Компьютерные технологии как инструмент получения новой информации о строении океанических разломов (на примере активной части разлома Сан-Паулу, Центральная Атлантика)

А. О. Мазарович, С. Ю. Соколов, Г. В. Агапова, К. О. Добролюбова, В. Н. Ефимов

Геологический институт РАН

Аннотация. В статье проведена оценка возможности получения принципиально новой научной информации в результате компьютерной обработки данных по хорошо изученной территории – активной части разломной зоны Сан-Паулу (Центральная Атлантика). В результате оцифровки батиметрической карты и карты мощностей осадочного чехла были построены математические модели, которые дополнялись альтиметрическими данными.
Комплексная интерпретация данных позволила установить различное строение рифтовых зон, активных частей разломов, выявить зону развития осадочного чехла, который претерпел несколько фаз деформаций, обнаружить не известные ранее вулканические сооружения. Наконец, открыта система сдвигов северо-западного направления. В целом вся работа показала, что после переноса информации с бумажного носителя в цифровой формат в сочетании с ресурсами Интернет и данными опробования глубоководной части океана, формируется абсолютно новый массив данных, которые подвержены принципиально новой обработке, а, впоследствии, и могут приводить к неожиданным выводам.

Введение

В течение последних четырех десятилетий в Мировом океане вне экономических зон, советскими научно-исследовательскими судами (НИС) был собран уникальный по объему и научно-практической ценности материал в нецифровом виде, который хранится в разных архивах в виде эхограмм и сейсмических лент на электрохимической бумаге, авторских оригиналов карт и в другой форме. Вместе с тем, за последние 10–15 лет основной массив геолого-геофизической информации собирается и хранится в цифровом виде. Это делает практически невозможным объединение и последующий совместный анализ старых и новых данных. Тем самым, результаты исследований, стоимость которых определялась астрономическими цифрами, оказываются выведенными из научного и научно-практического оборота. Информационный взрыв последних лет и, прежде всего, появление сети Интернет требуют срочного переноса всей информации, накопленной советскими судами в глубоководной части океана, в цифровой вид для введения ее в анализ на современном уровне. Такая работа должна привести к принципиально новым теоретическим и практическим выводам о строении и геодинамическом развитии океанической литосферы.

Коллектив Лаборатории геоморфологии и тектоники дна океанов Геологического института РАН работает с компьютерными технологиями с 1991 г. Нами был собран и структурирован большой фактический материал по рельефу дна, геологии, гравиметрии, магнитометрии, географии, истории исследований, сейсмичности Атлантического океана и его обрамления, который был представлен в виде серии карт Центральной Атлантики (рис. 1) различного содержания и выставлен в доступном для любого пользователя формате в Интернет (http://atlantic.tv-sign.ru). Такая серия позволяет четко представить тектоническую позицию любого из районов исследования Геологического института РАН, который в течение 15 лет провел 22 научных рейса по фундаментальным тематикам. Был также разработан проект создания крупномасштабных геолого-геофизических

©2001 Российский журнал наук о Земле.

Статья N RJE01055.

Онлайновая версия этой статьи опубликована 15 декабря 1998.
URL: http://eos.wdcb.ru/rjes/v03/RJE01055/RJE01055.htm

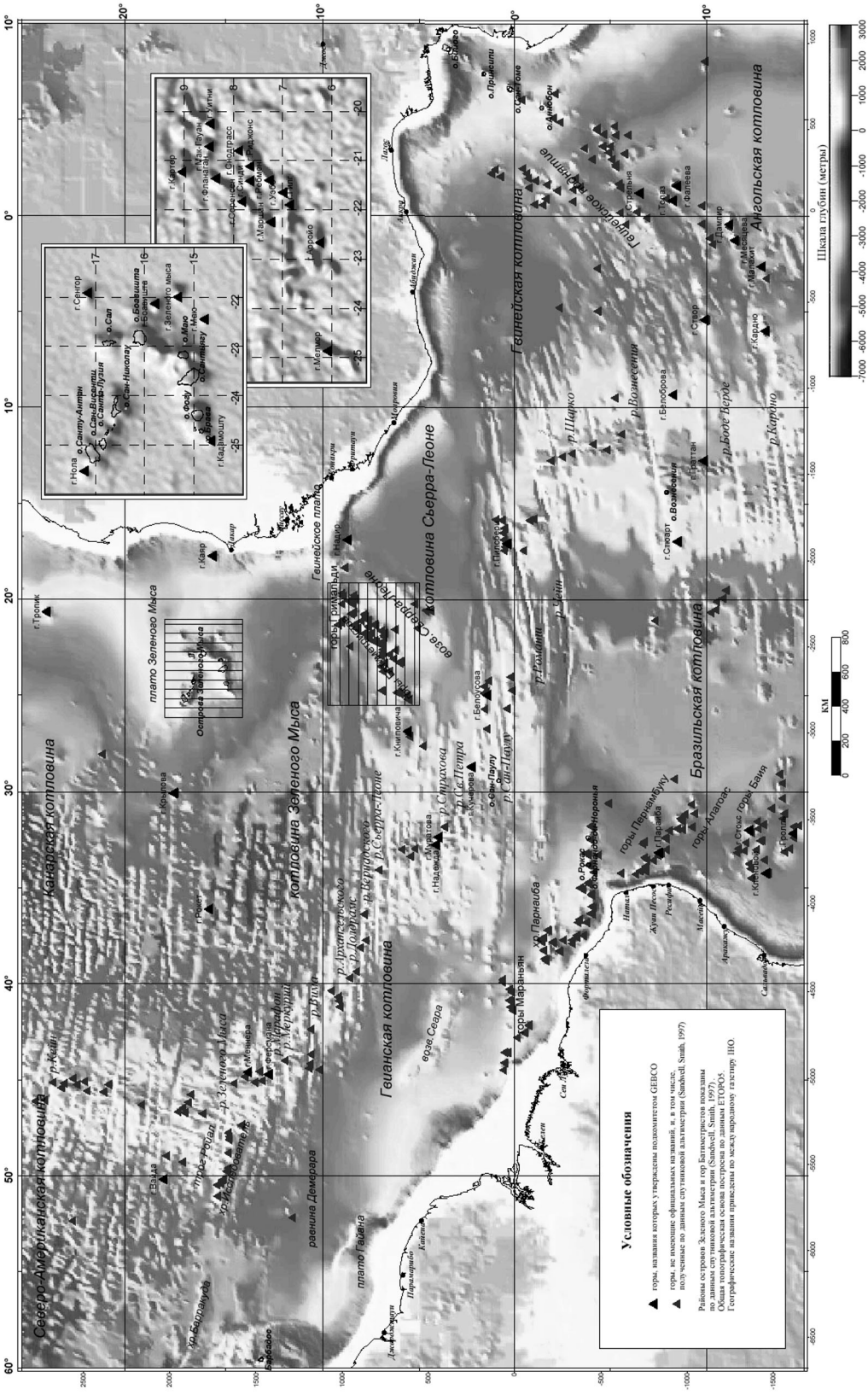

Рис. 1. Обзорная физико-географическая карта Центральной Атлантики.

Таблица 1. Информация об экспедициях, работавших в пределах полигона Сан-Паулу

Название судна	Рейс	Год	Страна
Челленджер	нет данных	конец XIX века?	Великобритания
Чейн	CH63	1963	США
Чейн	CH03502	1963	США
Атлантис II	AII020	1966	США
Пиллсбери	P6707	1967	США
Роберт Конрад	RC2806	1987	Великобритания
Академик Николай Страхов	07	1988	СССР
Академик Николай Страхов	12	1991	СССР
Академик Борис Петров	17	1991	СССР
Академик Николай Страхов	22	2000	Россия/Италия

карт на каждый полигон, дающих полное представление о строении того или иного района. Подобная работа предполагает создание геоинформационной системы по Центральной Атлантике, позволяющей получать оперативную информацию для любых географически привязанных объектов в указанном регионе. Работа, целью которой была оценка возможности получения принципиально новой научной информации в результате компьютерной обработки данных по хорошо изученной территории, началась с полигона, охватывающего активную часть разломной зоны Сан-Паулу.

История исследования активной части разлома Сан-Паулу

Разломная зона Сан-Паулу протягивается от конуса выноса Амазонки до побережья Западной Африки между экватором и 1–2° с.ш. (рис. 2). По данным GEODAS (Marine Trackline Geophysical Data CD. NOAA), в этом районе прошло 116 рейсов научно-исследовательских судов США, Франции, Германии и СССР. От Южной Америки до 30° з.д. разломная зона имеет субширотное простирание и представлена отчетливо выраженными поднятиями, разделенными депрессией дна с общей шириной порядка 100 км. В районе 30° з.д. зона разломов изменяет свое простирание на северо-восточное (рис. 2) и происходит ее виргация. В результате активная часть разломной зоны между 25 и 30° з.д. имеет наиболее сложное строение [*Агапова,* 1993; *Gorini,* 1981], которая изучалась рядом экспедиций (табл. 1). Здесь выделяются четыре желоба, разной протяженности. Восточные части зоны разломов Сан-Паулу служат южным ограничением котловины Сьерра-Леоне.

В результате работ вышеуказанных экспедиций были собраны материалы о глубинах как однолучевым, так и многолучевыми эхолотами разных типов, данные о строении осадочного чехла по данным непрерывного сейсмического профилирования и некоторые другие. В пределах района работ было проведено донное опробование трубками разных типов и драгировками. Всего у авторов имеются данные о 25 станциях, из которых 16 принесли коренные породы разных типов, 3 – осадочные породы, 6 – были безрезультатными. На севере района в 7-ом рейсе “Академик Николай Страхов"была проведена подводная фотосъемка. Помимо этого, в центральной части полигона в 1997 г. были погружения подводного аппарата “Надир"(Франция), в результате которых была получена информация о 62 станциях наблюдения (персональное сообщение Р. Экиньяна).

Батиметрическая съемка в 7-ом рейсе НИС

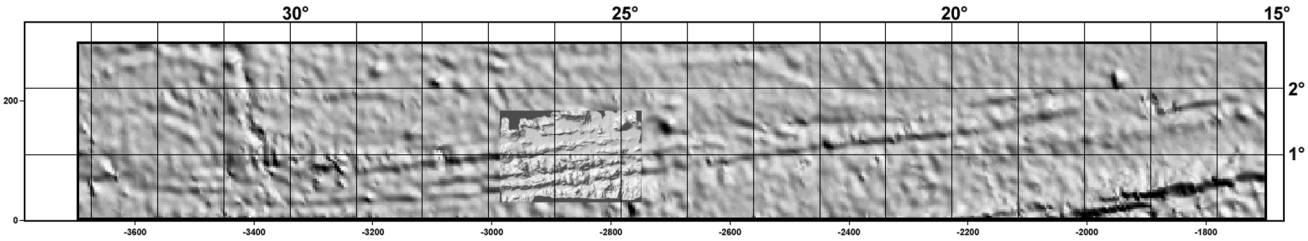

Рис. 2. Разломная зона Сан-Паулу и положение на ней полигона детальных работ 7-ого рейса НИС “Академик Николай Страхов"(Геологический институт РАН, 1988 г.). Картографическая основа – спутниковая альтиметрия [*Smith and Sandwell,* 1997].

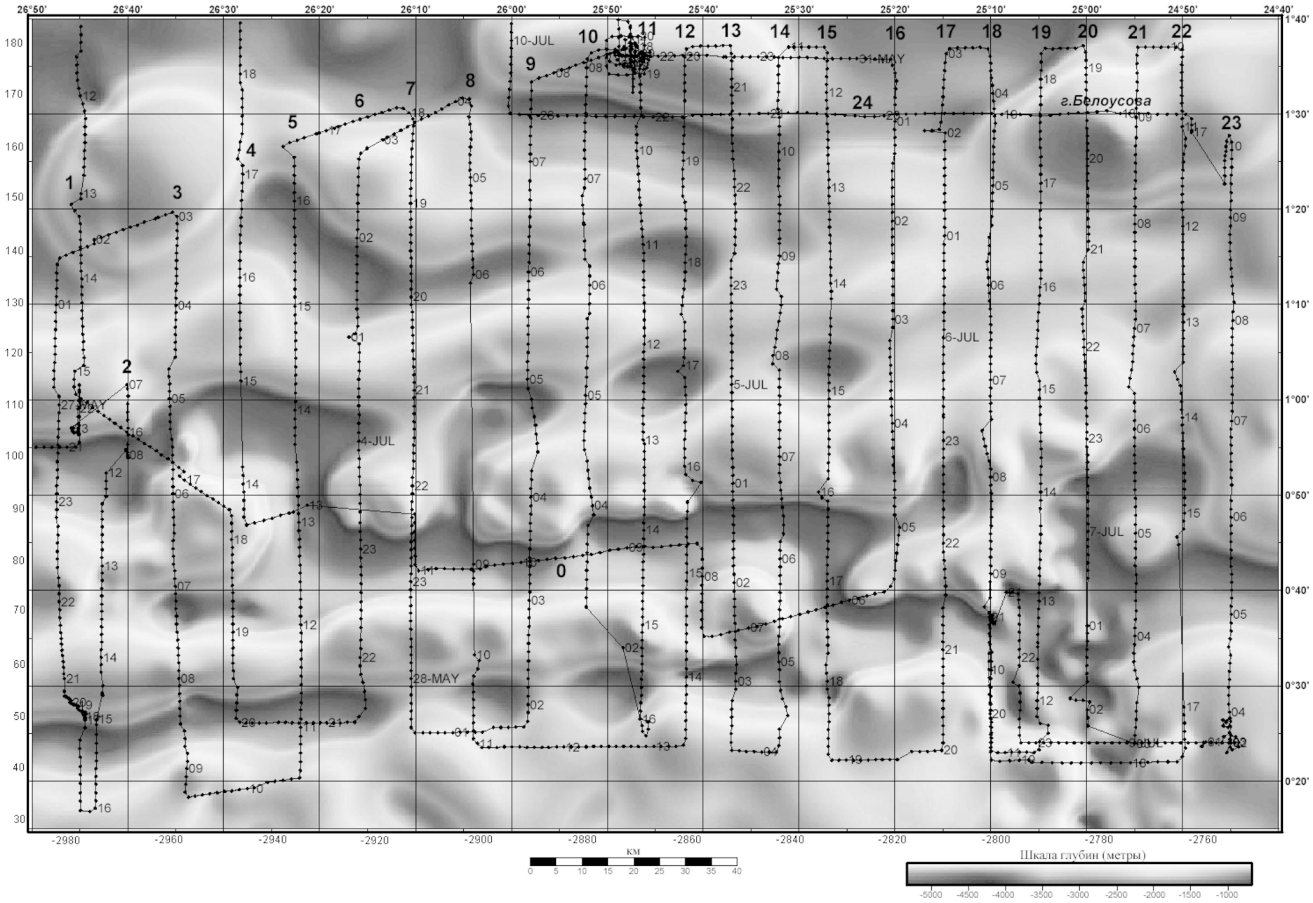

Рис. 3. Прокладка 7-ого рейса НИС "Академик Николай Страхов". Картографическая основа – предсказанная топография [*Smith and Sandwell,* 1997]. Крупные цифры (0, 1–24) – сейсмические профили.

"Академик Николай Страхов"(1988 г.) проводилась многолучевым эхолотом ECHOS-625 по системе из 23 галсов с межгалсовым расстоянием 5 миль (рис.3). Исходная батиметрическая карта [*Агапова,* 1993] (рис. 4) представляет собой авторский оригинал в масштабе 1 : 250000 по экватору, с сечением рельефа в 100 м. Ее цветной вариант был опубликован [*Экваториальный сегмент...,* 1997, стр. 8]. В том же масштабе были опубликованы исходная карта мощности осадочного чехла (с интервалом изопахит в 200 м) и карта акустического фундамента.

Методика оцифровки карт и получения цифровой модели

Вся работа по преобразованию указанной картографической информации, содержащей изолинии, в электронный вид может быть условно разделена на два этапа.

1 этап – оцифровка данных. Исходная батиметрическая карта была отсканирована и ее изображение было сохранено в растровом формате. При сканировании необходимо добиваться наиболее контрастного и четкого изображения объектов, по возможности, в черно-белом режиме. Далее, в полуавтоматическом режиме (т.е. и вручную, и с помощью трассировки по контрасту элементов изображения), средствами графических редакторов карта была преобразована в векторный формат, т.е. изобаты (изопахиты) представляются системой полилиний с фиксированными значениями номиналов изобат (изопахит). Например, номинал может быть сохранен в виде имени векторного слоя, куда помещаются только объекты данного номинала. Затем производится калибровка системы координат полученных векторных форм из условных координат первичного рабочего планшета в правильные проекционные значения. В этом виде информация уже может быть использована в ГИС-системах и геостатистических програм-

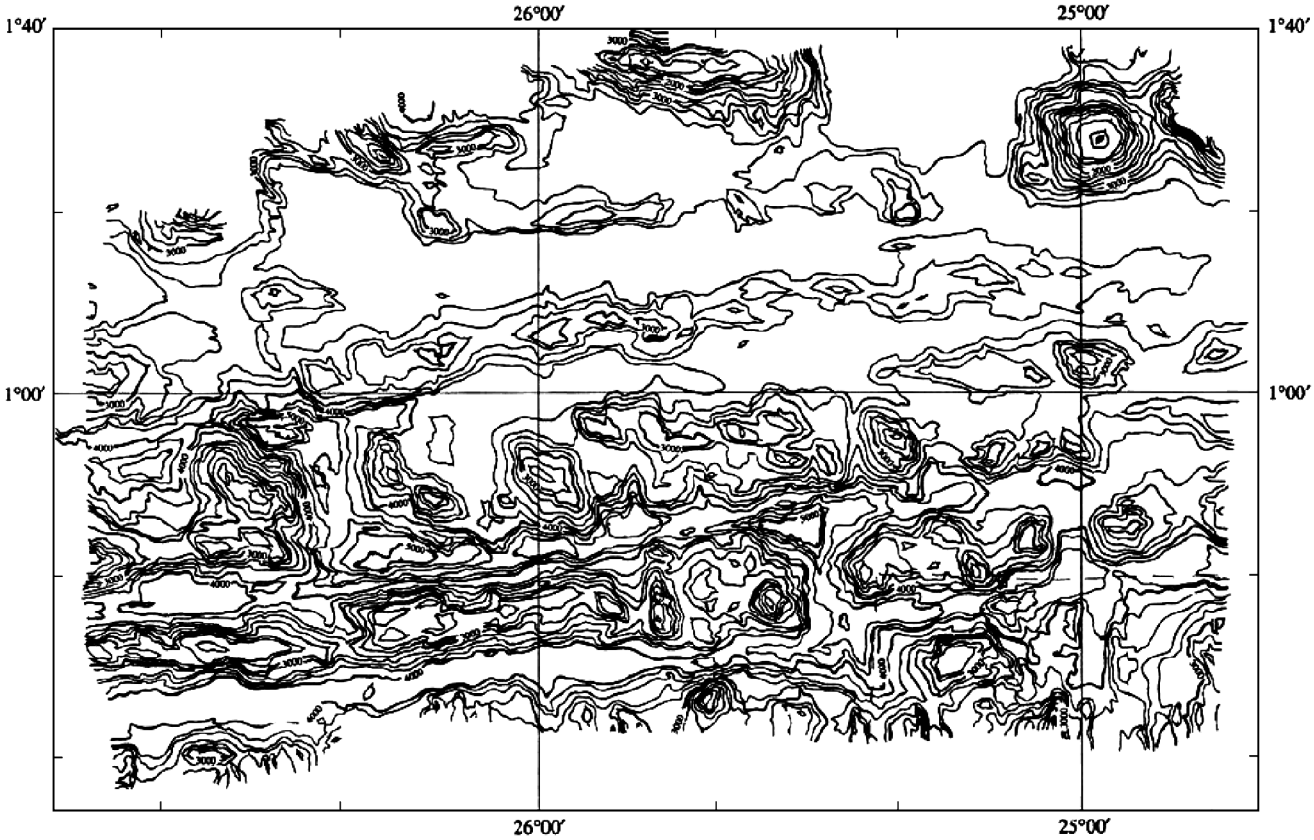

Рис. 4. Исходная батиметрическая карта [*Агапова,* 1993].

мах как набор векторных элементов, но отнюдь не как представленная равномерно в некоторой области (с фиксированной шагом дискретизации) пространственная функция. После этого информация переводится в форму XYZ списка точек, описывающего рисунок изолиний, где каждая точка представлена тремя пространственными значениями. Калиброванные векторная и списочная формы и являются конечным продуктом на стадии оцифровки данных. Отметим, что в качестве Z значения может фигурировать любой параметр, по которому построена исходная карта – рельеф, мощность осадков, сила тяжести и т.д.

2 этап – создание цифровой модели. Данный этап состоит в расчете при помощи статистических методов наиболее вероятных значений глубины (или любых других параметров) в строго определенных точках по списку XYZ значений. Этими точками являются узлы регулярной пространственной XY-сетки (“grid"), размерность и шаг которой задаются исходя из детальности и качества первичного материала, а также от масштаба карты. Результатом расчета является набор Z значений на узлах сетки, называемый математической моделью, рассчитанной на основе реальных данных. При этом часть узлов может быть не заполнена. Вне зависимости от того, какой из статистических методов расчета применялся, достоверность модели будет тем выше, чем выше плотность изолиний параметра карты. Большая степень достоверности получается в районах с большими уклонами или пересеченным рельефом, т.е. в тех местах, где изначально была большая плотность линий. При недостаточной плотности исходных данных на отдельных участках карты (например, выровненные участки дна с малой плотностью изобат) используемые алгоритмы генерируют значения, имеющие мало общего с действительностью. Критерием достоверности в данном случае является максимальное совпадение изолиний, построенных по сетке, с исходными изолиниями. При наличии этого совпадения можно считать цифровую модель адекватной исходным данным. В узлах сетки, попадающих на зоны между исходными изолиниями, находятся интерполированные значения параметра и это максимум возможного при построении моделей по материалам, имеющим представление в виде изолиний. В крайних случаях для корректировки модели в местах, содержащих явную неадекватность природе, но ясных с точки зрения человеческого восприятия и опыта, вводились дополнительные данные, т.е. проводится отрисовка дополнительных изобат (или изо-

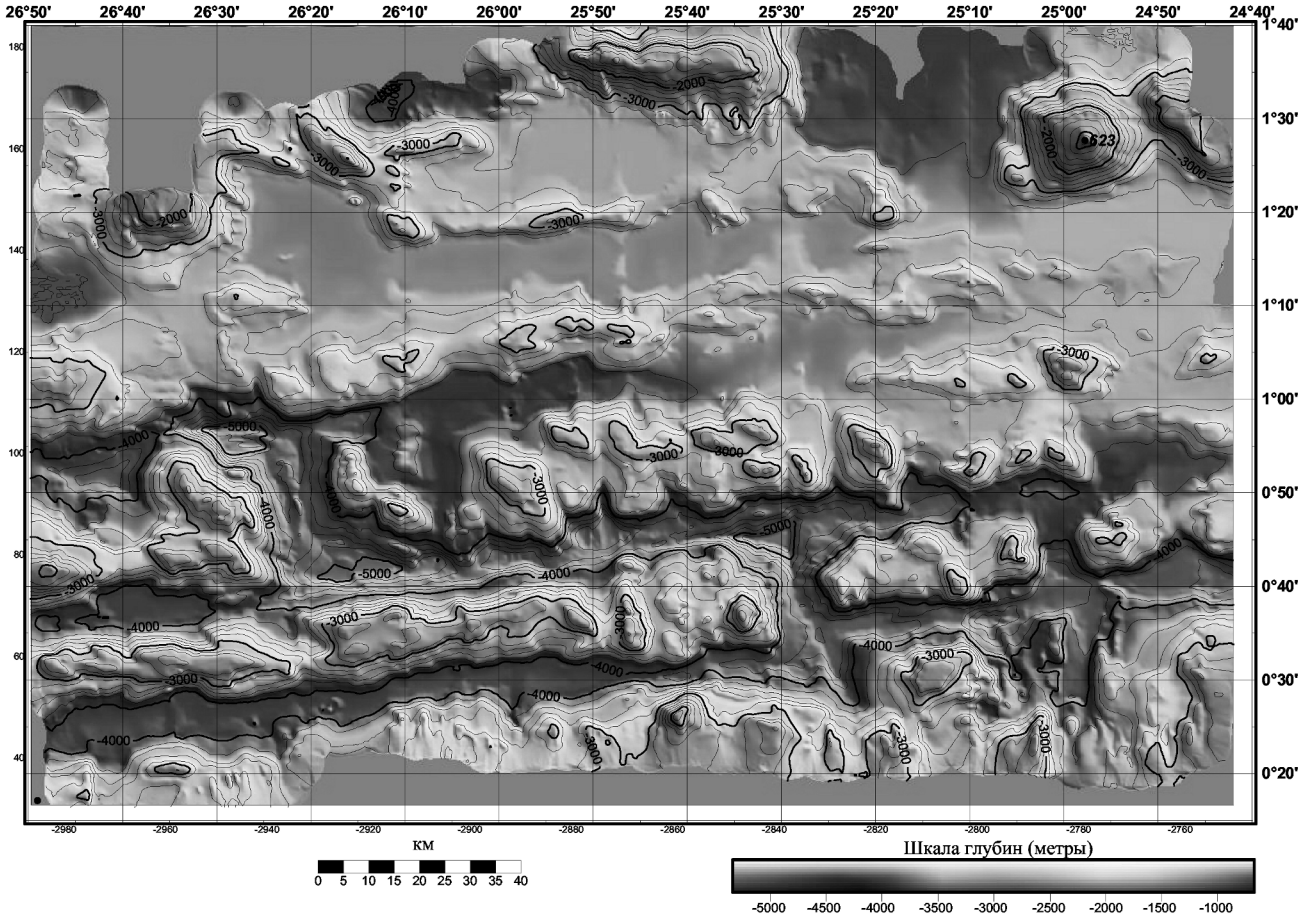

Рис. 5. Батиметрическая карта активной части зоны разломов Сан-Паулу, составленная по данным 7-ого рейса НИС “Академик Николай Страхов"и 17-ого рейса НИС “Академик Борис Петров". Представленная карта выполнена по технологии оттененного рельефа. Сечение рельефа через 200 м.

пахит), наличие которых в массиве данных позволяет стабилизировать отклонения деятельности алгоритмов расчета. Подобный метод стабилизации модели вполне допустим до тех пор, пока в распоряжении исследователя не оказывается новый экспериментальный материал.

Все указанные особенности получения цифровой модели и оценки ее качества относятся только к случаю материалов, представленных изолиниями. В современных эхолотных системах, где многолучевой способ промера глубины дна порождает огромный массив XYZ точек, покрывающий полосу дна шириной до 3,5 глубин, данные уже практически приближены к состоянию пространственной функции, описывающей дно с почти равномерной дискретностью, т.е. к сетке. В этой ситуации становятся актуальными альтернативные способы визуализации дна, такие как оттененный (shaded) рельеф, цветовая или тоновая отмывка (image map) и их комбинации с традиционным методом изолиний. Но не метод изолиний в чистом виде, поскольку для современной детальности этот метод скорее скрывает информацию о рельефе, чем визуализирует ее.

Сравнение предсказанной топографии [*Smith and Sandwell,* 1997] с оттененным рельефом, полученным в результате оцифровки в пределах исследуемого полигона (рис. 2 и 5), показало, что имеется хорошее совпадение данных, хотя в отдельных случаях на предсказанной топографии были объединены в единую структуру разные объекты, особенно в областях развития осадочного чехла. Для оценки точности предсказанной топографии с реальной батиметрией было произведено совмещение контуров. В результате выяснилось, что предсказанная топография дает ошибку порядка 100 м в сторону уменьшения глубины.

Гравитационное поле в пределах полигона было построено по данным спутниковой альтиметрии [*Sandwell and Smith,* 1997] с разрешением в одну дуговую минуту (рис. 9а). Это поле представляет со-

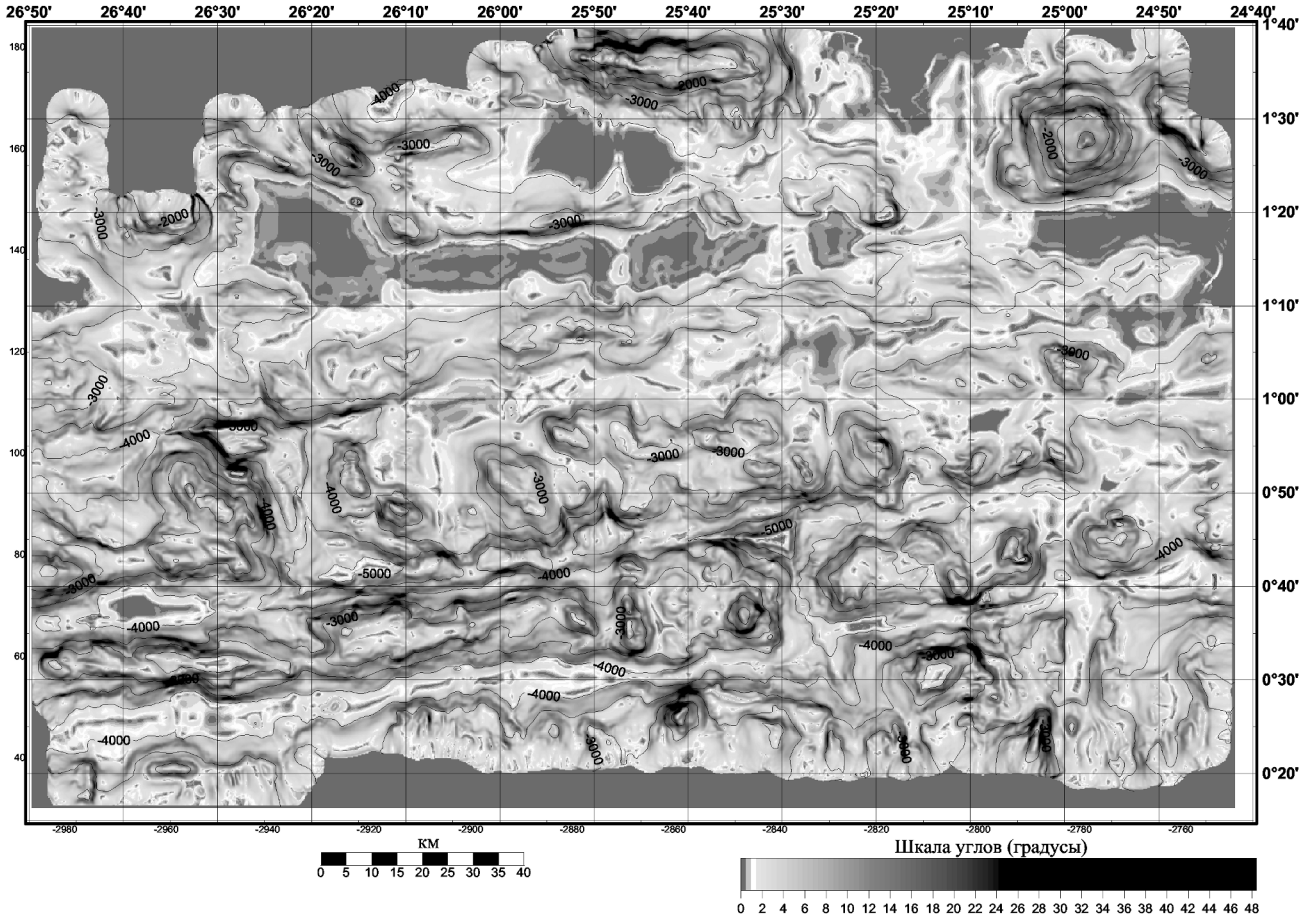

Рис. 6. Карта углов наклона склонов активной части зоны разломов Сан-Паулу. Сечение рельефа через 500 м.

бой высоты поверхности океана, снятые радарным способом и пересчитанные в значения силы тяжести на уровне моря или аномалию в свободном воздухе. Эта аномалия на 80–90% состоит из влияния рельефа, как самого контрастного скачка плотностей. Плотностной контраст вода–дно, равный 1,72 г/см^3, маскирует эффект производимый неоднородностями коры и мантии. Поскольку рельеф является объектом изучения другого метода – эхолотирования, и хорошо им изучен, для снятия маскирующего влияния этой границы была рассчитана аномалия Буге. Эта аномалия отражает гравитационный эффект плотностных неоднородностей коры и контрастной границы кора-мантия. Контраст плотности на этой границе существенно меньше, чем в вышележащей толще и поэтому ее вклад в аномальное поле должен быть представлен плавными изменениями аномальной составляющей. Плотностные неоднородности коры представлены сильными локальными аномалиями Буге разного знака по сравнению с общим фоном.

Для понимания распределения породных комплексов были собраны данные о донном опробовании с различных судов, которые были организованы в виде электронных таблиц в реляционной базе данных. Помимо этого, в Интернете были собраны данные по сейсмичности [*CNSS...,* 1997]. В целом, в результате работы был собран и систематизирован огромный фактический материал, который позволял провести комплексную обработку данных. Базовым материалом для последующего анализа стал созданный набор карт в масштабе 1 : 650000:

Лист 1. Схема работ 7-ого рейса НИС “Академик Николай Страхов"(ГИН РАН, 1988 г.) на востоке активной части зоны разломов Сан-Паулу. Соколов С. Ю., Ефимов В. Н. (рис. 3).

Лист 2. Рельеф активной части зоны разломов Сан-Паулу. Агапова Г. В., Добролюбова К. О. (рис. 5).

Лист 3. Карта углов наклона склонов активной части зоны разломов Сан-Паулу. Добролюбова К. О., Агапова Г. В., Соколов С. Ю. (рис. 6).

Лист 4. Карта мощности осадочного чехла актив-

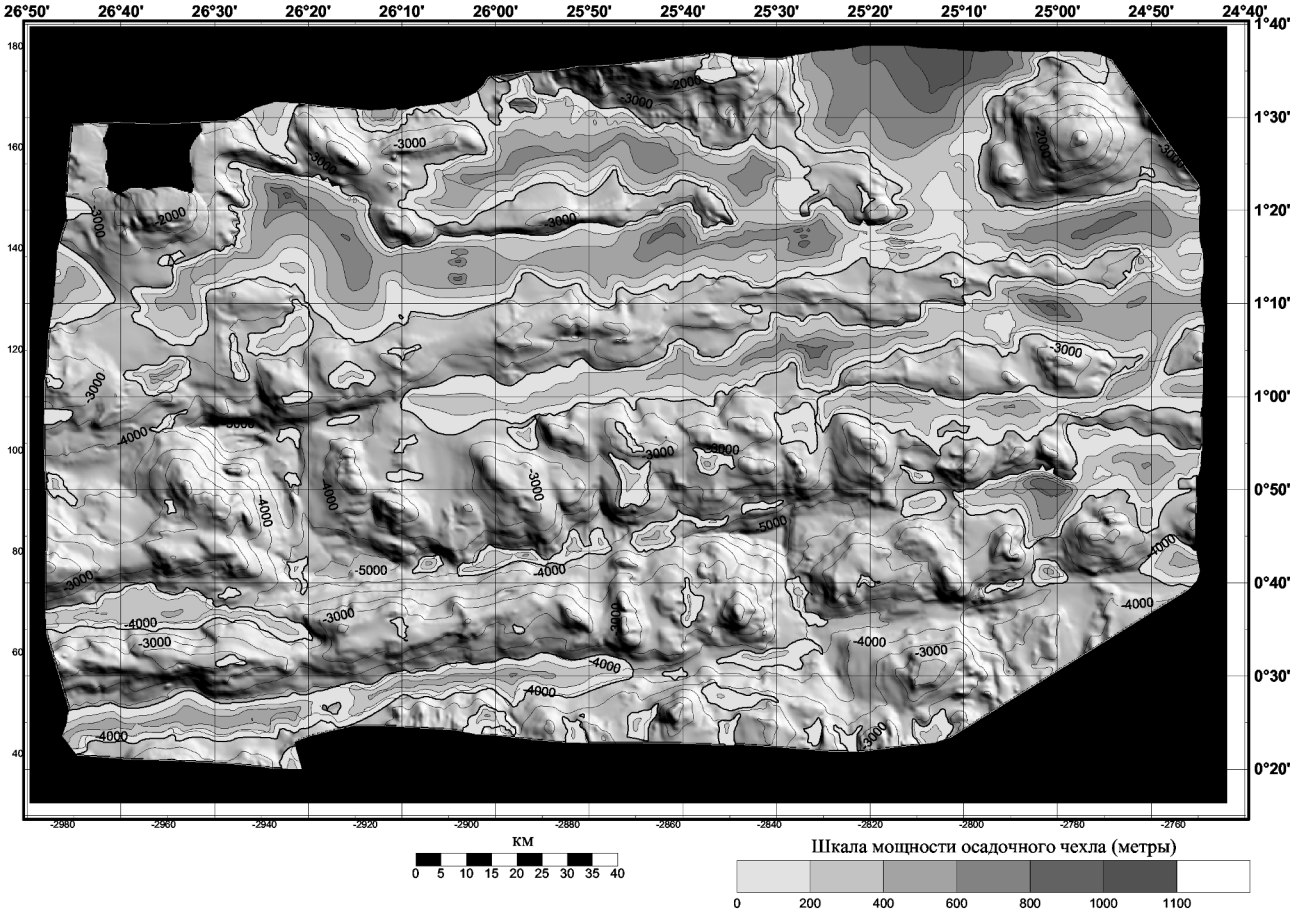

Рис. 7. Карта мощности осадочного чехла активной части зоны разломов Сан-Паулу. Сечение рельефа через 500 м.

ной части зоны разломов Сан-Паулу. Ефимов В. Н., Кольцова А. В. (ГЕОХИ РАН), Соколов С. Ю. (рис. 7).

Лист 5. Рельеф акустического фундамента активной части зоны разломов Сан-Паулу. Соколов С. Ю., Ефимов В. Н. (рис. 8).

Лист 6. Гравитационное поле активной части зоны разломов Сан-Паулу. Соколов С. Ю. (рис. 9).

Лист 7. Сейсмичность активной части зоны разломов Сан-Паулу. Соколов С. Ю. (рис. 10).

Лист 8. Коренные породы активной части зоны разломов Сан-Паулу. Мазарович А. О. (рис. 11).

Основные особенности строения активной части разлома Сан-Паулу по данным комплексного анализа

Разломная зона Сан-Паулу в пределах полигона состоит из четырех субширотных желобов, разделенных межразломными поднятиями (рис. 5). Глубины желобов, как отмечалось ранее [*Агапова,* 1993], увеличиваются с севера на юг от 3700 до 4200 м. В пределах изученной территории установлено также 3 рифтовых долины. С геодинамической точки зрения, съемкой было охвачено три активных и четыре пассивных частей трансформных разломов и две зоны спрединга.

В связи с тем, что зона разлома Сан-Паулу представляет единую систему из нескольких близко расположенных разломов, имеющих одно общее название для их отличия, была разработана схема виртуальных наименований, которая в дальнейшем и будет нами использоваться (табл. 2, рис. 12).

Для изученной части системы характерны короткие отрезки рифтов и чередование узких хребтов.

Трог SP1 представляет собой фланговую часть разломной депрессии, ограниченную с севера высоким хребтом, над которым возвышается остров Сан-Паулу, а в пределах полигона массивные блоки, вершины которых имеют глубины менее 2000 м, а глубина над горой Белоусова достигает 623 м.

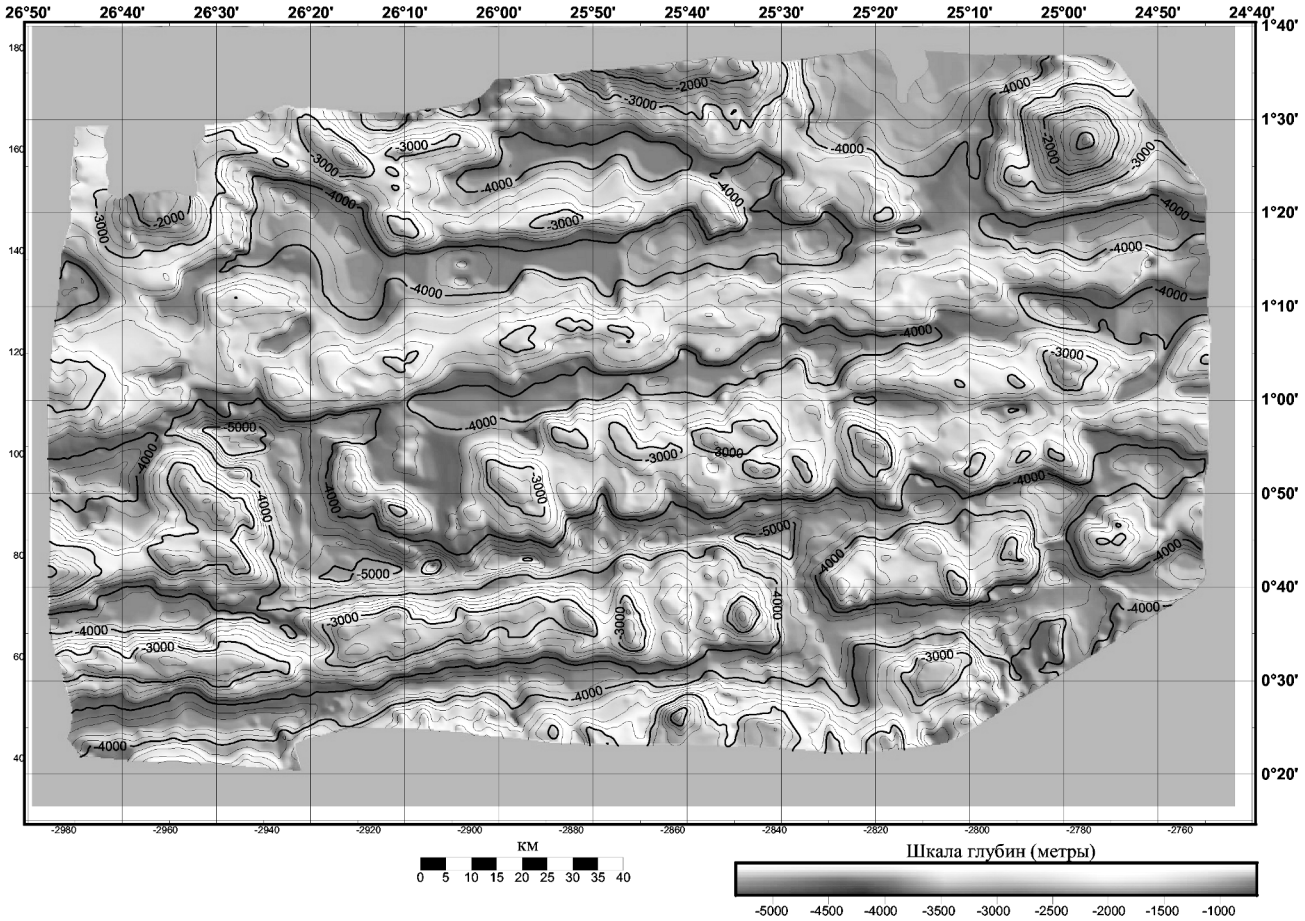

Рис. 8. Рельеф акустического фундамента востока активной части разломной зоны Сан-Паулу. Сечение рельефа через 200 м.

Вдоль северного борта трога простирается обширная выровненная ступень с глубиной поверхности около 3500 м. Ее край осложнен узкой субширотной грядой, над которой поднимаются пики с глубиной менее 3000 м. Как на ступени, так и в троге SP1 отмечены наиболее значительные мощности осадков, поверхности которых формируют самые обширные в пределах полигона выровненные участки дна. Эта часть трога представляет собой восточную фланговую часть наиболее протяженного сдвига в системе разломов Сан-Паулу и удалена от одноименного острова на расстояние более чем 140 миль.

Хребет SP1-2_W_RI протягивается от западной рамки изученной территории практически до ее востока. В указанном направлении он постепенно сужается и уменьшается по высоте. На всем протяжении хребет почти лишен осадочного чехла. Наибольшее расчленение рельефа характерно для его западной части, где расположена гора с глубиной вершины около 2500 м. Восточнее ее расположено обширное понижение рельефа, лежащее на продолжении рифтовой долины. Здесь установлены глубины 3400–3600 м и пологие углы склонов. В западной части морфоструктуры были подняты базальты (рис. 11). Восточнее 26°25′ з.д. вершинная поверхность хребта опускается на глубины 3200 м, над которыми возвышаются отдельные пики с высотой в 200–400 м. Для осевой части хребта, особенно в восточной части полигона, характерны неоднократные изменения простираний, что особенно хорошо видно на карте углов наклонов склонов. Изучение осадочного чехла на сейсмических профилях показывает (рис. 13а–в), что во многих местах на северо-востоке района происходят флексурные изгибы слоев, формирование уступов и моноклиналей. Можно думать, что здесь происходил интенсивный подъем крупных участков акустического фундамента.

Трог SP2 хорошо выражен в рельефе дна, в акустическом фундаменте представляет депрессию, восточная часть которой заполнена осадочным чехлом с

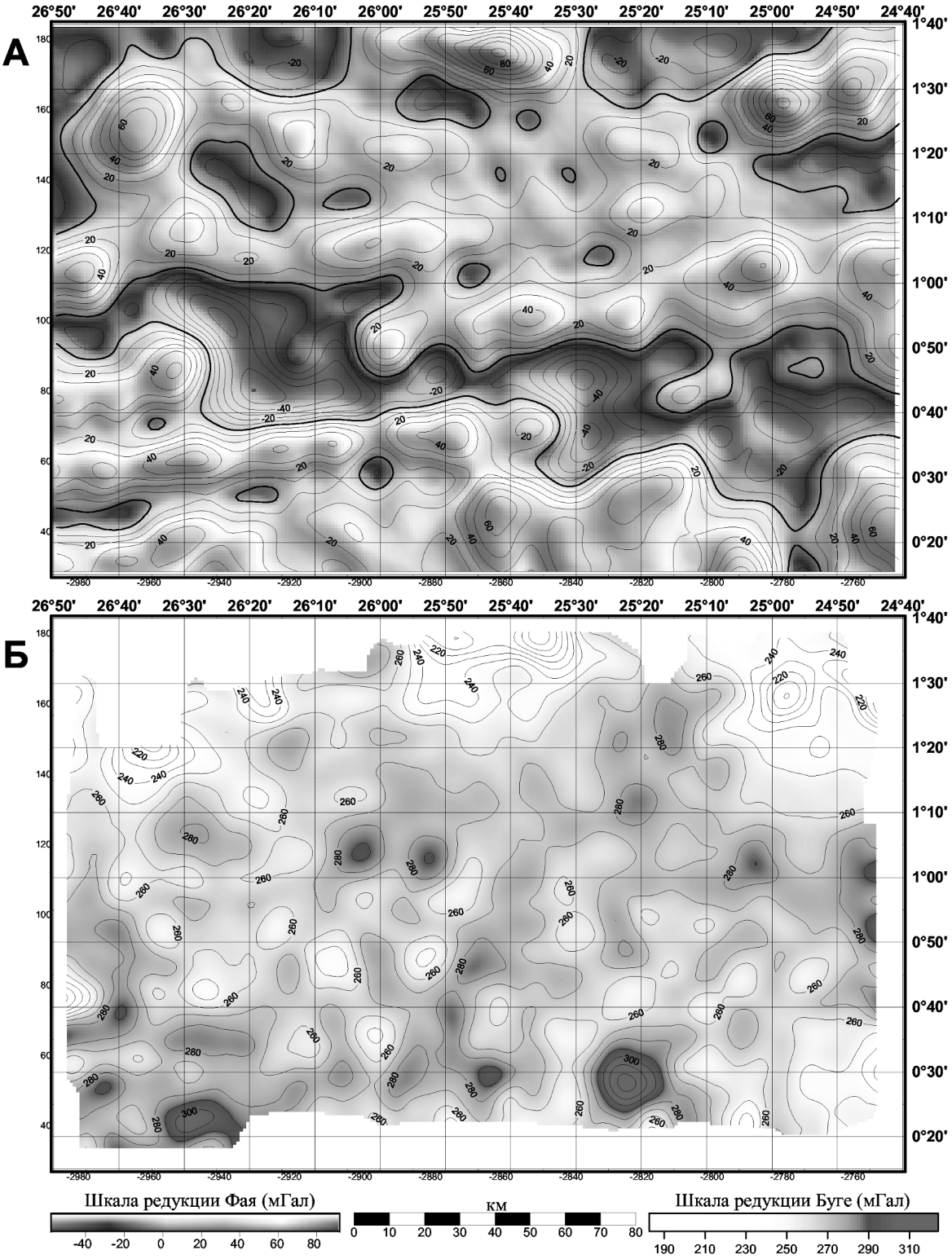

Рис. 9. Гравитационное поле активной части зоны разломов Сан-Паулу. А – аномалия в свободном воздухе, Б – аномалия Буге.

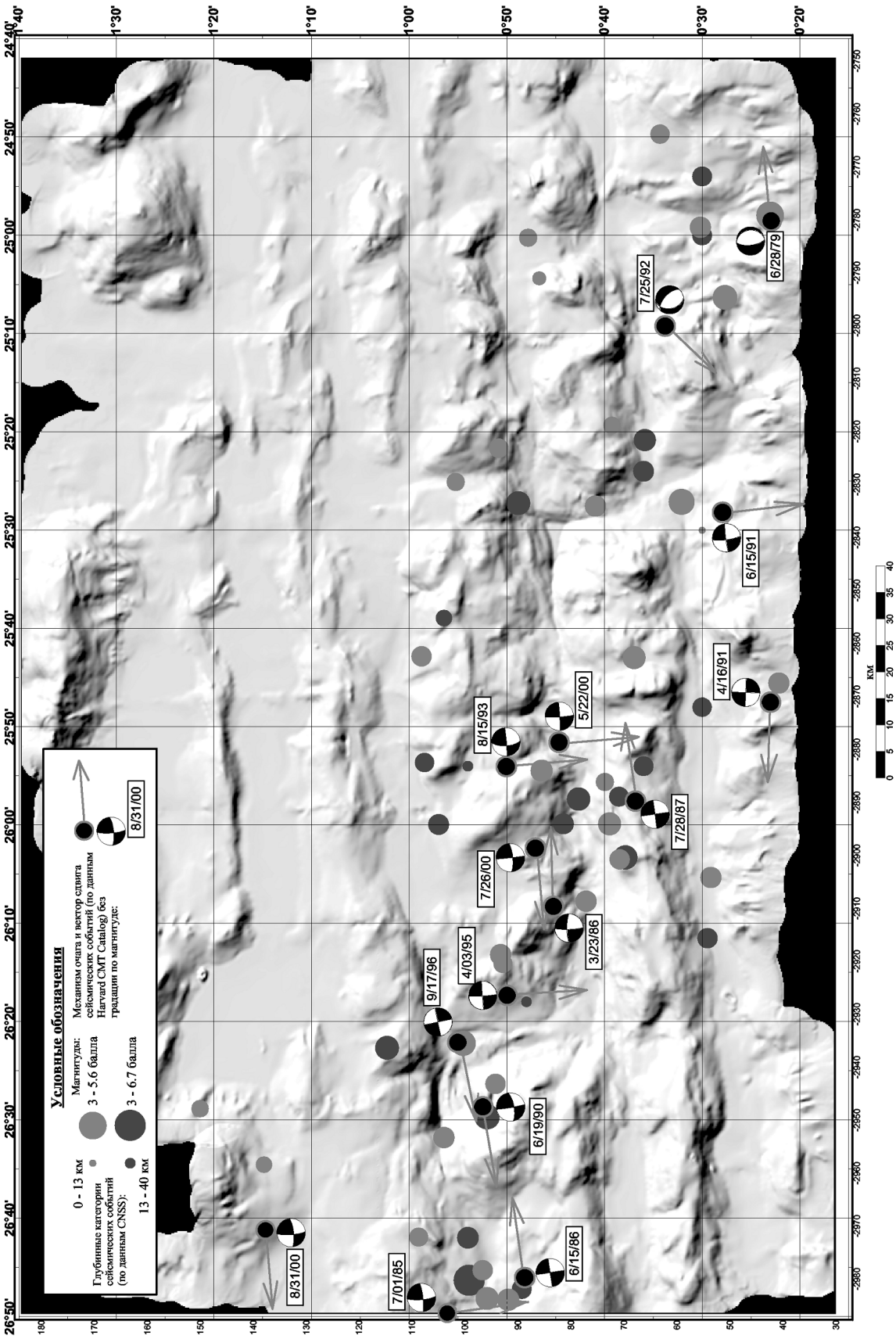

Рис. 10 Сейсмичность активной части зоны разломов Сан-Паулу.

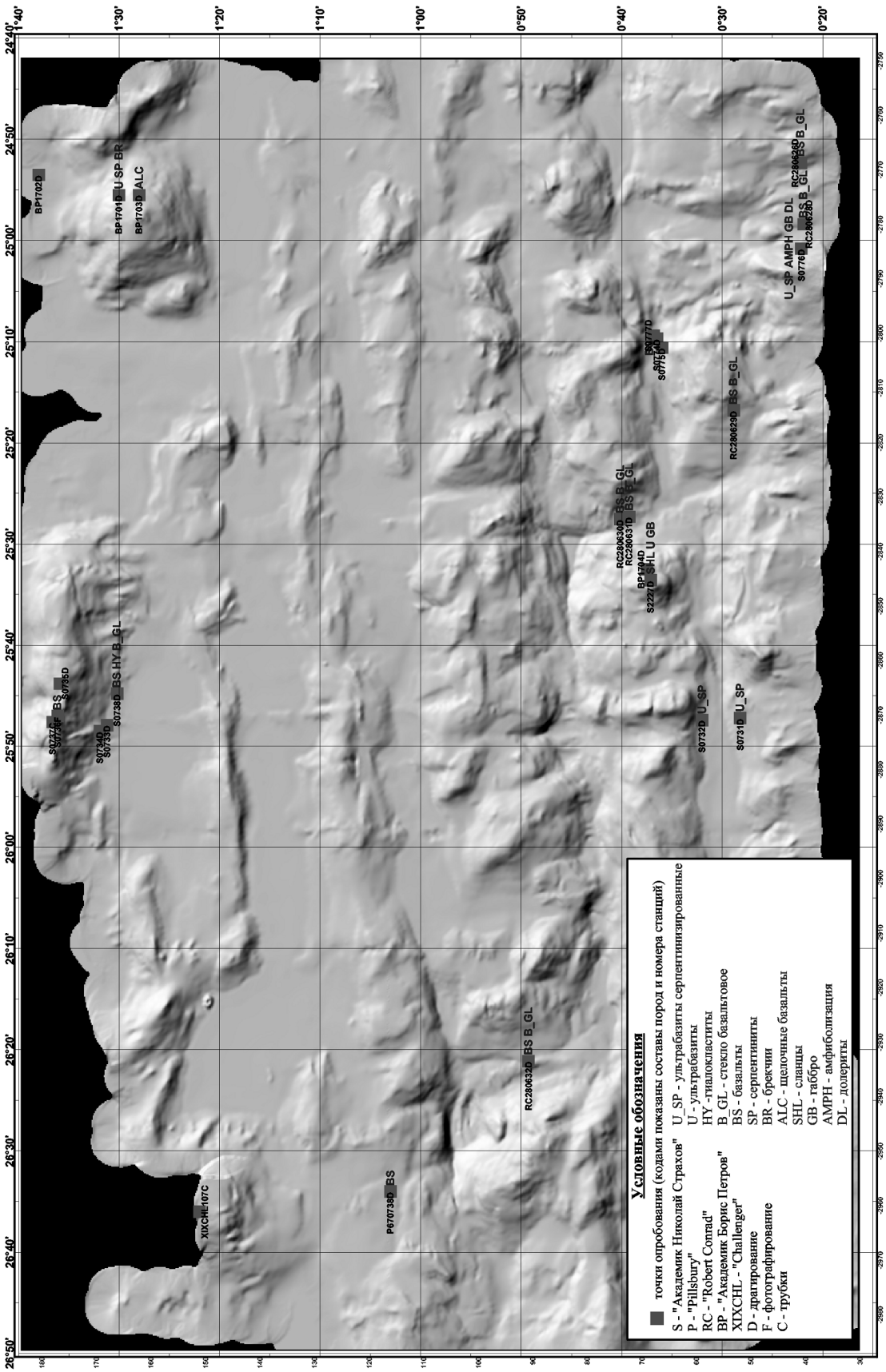

Рис. 11. Коренные породы активной части зоны разломов Сан-Паулу.

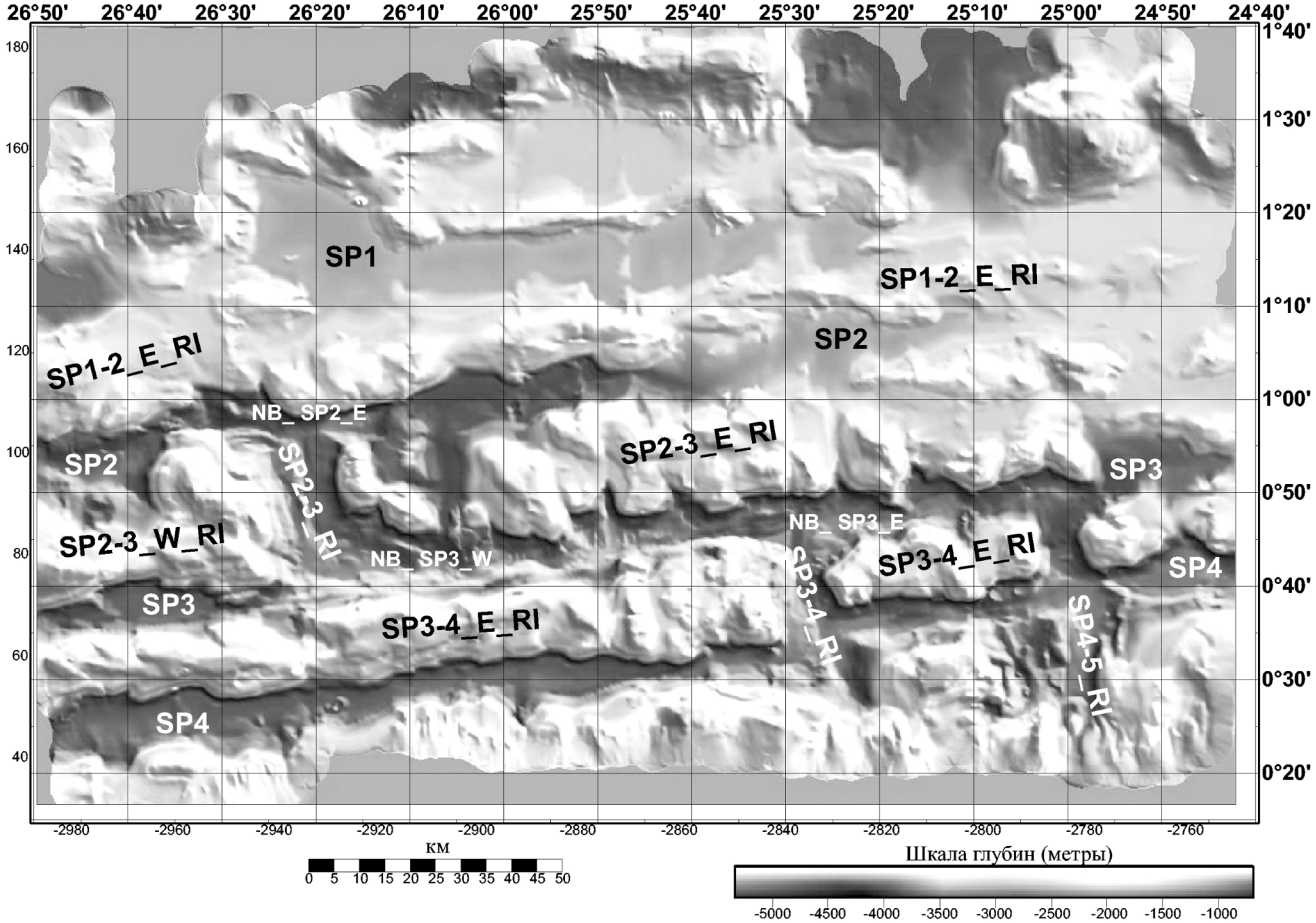

Рис. 12. Схема виртуальных наименований активной части зоны разломов Сан-Паулу. Объяснение см. табл. 2.

мощностью осадков от 200 до 1100 м. Западнее рифта трог переходит в понижение неправильной формы, имеющей ячеистое строение. С ним связана концентрация эпицентров землетрясений (рис. 10). Восточнее нодальной впадины **NB_SP2_E** (см. ниже) желоб постепенно расширяется в восточном направлении. Вдоль его оси часто протягивается полоса горизонтального дна, к северу и югу от которой происходит увеличение его наклонов. Внутри желоба встречаются участки, где крутизна склонов увеличивается. В ряде мест отмечаются резкие расширения желоба, именно с этими местами связаны депоцентры накопления осадков (1000–1100 м).

Хребет SP2-3_W_RI, ограничивающий рифт с запада, состоит из двух частей, разделенных узкой седловиной северо-западного простирания. Южная, приразломная часть представляет собой субширотный гребень с двумя вершинами, разделенными седловиной. Западная пририфтовая часть представляет собой угловое поднятие с глубинами несколько меньше 2000 м. Южный склон имеет углы в среднем 8–12°, на фоне которых существуют резкие уступы с крутизной 20–45°. Северный склон более пологий.

Рифтовая зона SP2-3_RI (26°25′ з.д.) имеет асимметричное строение – западный склон более крутой и наклоны здесь составляют в основном 12–15°, хотя на отдельных участках склонов они превышают 30° (рис. 14). Вдоль оси рифтовой долины протягивается узкий хребет с относительной высотой до 200 м. В северной части хребет становится низким и широким. Детальная батиметрия с сечением рельефа 10–20 м показывает, что он продолжается в пределы нодальной впадины **NB_SP2_E**, разделяя ее на две впадины – северную и южную. Этот район отличается наибольшими углами наклонов склонов в пределах всего полигона. В южной части рифтовой долины хребет постепенно поворачивает к ее западному борту и соединяется с ним. В пределах хребта была проведена драгировка RC280632 с судна “Роберт Конрад"[*Schilling et al.,* 1995], которая подняла свежие базальты со стеклами. Тектоническое положение хребта и поднятая порода поз-

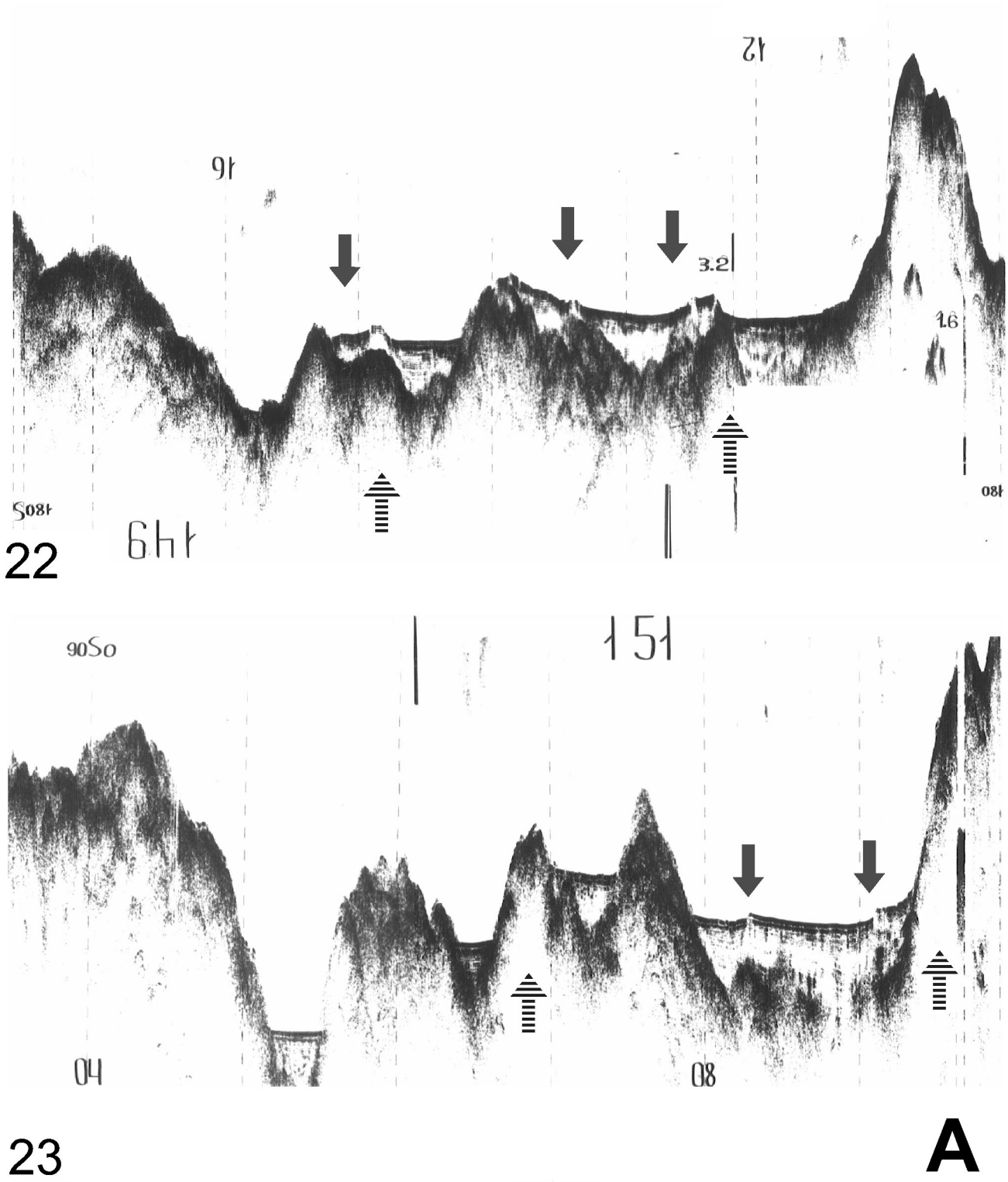

Рис. 13. Сейсмические профили НСП. Положение профилей см. рис. 3. Сплошные (красные) стрелки - примеры деформаций, пунктирные (синие) - возможные области подъемов акустического фундамента. а – сейсмопрофили 22, 23.

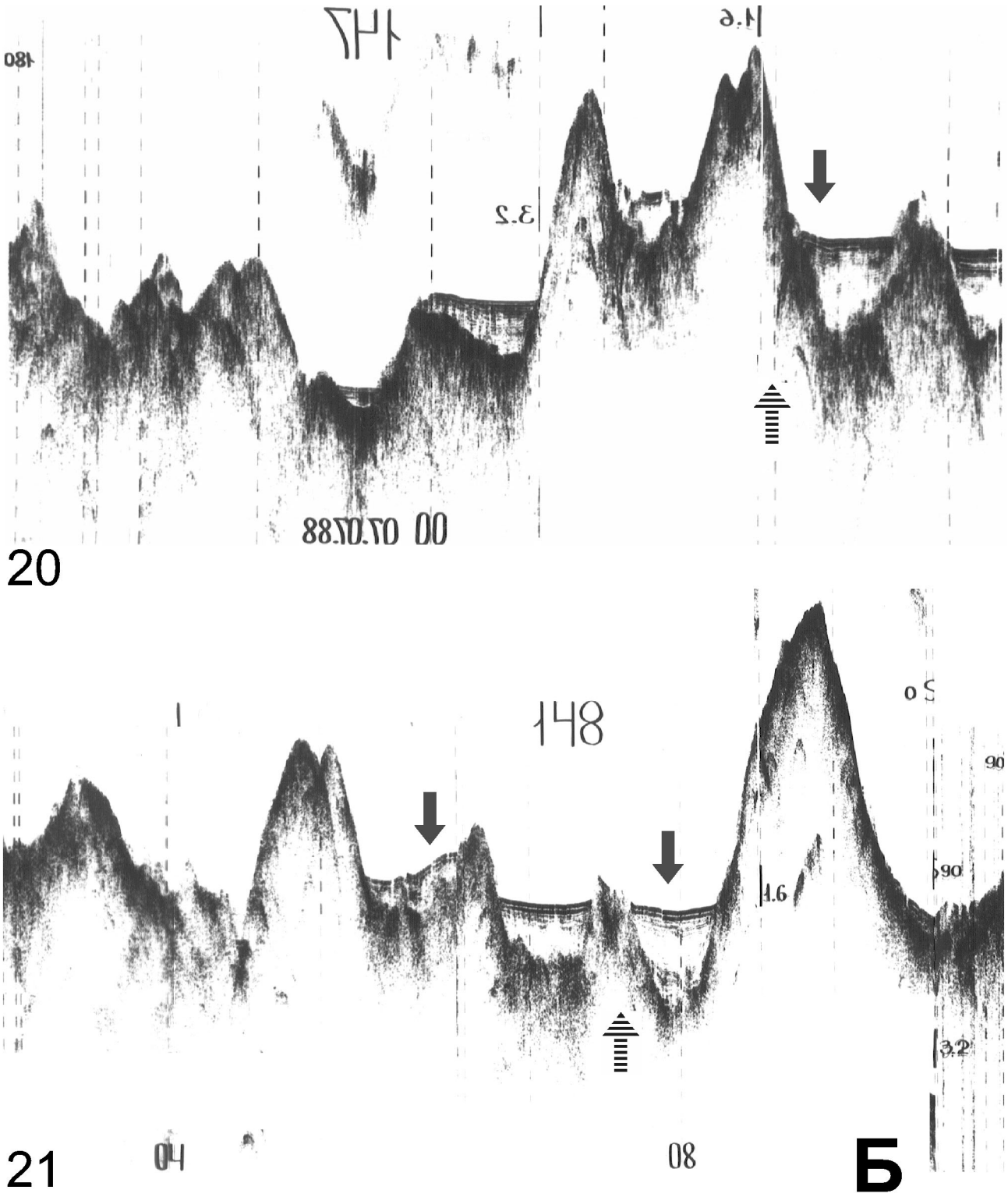

Рис. 13. Продолжение. б – сейсмопрофили 20, 21.

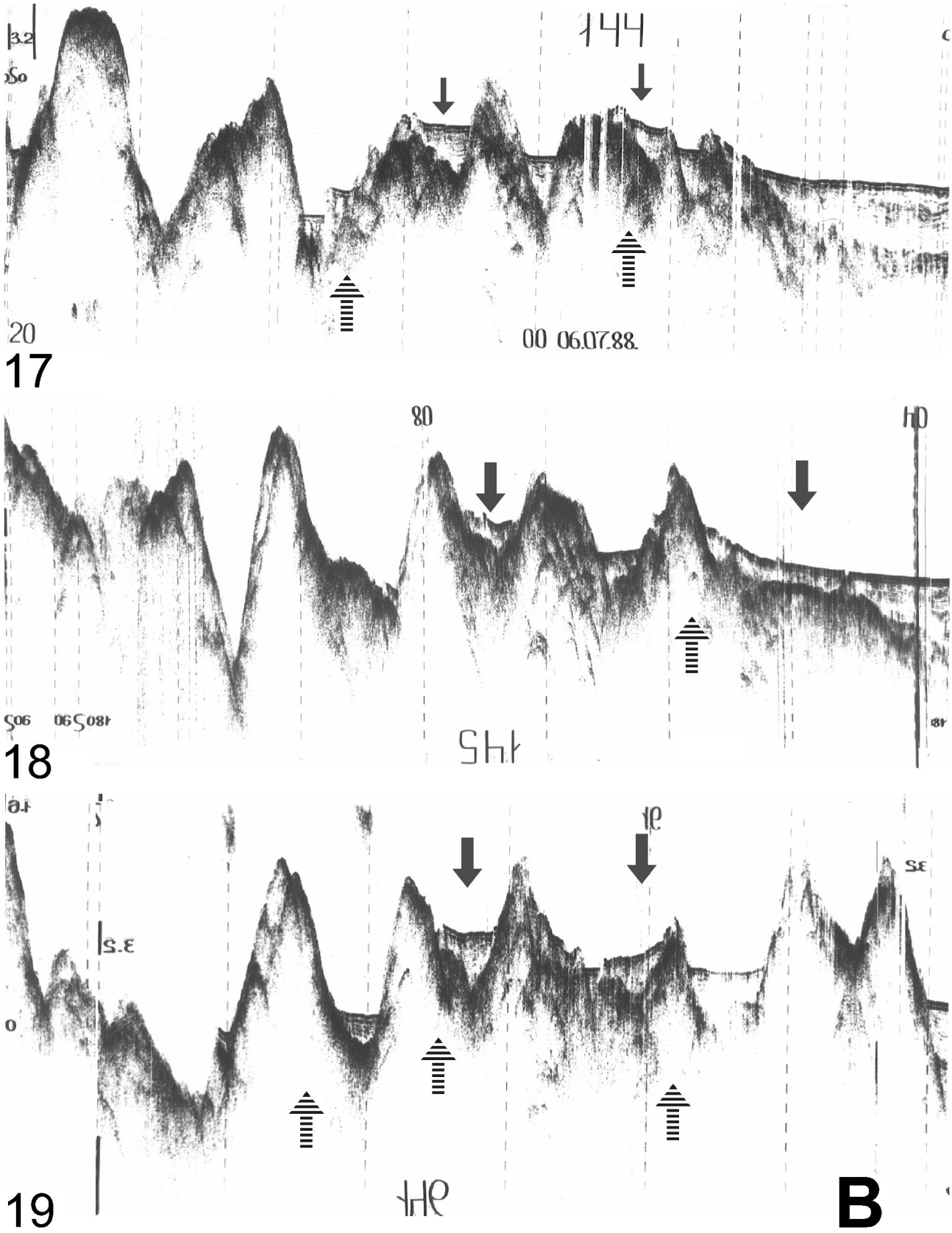

Рис. 13. Продолжение. в – сейсмопрофили 17–19.

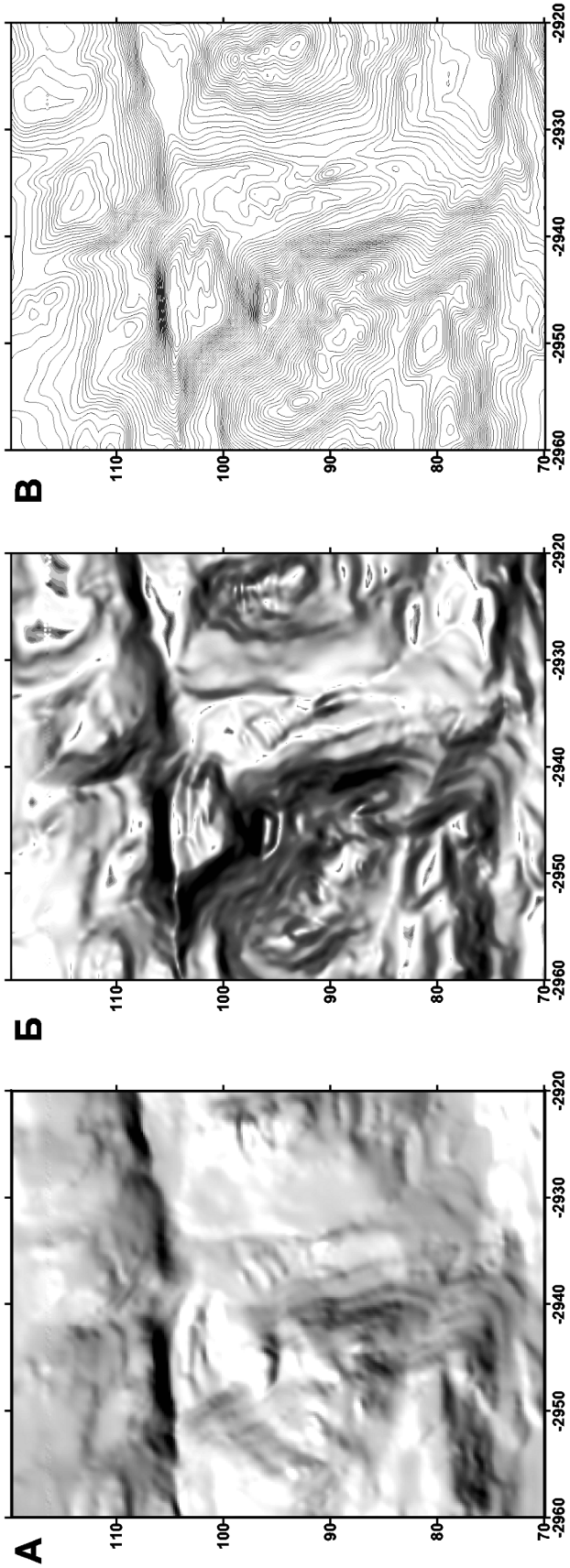

Рис. 14. Детализированные карты рифтовой зоны SP2-3_RI (26°25′ з.д.): а – батиметрическая карта, выполненная по технологии оттененного рельефа; б – карта углов наклона склонов; в – батиметрическая карта, сечение рельефа через 50~м. Координаты проекционные.

Таблица 2. Виртуальные географические названия в пределах полигона Сан-Паулу (с севера на юг)

объекты	индексы
разломные депрессии	
Сан-Паулу1 (наиболее северный разлом) Сан-Паулу2 Сан-Паулу3 Сан-Паулу4 (наиболее южный разлом)	SP1 SP2 SP3 SP4
межразломные хребты	
между разломом SP1 и SP2 к востоку от рифта между разломом SP2 и SP3 к западу от рифта между разломом SP3 и SP4 к западу от рифта между разломом SP1 и SP2 к востоку от рифта между разломом SP2 и SP3 к востоку от рифта между разломом SP3 и SP4 к востоку от рифта	 SP1-2_E_RI SP2-3_W_RI SP3-4_W_RI SP1-2_E_RI SP2-3_E_RI SP3-4_E_RI
рифтовые зоны	RI
между разломом SP2 и SP3 между разломом SP3 и SP4 между разломом SP4 и SP5	SP2-3_RI SP3-4_RI SP4-5_RI
нодальные впадины	NB
разлом SP2, восточная разлом SP3, западная разлом SP3, восточная	NB_ SP2_E NB_ SP3_W NB_ SP3_E

воляет интерпретировать его как неовулканическое поднятие. Восточнее и западнее последнего протягиваются зоны узких и глубоких впадин, западная из которых прослеживается в нодальную впадину **NB_SP2_W.** Последняя имеет пологие склоны (первые градусы) и широкое горизонтальное дно. Она вытянута вдоль разлома **SP2.**

Трог SP3 хорошо выражен в рельефе дна и в акустическом фундаменте представляет депрессию. Она менее других заполнена осадками, которые на значительном протяжении западной части или не развиты или имеют спорадическое распространение со средней мощностью 200–400 м. Наибольшие мощности (1000–1100 м) установлены в восточной части разломной зоны, где даже в активной части разлома отчетливо проявлены участки распространения осадочного чехла.

Хребет SP2-3_E_RI. Прилегающая к рифту часть хребта представляет собой горный массив с глубинами 2800 м. Доминантой в рельефе являются крупные горы северо-западного простирания. Минимальные отметки глубин приближаются к 2000 м. Хребет имеет крутые склоны (местами до 20°). Восточнее хребет становится ниже и шире, распадается на несколько подводных гор и исчезает в районе 25° з.д. Здесь преобладают пологие поверхности (менее 5°), которые совпадают с областью развития осадочного чехла (рис. 7), мощность которого достигает 600 м. Севернее выделяется невысокий короткий хребет с пологими склонами (порядка 5°).

Хребет SP3-4_W_RI на всем своем протяжении практически лишен осадочного чехла (рис. 7) и состоит из двух различно построенных частей. Западная, примерно до долготы 25°55′ з.д., имеет сравнительно выровненную вершинную поверхность с глубинами до 2600 м. В среднем абсолютная высота хребта составляет 1500 м и уклоны поверхности склонов изменяются от 3 до 10°, однако местами этот параметр увеличивается до 15° или даже до 30° (рис. 6). В наиболее приподнятой части хребта прослеживается зона горизонтальных площадок с углами от 1,5 до 3°, которая может быть интерпретирована как зона нарушений. В плане она имеет эшелонированный характер со смещениями в 3–4 км. К этим зонам приурочены уступы северо-западного простирания, что позволяет предполагать существование разломных зон соответствующего простирания, видимо, сдвигового характера. Хребет имеет склоны в среднем от 3 до 12°. Крутизна склонов не зависит от расположения хребта по отношению к активным или пассивным частям трансформных разломов. Как на северном, так и на южном склонах расположены площадки с субгоризонтальными поверхностями, разделенными крутыми уступами (12–15°). Протяженность некоторых превышает 15 км, при ширине до 3 км. К сожалению, район не был опробован драгировками, и в настоящий момент невозможно сопоставить зависимость крутизны склонов от вещественного состава пород. Описанная часть хребта наиболее сейсмична.

Восточная часть хребта имеет существенно иное строение. Ее глубина составляет в среднем 3500 м. На этом фоне здесь располагаются многочисленные горы (относительной высотой более 1000 м) и холмы (200–400 м) различной ориентировки. Рельеф напоминает области развития серпентинитового меланжа на суше. Здесь были получены две успешные драгировки (рис. 11) и проведены погружения подводной лодки. Драгировка во время 7-го рейса НИС “Академик Николай Страхов"(S0732D) принесла серпентинизированные гарцбургиты и измененные базальты, во время 22-го рейса (S2227D) – талькиты, перидотиты и габбро. Погружения в районе нодальной впадины показали, что здесь развит широкий спектр пород от базальтов до серпентинизированных

гипербазитов (персональное сообщение Р. Экиньяна). Эта область асейсмична. Таким образом, комплексное сопоставление различных данных показывает, что межразломный хребет по своему простиранию имеет существенно разное строение, что может свидетельствовать о принципиальных изменениях геодинамики всего региона во времени.

Рифтовая зона SP3-4_RI (25°25′ з.д.) представляет собой узкое (местами до 2 км) и короткое (10–12 км) ущелье с симметричными склонами, вдоль оси которого протягивается полоса плоскодонных впадин. Углы наклонов склонов рифтовой долины составляют 5–8°, однако по мере удаления от оси становятся круче – местами до 30°. Внутри рифтовой долины были проведены драгировки и погружения французского подводного аппарата, которые показали широкое развитие базальтов со свежими стеклами (персональное сообщение Р. Экиньяна). Стенки слагаются широким спектром пород океанической коры с большим количеством в разной степени серпентинизированных ультрабазитов. На севере рифтовое ущелье переходит в обширную нодальную впадину, крутизна склонов которой составляет 12–15°, однако здесь имеются как участки с более крутыми углами, так и субгоризонтальные площадки (например, на северном склоне). Впадина имеет треугольную форму и вытянута вдоль разлома **SP3**. К юго-востоку нодальная впадина отсутствует, но небольшая, заполненная осадками депрессия лежит у юго-западного окончания рифта. На продолжении рифтовой долины находится уступ высотой 100–150 м. Он протягивается через разлом **SP3** и продолжается искривленной узкой долиной. В месте пересечения располагается небольшое углубление. Несколько южнее обращает на себя внимание крупная гора с плоской вершиной, которая имеет пологий северо-западный склон и крутые склоны у вершины. Здесь была проведена драгировка с судна “Роберт Конрад"[*Schilling et al.,* 1995], которая принесла базальты со свежими стеклами. Общий вид горы и поднятые породы позволяют предполагать, что практически на продолжении рифтовой зоны **SP2-3_RI** расположено крупное вулканическое сооружение. Этому предположению не противоречат крупные положительные аномалии Буге (рис. 9б).

Хребет SP3-4_E_RI на всем своем протяжении почти не покрыт осадочным чехлом (рис. 7). Непосредственно восточнее рифтовой долины **SP2-3_RI** он представляет массив со столообразной вершинной поверхностью, строение которой осложняется несколькими холмами и понижениями дна. Хребет имеет склоны в среднем от 3 до 12°, однако местами этот параметр увеличивается до 15°, а в отдельных местах до 30°.

Трог SP4 представляет собой депрессию акустического фундамента, которая западнее рифтовой долины заполнена осадочным чехлом с мощностью до 400–500 м (в самой западной части – до 800 м). Дно трога расположено в среднем на глубине 4000 м. Батиметрическая карта с сечением рельефа 10 м показывает, что на дне чередуются вытянутые, нередко изогнутые в плане впадины, разделенные порогами или уступами в рельефе. Глубина в отдельных впадинах может возрастать до 4100–4150 м. В троге располагается также несколько холмов изометричной формы. Из них два, наиболее выраженных, имеют разное строение. Один представляет собой конусообразное образование с превышением около 100 м, другой – двухвершинное сооружение на едином цоколе. Общая высота более 200 м. Углы наклонов склонов достигают иногда 10°. Характерно, что как и в разломе **SP4** отчетливо выделяется несколько порогов, которые полностью перегораживают желоб (рис. 5). Их абсолютная высота достигает 100 м. Восточная часть трога, совпадающая с активной частью разлома, представляет собой желоб с крутыми склонами (до 45°). Здесь осадочный чехол практически не отмечен.

Рифтовая зона SP4-5_RI (25° з.д.) имеет протяженность в пределах изученной территории – 34 км и ширину в северной части около 4 км. Дно расположено на глубинах 4050–4100 м. Вдоль оси рифта располагаются впадины с дном, уклоны которого составляют от 0 до 3°. В южном направлении, после уступа, происходит резкое расширение рифтовой долины до 13 км. Для южного сегмента характерен сложный рельеф – здесь расположен ряд поднятий, вытянутых в субмеридиональном направлении. Они имеют в плане сложную конфигурацию и горизонтальные вершинные поверхности. В районе порога, наклоны которого достигают 15°, находится изометричное поднятие, с диаметром основания порядка 3-х км и высотой около 300 м, которое представляет собой, вероятнее всего, вулканическое сооружение центрального типа. Оно имеет склоны с углами 12–15° и плоскую вершину.

Помимо основных описанных структур в пределах полигона устанавливаются северная и южная границы разломов. Они захвачены съемкой фрагментарно. Наиболее южный трог представляет собой депрессию акустического фундамента, которая заполнена осадочным чехлом с мощностью до 400–500 м. Дно трога расположено на глубине 4000 м. Батиметрическая карта с сечением рельефа 10 м показывает, что оно представляет собой чередование вытянутых, нередко изогнутых в плане впадин, разделенных порогами или уступами, здесь же располагается несколько холмов изометричной формы. Судя по спутниковой альтиметрии (рис. 9а), они представляют собой сложно построенные участки дна. В рельефе южная грани-

ца представляет собой приподнятое “плато"с крутыми склонами, осложненным рядом долин субмеридионального простирания. На севере развиты крупные горы или хребты с чрезвычайно крутыми склонами. Гора Белоусова (северо-восточная часть полигона) представлена отрицательной аномалией, что свидетельствует о низкой плотности слагающих ее пород. Это говорит о том, что она может быть сложена либо серпентинизированными массами, либо пористыми (следовательно, малоплотными) вулканитами. Это предположение подтверждается драгировками с НИС “Академик Борис Петров"(BP1701–BP170)3, которые подняли серпентинизированные гипербазиты, брекчии и базальты. Гора представляет, по данным альтиметрии, собой наиболее западную часть протяженного хребта.

По самому северу разломной зоны протягивается зона интенсивного осадконакопления **(SP1_FZ)**, которой соответствует субгоризонтальное дно. Под осадочным чехлом располагается глубокая депрессия в акустическом фундаменте с широким и плоским дном (рис. 8).

Сейсмичность активной части разломной зоны Сан-Паулу

В районе с 1950 по 1997 гг. зафиксировано 55 землетрясений с магнитудами от 3,0 до 6,7 [*CNSS...,* 1997]. Число событий, принадлежащих к подкоровой категории (13–35 км) – 23, а число событий коровой категории (0–13 км) – 32. Совмещение этих данных с рельефом (рис. 10) показало, что в пределах рифтовых зон установлено только три землетрясения по одному на каждую рифтовую долину. Более того, в рифте на 26°25′ з.д. очаг располагается в северной части долины, практически в пределах желоба. В рифте на 25°30′ з.д. – самой южной части на западном борту. И только в рифте на 25° з.д. очаг располагается внутри долины. Его проекция расположена на поперечном пороге, который разделяет рифтовую долину на северный и южный сегменты. Землетрясения происходили в 1969, 1975, 1976 гг. и их магнитуды составляют соответственно 4, 5, 5, а глубина 33, 10, 33 км. В активных частях разломов землетрясения (3) с глубинами 10 км установлены только между первым и вторым рифтом (1986, 1996, 1997), их магнитуды составляют 5, 4, 4.

В пределах полигона зафиксировано также 15 событий, для которых произведен расчет параметров механизма очага, помещенных в каталог Гарвардского университета (США) [*Harvard University...,* 1997]. Анализ механизмов (рис. 10.) показывает, что в рифтовой зоне существуют дислокации типа “сброс", а вдоль разломных трогов – дислокации типа “сдвиг", но в отличии от трансформных разломов, где вектор сдвига по плоскости срыва направлен вдоль разлома, в пределах данного полигона наблюдается наличие сдвигов, у которых вектор направлен в субмеридианальном направлении. Это свидетельствует о наличии сильной субмеридианальной компоненты коровых напряжений, реализация которых в виде разрывных нарушений происходит по всем теоретически возможным направлениям сколов относительно ориентации напряжения.

Большая же часть землетрясений сосредоточена в юго-западной части полигона. При этом наиболее сейсмически активными являются зоны крутых склонов межразломных хребтов **SP3-4** и **SP2-3**. Зона **SP4Z** (западная пассивная часть) – асейсмична, при приближении к рифту – на расстоянии 30–40 км зафиксирован рой землетрясений. В западной пассивной части разлома **SP3_FZ** землетрясения с магнитудами 5 приурочены к наиболее погруженным частям желоба. Глубина очагов на западе составляет 33 км, на востоке – 10 км.

Обсуждение

Представленный материал показывает, что в результате компьютерной обработки данных, полученных 12 лет назад, возможно вовлечение в геологический анализ огромного объема новой информации, которая позволяет, во многом по-новому, рассматривать строение активной части разлома Сан-Паулу.

Здесь установлено несколько тектонических зон, имеющих различное строение: рифтовые зоны и активные части разломов, обрамление (рама) разломной зоны и зона с интенсивным развитием осадочного чехла, которая претерпела несколько фаз деформаций. Помимо этого, есть и наложенные структуры – вулканические сооружения.

В пределах рифтовых зон и активных частей разломов практически отсутствует осадочный чехол, доминирует горный рельеф, углы наклонов склонов превышают 20°. Все рифтовые зоны имеют различия в строении и в характере их сочленения с разломами. Две рифтовых зоны **(SP2-3_RI и SP3-4_RI)** расположены внутри разломной системы Сан-Паулу, а **SP4-5_RI** развивается в области перехода от полиразломной системы к обрамлению. Первая имеет все основные элементы классического океанского рифта – асимметричные склоны, хорошо выраженное дно рифтовой долины, над которым возвышается неовулканический хребет. Хребет проникает в пределы северной нодальной впадины, что может свидетельствовать об активном продвижении области растяжения в пределы активной части разлома **SP2_FZ**. Северная часть рифтовой долины нарушена серией разломов северо-восточного простирания.

На юге неовулканический хребет отклоняется в западном направлении – т.е. в сторону пассивной части разлома. Южная нодальная впадина разделена порогом на две смещенных относительно друг друга ячейки, что не противоречит существованию разломной зоны северо-западного простирания со сдвиговой компонентой. Рифтовая долина **SP3-4_RI** имеет пологие симметричные склоны и узкое днище. На севере развита крупная нодальная впадина треугольной формы, на юге – прослеживается уступ в рельефе, который не только пересекает разломный трог, но и смещает все элементы рельефа по правилам левого сдвига. Рифтовая зона **SP4-SP5_RI** состоит из двух сегментов и усложнение рельефа происходит в сторону рамы разлома. Ряд внутририфтовых хребтов и вулканические постройки свидетельствуют о том, что этот тектонический элемент активно развивается. Нодальная впадина на стыке рифт-разлом не обнаружена.

Зона с интенсивным развитием осадочного чехла расположена севернее $1°10'$ с.ш. Помимо этого к ней можно отнести всю восточную пассивную часть разлома **SP2_FZ**. Вся область представляет собой сочетание аккумулятивных осадочных тел и реликтового или новообразованного рельефа. В целом, она располагается внутри разломной зоны Сан-Паулу. Анализ 23 сейсмических профилей НСП показал, что здесь широко представлены деформации осадков разных типов и возраста. Изменение амплитуды деформаций осадков в западном направлении от формирования уступа до образования флексур и моноклиналей может свидетельствовать о продвижении хребта в восточном направлении. Причины этого необычного явления могут быть различными, но наиболее вероятной представляется резкие подъемы океанского дна в районе скал Св. Петра и Павла, которые расположены северо-западнее полигона.

Таким образом, исследованный район представляется областью повышенной тектонической активности, которая выходит за рамки простого растяжения в рифтовых зонах и сдиговых смещений вдоль активных зон трансформных разломов. Обращает на себя внимание, что помимо субширотных форм рельефа в изученном районе отчетливо выражены простирания форм рельефа северо-западного направления (удлинения подводных гор, ориентировка долин, распределние зон осадконакопления). Наиболее вероятным объяснением может быть система правых сдвигов соответствующего простирания. Этому же не противоречит существование субмеридиональных векторов сдвига (рис. 10). Эти разрывы контролируют распределение мощностей осадочного чехла, особенно в районах депоцентров (600–1100 м), что может свидетельствовать о достаточно древнем возрасте заложения.

Во-вторых, в районе происходило формирование крупных вулканических построек. Две из них расположены на простирании рифтовых долин. Этот тезис доказывается как данными по аномалиям гравитационного поля, так, в ряде случаев, драгировками.

В целом вся работа показала, что после переноса информации с бумажного носителя в цифровой формат в сочетание с ресурсами Интернет и данными опробования глубоководной части океана, формируется абсолютно новый массив данных, которые подвержены принципиально новой обработке, а, впоследствии, и могут приводить к неожиданным выводам. Проведенное исследование позволяет сделать шаг в сторону создания ГИС-системы, позволяющей оперативно анализировать строение данного региона, и определяет основные принципы работы в этом направлении для всей Атлантики.

Благодарность. Работа выполнена в рамках подпрограммы “Исследование природы Мирового океана"ФЦП “Мировой океан", реализуемой Минпромнауки России.

Литература

Агапова Г. В., Особенности морфологии межрифтовой зоны разлома Сан-Паулу (экваториальная Атлантика), *Океанология, 33,* (1), 107–112, 1993.

Экваториальный сегмент Срединно-Атлантического хребта, Приложение к монографии “Экваториальный сегмент Срединно-Атлантического хребта", 33 с., “Картография", МОК ЮНЕСКО, ГЕОХИ РАН: АТКАР ПКО, 1997.

CNSS Earthquake Composite Catalog, June 1997, (http://quake.geo.berkeley.edu/cnss/).

Gorini M. A., The tectonic fabric of the Equatortal Atlantic and adjoining contintntal margins: Grlf of Guinea to northeastern Brazil, *Serie Projecto,* (9), 111 p., 1981.

Harvard University Centroid-Moment Tensor Catalog, December 1997, (http://www.seismology.harvard.edu/CMTsearch.html).

Marine Trackline Geophysical Data CD, NOAA Product # G01321-CDR-A0001.

Sandwell D. T. and Smith W. H. F., Marine Gravity Anomaly from Geosat and ERS-1 Satellite Altymetry, *J. Geophys. Res., 102,* (B5), 10,039–10,054, 1997.

Smith W. H. F. and Sandwell D. T., Global Seafloor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings, *Science, 277,* (5334), Sept. 26, 1997.

Schilling J.-G., Ruppel C., Devis A. N., McCully B., Tighe S. A., Kingsley R. M. and Lin J., Thermal structure of the mantle beneath the Equatorial Mid-Atlantic Ridge: Influence from the spatial Variation of dredged basalt Glass Compositions, *J. Geophys. Res., 100,* (B7), 10,057–10,076, 1995.

(Поступила в редакцию 9 апреля 2001.)