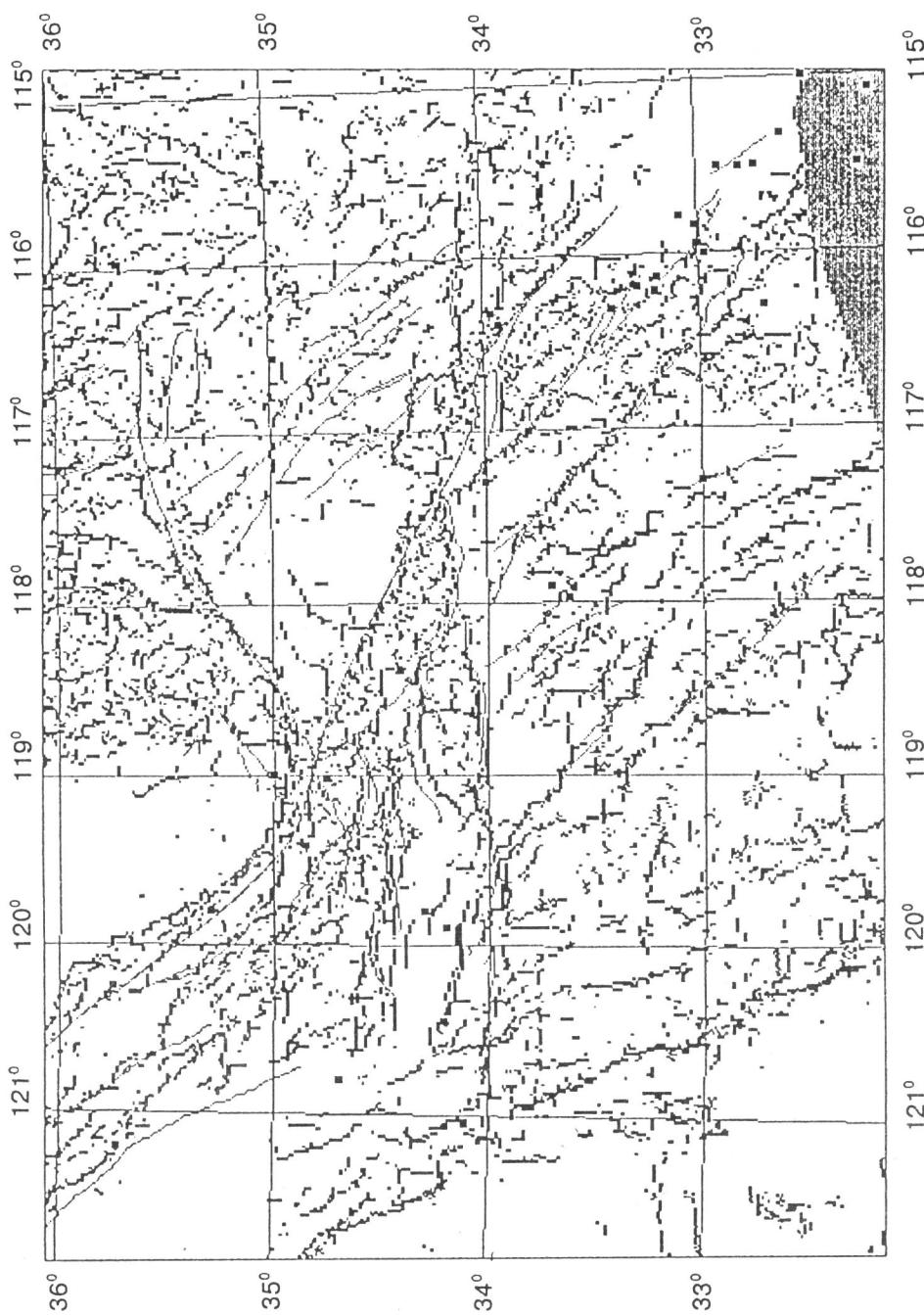


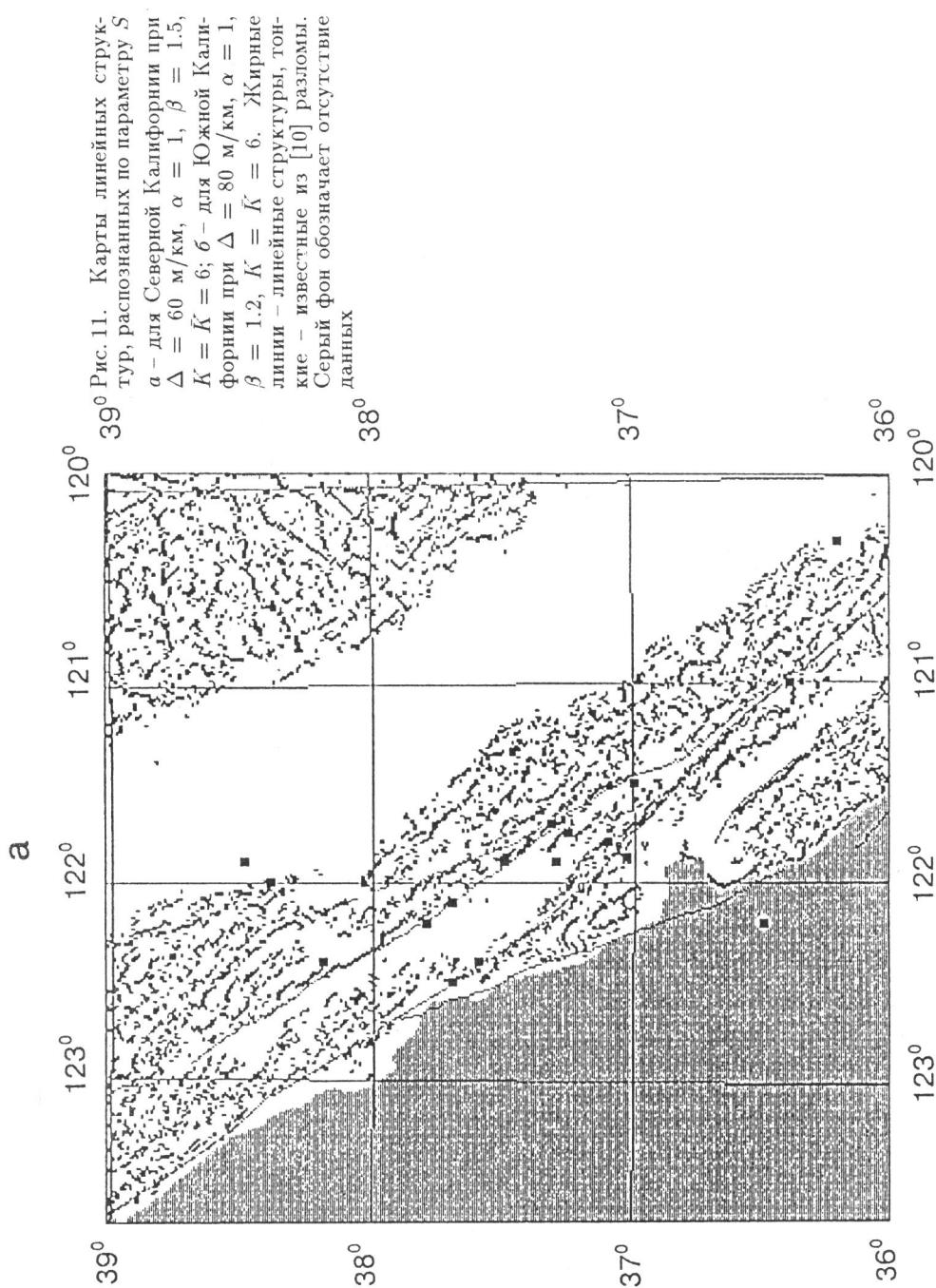


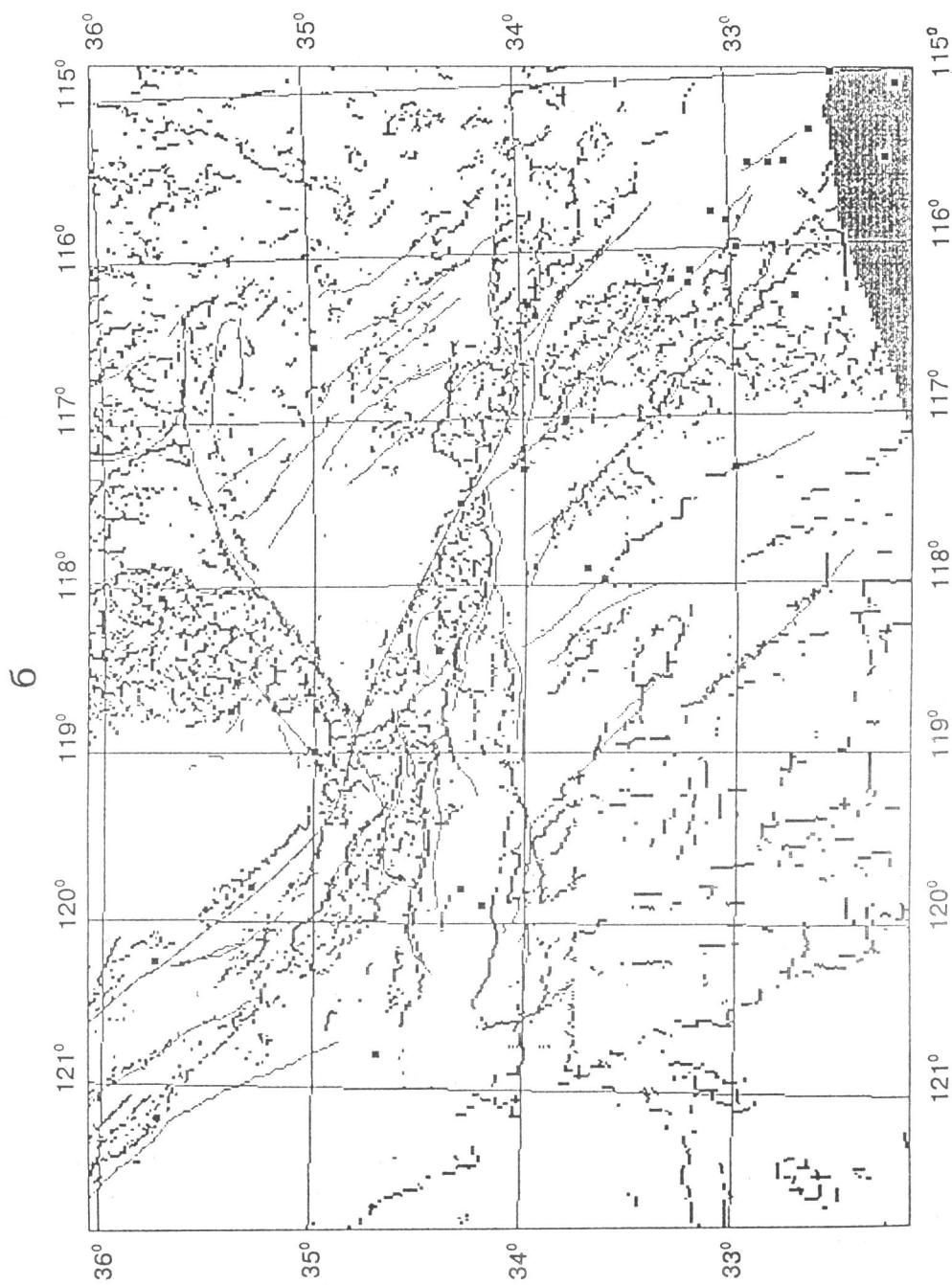




6







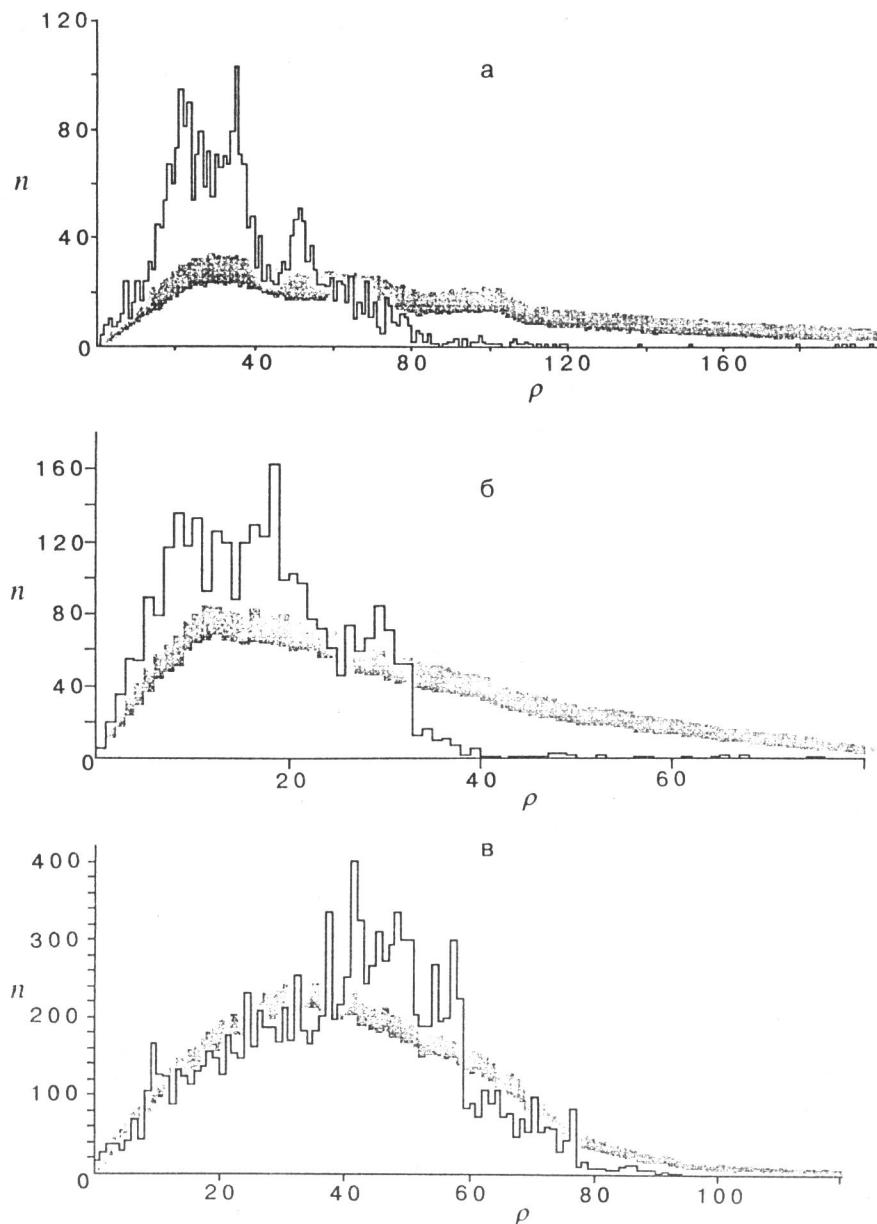


Рис. 12. Гистограммы (сплошные линии) и среднеквадратичное отклонение (затемненная область) числа землетрясений на площади квадратов множества  $\mathcal{M}$  при различных значениях порогов  $\Lambda^g$  и  $\Lambda^h$ . Через  $|\mathcal{C}^g|$ ,  $|\mathcal{C}^h|$  и  $|\mathcal{C}|$  обозначается число элементов множеств  $\mathcal{C}^g$ :  $L^g \leq \Lambda^g$ ,  $\mathcal{C}^h : L^h \leq \Lambda^h$  и  $\mathcal{C} = \mathcal{C}^g \cup \mathcal{C}^h$ .

*a* – территория Северной Калифорнии,  $\Lambda^g = \Lambda^h = 10$ ,  $|\mathcal{C}^g| = 3$ ,  $|\mathcal{C}^h| = 2$ ,  $|\mathcal{C}| = 5$ ;

*б* – территория Северной Калифорнии,  $\Lambda^g = 9$ ,  $\Lambda^h = 8$ ,  $|\mathcal{C}^g| = 19$ ,  $|\mathcal{C}^h| = 23$ ,  $|\mathcal{C}| = 42$ ;

*в* – территория Южной Калифорнии,  $\Lambda^g = 10$ ,  $\Lambda^h = 9$ ,  $|\mathcal{C}^g| = 15$ ,  $|\mathcal{C}^h| = 21$ ,  $|\mathcal{C}| = 35$ ;

*г* – территория Южной Калифорнии,  $\Lambda^g = 9$ ,  $\Lambda^h = 8$ ,  $|\mathcal{C}^g| = 63$ ,  $|\mathcal{C}^h| = 76$ ,  $|\mathcal{C}| = 137$ .

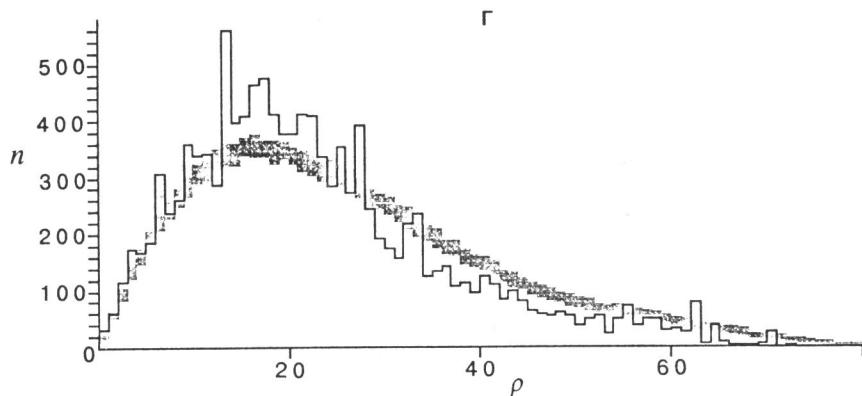


Рис. 12. (окончание)

Аналогично, случайная величина  $E_s$  в квадратах с распознанной консолидированной Земной корой ( $L_s^g = 0$  или  $L_s^h = 0$ ) стохастически меньше, чем в квадратах с распознанной раздробленной Земной корой (соответственно,  $L_s^g > 0$  или  $L_s^h > 0$ ) (см. таблицу). На территориях Северной и Южной Калифорнии для обоих типов исходных данных гипотеза о тождестве функций распределения  $E_s$  на площадях, распознанных как нераздробленные и раздробленные, отвергается по критерию Смирнова с уровнем значимости не выше  $10^{-15}$ .

Подобные результаты получены при рассмотрении статистик  $L_s^h + L_s^g$  и  $\max(L_s^h, L_s^g)$ .

3. Проверим гипотезу о приуроченности эпицентров слабых землетрясений к областям, где распознана сильная раздробленность. Выберем пороги  $\Lambda^g$  и  $\Lambda^h$ , и пусть  $C^g$  – множество центров квадратов из  $\mathcal{M}$  с  $L_s^g \geq \Lambda^g$ ,  $C^h$  – множество центров квадратов из  $\mathcal{M}$  с  $L_s^h \geq \Lambda^h$ ,  $C = C^g \cup C^h$ . На рис. 12 представлены гистограммы числа землетрясений, которые произошли на площади квадратов множества  $\mathcal{M}$  в Северной и Южной Калифорнии, при разных выборах порогов  $\Lambda^g$  и  $\Lambda^h$ . Расстояние  $\rho$  от некоторой точки до  $C$  определяется как минимум расстояний от точки до его элементов; в гистограмме  $\rho$  дискретизированы через 1 км.

Кроме того, для каждой из рассматриваемых территорий был сгенерирован ансамбль из 500 искусственных каталогов с эпицентрами, равномерно распределенными на площади квадратов множества  $\mathcal{M}$ . Объем каждого из сгенерированных каталогов был принят равным объему каталога землетрясений, которые произошли на площади  $\mathcal{M}$ . Было определено  $n(\rho)$  – среднее по ансамблю число землетрясений в зависимости от расстояния  $\rho$  до множества центров  $C$  сильнораздробленных квадратов, дискретизированных, как и ранее, через 1 км, и  $\delta_n(\rho)$  – среднеквадратичное отклонение в ансамбле от среднего числа землетрясений. Для сравнения с гистограммой, построенной по реальному каталогу, на рис. 12 изображена область  $n(\rho) - \delta_n(\rho) \leq n \leq n(\rho) + \delta_n(\rho)$  (серый фон).

Из рис. 12 видно, что расстояния в искусственных каталогах от эпицентров, равномерно распределенных на площади, покрываемой квадратами множества  $\mathcal{M}$ , до множества центров  $C$  стохастически больше этих расстояний в соответствующем

реальном каталоге. Этот эффект в Северной Калифорнии проявляется ярче, чем в Южной. Согласно критерию Смирнова для обеих территорий нулевую гипотезу о тождестве функции распределения числа землетрясений в реальном каталоге и функции распределения с плотностью  $n(\rho)$ , построенной для равномерно распределенных эпицентров, можно отбросить с уровнем значимости не выше  $10^{-15}$ .

## ВЫВОДЫ

В работе изучена раздробленность Земной коры на территории Калифорнии с применением формализованного алгоритма определения линейных структур [1] по значениям геофизических полей на регулярной сетке к данным о топографии и гравитационных аномалиях Буге. Распознанные линейные структуры в ряде случаев совпадают с известными разломами и могут быть интерпретированы как границы геологических отдельностей: глубинные при распознавании по данным об аномалиях Буге и приповерхностные при распознавании по топографическим данным. Предсказаны области, где могут быть расположены горизонтальные разломы. Показана приуроченность слабой ( $M \geq 3$ ) и сильной ( $M > 6$ ) сейсмичности к территориям, где выявлена раздробленность Земной коры.

Таким образом, алгоритм [1] доказал свою полезность при рассмотрении упомянутого выше круга вопросов. К его несомненным достоинствам относятся простота и возможность непосредственной геофизической интерпретации предписываемых им операций. Вместе с тем, представляется перспективным в дальнейшем применить к исходным геофизическим полям алгоритмы повышения контрастности визуальной информации (см. [24] и многочисленные более поздние публикации), которые являются более сложными и формальными, но за счет этого могут иметь большую разрешающую способность.

*Благодарности.* Авторы выражают благодарность Р. В. Симпсону (Менло-Парк, Геологическая служба США) за предоставление баз данных о топографии, гравитационных аномалиях Буге и разломах на территории Калифорнии и программы, выполняющей преобразование координат для построения географических карт в проекции Ламберта, а также академику В. И. Кейлис-Бороку (МИТП РАН) и академику М. А. Садовскому (ОИФЗ РАН) за обсуждение результатов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Желиговский В.А., Подвигина О.М., Садовский А.М. Об определении границ геологических отдельностей по данным о гравитационной аномалии Буге формализованным алгоритмом. ДАН. 1994. Т. 337, N 4.
2. Желиговский В.А., Подвигина О.М., Садовский А.М. Некоторые особенности строения Земной коры Калифорнии по данным о топографии и аномалиях Буге и их связь с сейсмичностью. ДАН. 1994. Т. 337. N 5.
3. Цубоу Т. Энергия землетрясений, объем гипоцентralной области, площадь афтершоков, прочность Земной коры. Слабые землетрясения. М.: ИЛ, 1961. 63 с.
4. Kasahara K. Earthquake mechanics. Cambridge Univ. Press, 1981. 248 p.
5. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 100 с.

6. Цубоу Т. Гравитационное поле Земли. М.: Мир, 1982. 288 с.
7. Садовский А.М., Симпсон Р.В. Машинный анализ гравитационных аномалий для двух сейсмически активных зон Калифорнии // ДАН СССР. 1991. Т. 318, N 1. С.87–92.
8. Итон Д., Садовский А.М. Гравитационные аномалии и эпицентры землетрясений с  $M \geq 5$  в зоне центрального разветвления системы Сан-Андреас // Теория и анализ сейсмологической информации. М.: Наука, 1985. С.134–138. (Вычисл. сейсмология; Вып. 18).
9. Желиговский В.А., Садовский А.М., Симпсон Р.В. О связи горизонтальных градиентов параметра  $S = H + 10B$  с сейсмичностью // ДАН СССР. 1991. Т.318, N 1. С.82–87.
10. The San Andreas fault system, California. U.S. Geological Survey Professional Paper 1515 / ed. Wallace R.E. Wash.: U.S. Goverment Printing Office. 1990.
11. Savage J.C., Prescott W.H. Precision of geodolite distance measurements for determining fault movements // J. Geophys. Res. 1973. Vol. 78, N B26. P.6001–6008.
12. Prescott W.H., Yu S.-B. Geodetic measurements of horizontal deformation in the northern San-Francisco Bay region, California // J. Geophys. Res. 1981. Vol. 91, N. B7. P.7475–7484.
13. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1978. 848 с.
14. Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Кейлис-Борок В.И. и др. Условия возникновения сильных землетрясений (Калифорния и некоторые другие регионы) // Исследование сейсмичности и моделей Земли. М.: Наука, 1976. С. 3–91. (Вычисл. сейсмология; Вып. 9).
15. Артемьев М.Е., Ротвайн И.М., Садовский А.М. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. VII. Использование гравитационных аномалий Буге для Калифорнии и смежных регионов // Распознавание и спектральный анализ в сейсмологии. М.: Наука, 1977. С. 19–32. (Вычисл. сейсмология; Вып. 10).
16. Капуто М., Марусси А., Садовский А.М. Аномалии Буге, топография и сейсмичность Италии // ДАН СССР. 1983. Т. 272, N 1. С. 57–61.
17. Артемьев М.Е., Дубровский В.А. О связи упругих напряжений в литосфере с нарушениями изостазии // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1976. N 10. С. 93–97.
18. Toppozada T.R., Real C.R., Park D.L. Earthquake history of California // Historical seismograms and earthquakes of the world. San Diego.: California. Academic Press, 1988. P.267–275.
19. Preliminary Determination of Epicenters. USGS, Wash.: 1993.
20. Артемьев М.Е. Изостазия территории СССР. М.: Наука. 1975. 215 с.
21. Preliminary Determination of Epicenters. Monthly listings. USGS, Wash.: 1993.
22. Кендалл М., Стюарт А. Стохастические выводы и связи. М.: Наука, 1973. 899 с.
23. Press W.H., Flannery B.P., Teukolsky S.A., Vetterling W.T. Numerical recipes in FORTRAN. Cambridge: Univ. Press, 1992. 963 р.
24. Луда Р.О., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. М.: Мир, 1976. 200 с.