

УДК 551.243.8: 004.925.83

© Р.М. Новаков, М.Д. Сидоров, С.В. Паламарь

Р.М. Новаков, М.Д. Сидоров, С.В. Паламарь

РАЗРЫВНЫЕ НАРУШЕНИЯ В ЗОНЕ СОЧЛЕНЕНИЯ КАМЧАТСКОЙ И АЛЕУТСКОЙ ОСТРОВНЫХ ДУГ: ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ И ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА

Введение

Важнейшим аспектом геолого-геофизических исследований является установление пространственных соотношений геологических тел. В основном эти задачи решаются при создании различных карт и схем геологического содержания, в том числе с применением геоинформационных систем (ГИС). С учетом расширения возможностей вычислительной техники на современном этапе необходимы новые подходы к геологическому картированию и визуализации результатов региональных геолого-геофизических исследований. Одним из путей может служить создание трехмерных моделей геологического строения обширных территорий с использованием ГИС.

3D-модели создаются при помощи преимущественно зарубежных специализированных пакетов программ (DataMine, Micromime, Gemcom Surpac, IRAP RMS, Petrel, 3D GeoModeller, Oasis Montage и других). Из отечественных систем с возможностями трехмерного моделирования можно назвать ГИС ИНТЕГРО. Трехмерное моделирование уже прочно вошло в практику геологоразведочных работ для ограниченных по площади участков отдельных месторождений и рудных полей, нефтяных и газовых залежей. При региональных исследованиях применяются средства визуализации и методы создания 3D-моделей глубинного строения по данным сейсмотомографии и материалам каталогов гипоцентров землетрясений [1, 37], в том числе с использованием виртуальных глобусов [5]. На базе ГИС ИНТЕГРО ГЕОФИЗИКА разрабатываются и реализуются методы комплексной интерпретации региональной геофизической информации, в том числе обеспечивающие исследование трехмерного распределения физических параметров среды [7]. В качестве примеров 3D-моделей обширных территорий, созданных на основе комплексных геолого-геофизических данных, можно привести модель строения Енисейского кряжа [30], горных

массивов Пиренеи [40] и Гарц [36]. На отдельные ограниченные участки земной коры на Камчатке в настоящее время построены трехмерные модели по результатам микросейсмического зондирования [22] и плотностные – по результатам интерпретации гравитационного поля [26].

В отличие от традиционного картографирования, трехмерное моделирование более трудоемко и предъявляет особые требования к увязке имеющегося фактического материала. В то же время, построение трехмерных моделей в ходе региональных исследований позволяет лучше согласовать имеющиеся геолого-геофизические данные и с большей объективностью представить особенности геологического строения.

Трехмерная модель

Для трехмерного моделирования выбрана территория между $56^{\circ}00'$ – $58^{\circ}00'$ северной широты и $160^{\circ}00'$ – $164^{\circ}00'$ восточной долготы, которая охватывает зону сочленения Камчатской и Алеутской островных дуг. Трехмерная модель разрывных нарушений выполнена в программных комплексах Oasis montage и ArcGIS и представлена в виде блок-диаграммы (рис. 1), где плоскости сместителей отдельных разломов отображены набором сочленяющихся в пространстве треугольников. Дополнительно построены карты-срезы на горизонтах 10, 20, 30, 40, 50, и 70 км. Смоделированы сейсмофокальная зона и 52 разлома, каждому из которых присвоен уникальный номер. Главные направления разломов (рис. 1) образуют три системы: северо-восточную (субмеридиональную), северо-западную и восток-север-восточную (субширотную). Структуры ранжированы по значимости. В качестве объектов первого порядка выделены сейсмофокальная зона, разломы № 33 (Зона Стеллера), № 37 (Воямпольский разлом) и № 38, движения по которым определили существующую картину разрывных нарушений района (рис. 1). В ранге структур второго порядка

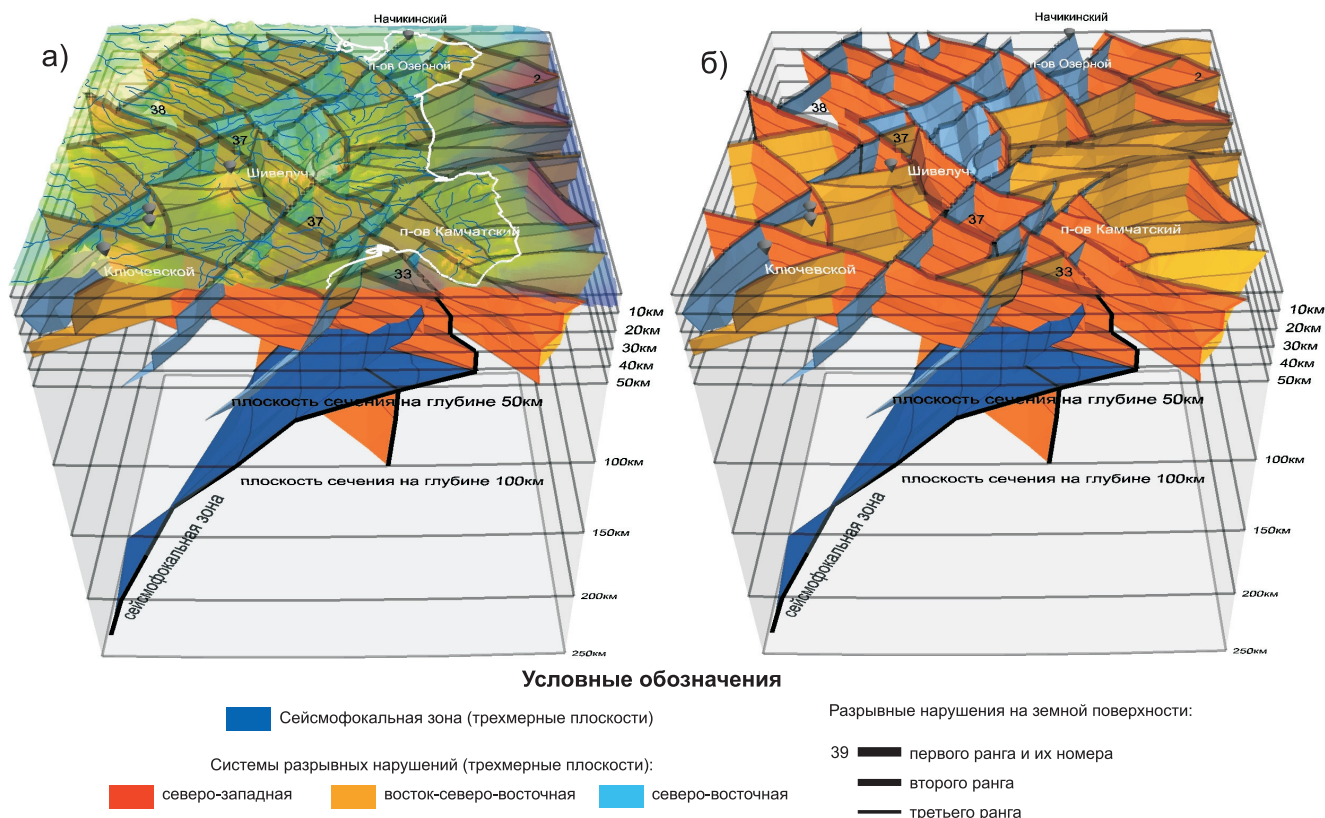


Рис. 1. Блок-диаграммы исследуемой территории с плоскостями сейсмофокальной зоны и сместителей разрывных нарушений: а) с поверхностью рельефа (вертикальный масштаб увеличен в три раза, поверхность поднята на 3 км); б) без поверхности рельефа. Изображения сформированы с использованием ArcScene

рассматриваются разломы, ограничивающие крупные блоки земной коры, выделяемые по геолого-геофизическим данным. Прочие разрывы отнесены к нарушениям третьего порядка.

В качестве основы для построения разрывных нарушений в пространстве (рис. 1) послужили генерализованные и обобщенные разломы, выявленные геологическими съемками масштаба 1:200 000 М.Е. Бояриновой и др. [6], В.М. Гундобина [9], Е.В. Дарагана [10], А.Ф. Литвинова [16], Л.И. Махиной и Е.Н. Савочкиной [17], Н.А. Пилипчука и В.С. Успенского [18, 19], В.С. Шеймовича [33], Б.И. Сляднева [29], а также В.М. Гундобина и В.И. Голякова, Л.В. Заботкина и Ю.Ф. Найденкова (производственные отчеты в Камчатском филиале федерального бюджетного учреждения «ТФГИ по Дальневосточному федеральному округу»).

Большая часть разломов отражена на мелко-масштабных картах [12, 27, 28] и в ГИС-атласе карт геологического содержания Камчатской области и Корякского АО (электронные материалы в Камчатском филиале федерального бюджетного учреждения «ТФГИ по Дальневосточному федеральному округу»).

Дополнительно проведен анализ сведений о разломах из публикаций С.Е. Апрелькова [2], Г.П. Авдейко [1], А.И. Кожурина [38, 39], М.К. Бахтеева [4], М.Н. Шапиро [32], В.П. Зинкевича [11],

Б.В. Баранова [3, 35], Д.В. Алексеева [34], С.А. Федотова и др. [31]. Для прибрежной части территории использованы разломы, выделенные Н.И. Селиверстовым в результате обобщения фактического материала морских геолого-геофизических исследований Камчатско-Командорского региона [23, 24, 25]. В ходе исследований привлекались материалы региональных геофизических съемок, результаты дешифрирования морфологии рельефа.

Размещение разрывных нарушений внутри коры основано на данных о положении гипоцентров землетрясений [8, 13] и уточнялось по объемной плотностной модели [26], (рис. 2). Кроме того, учтены результаты интерпретации разрезов МОВЗ и МТЗ, выполненные А.Г. Нурмухамедовым и др. (производственный отчет в Камчатском филиале федерального бюджетного учреждения «ТФГИ по Дальневосточному федеральному округу»), данные сейсмотомографии [7], а также сведения о падении разломов по материалам геологических съемок и работ отдельных исследователей.

Структура ГИС

Для удобства представления результатов исследований, хранения атрибутивной информации трехмерная модель разрывных нарушений представлена в виде слоев, объединенных в ГИС-проект

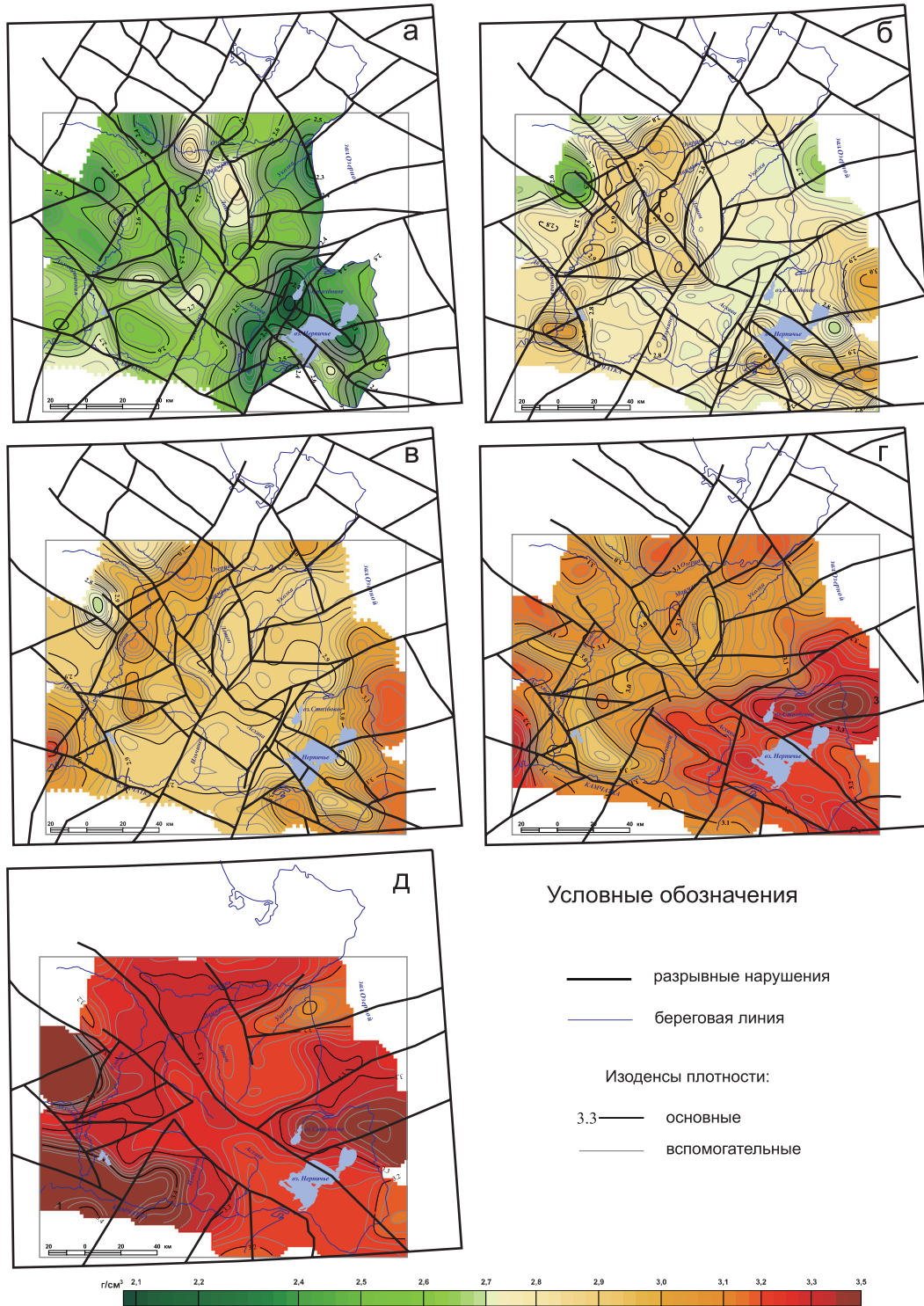


Рис. 2. Совмещенные срезы 3D-моделей – плотностной и разрывных нарушений – на различных глубинах под уровнем моря (км): 0 (а), 10 (б), 20 (в), 30 (г), 45 (д)

в формате ArcGIS 10.0. Тематические слои помещены в персональную базу геоданных (БД) ALKAM.mdb, скомпонованы и оформлены для просмотра в виде карт и 3D-сцен. Все покрытия выполнены в системе UTM, зона 57, WGS 84. Детальность модели соответствует масштабу 1:500 000 – 1:1 000 000.

В БД слои и таблицы объединены по тематике в четыре группы (табл. 1). Первая содержит объекты

топографии местности, вторая – вспомогательные слои с геофизическими и геоморфологическими данными, третья – слои с разрывными нарушениями, четвертая – таблицы с дополнительной информацией по разломам. Вспомогательные слои с топографическими, геофизическими и геоморфологическими данными содержат необходимые атрибутивные таблицы и предназначены для понятного представления

разработанной модели разломов, ее сопоставления с имеющимися результатами исследований глубинного строения территории. Характеристики пространственного положения разрывных нарушений включают слои, содержащие трехмерные плоскости их сместителей (tektp_3D), линии разломов на земной поверхности (tektp) и также слои-сечения системы разрывных нарушений на различных глубинах (tektp_10_km и др., табл. 1).

Отдельные таблицы и слои, характеризующие разрывные нарушения, связаны отношениями (рис. 2), что позволяет формировать SQL-запросы средствами MS Access или ArcGIS для получения различных комбинаций данных. Основные семантические данные, касающиеся разломов, содержатся в таблице RATIONALE и слое tektp. Главная таблица – RATIONALE, прочие слои, характеризующие пространственное положение разломов, связаны с ней по ключевому полю ID (уникальному номеру разлома) как один-ко-многим. Сведения в таблице RATIONALE (табл. 2) включают уникальные номера разрывных нарушений, комментарии, а также информацию по фактическому обоснованию положения разломов по геологическим, геоморфологическим и геофизическим данным. Атрибутивная таблица слоя tektp содержит данные, характеризующие особенности отдельных фрагментов каждого разлома (табл. 3): их расположение (суша или акватория), принадлежность к определенной системе, характеристику морфо-кинетических особенностей и ранг, азимут и угол падения сместителя, глубину заложения, активность. Названия разрывных нарушений также приведены в таблице tektp, поскольку нередко разные фрагменты одного разлома имеют разные собственные наименования.

Классификация разрывных нарушений по морфо-кинетическим характеристикам проведена по данным геологосъемочных работ и специализированных исследований голоценовых морских аккумулятивных террас [3, 15, 20, 21]. Характеристика активности разломов дана с использованием результатов исследований Г.П. Авдейко [1], Е.И. Гордеева [8], А.И. Кожурина [13, 38], Т. К. Пинегиной [20].

Атрибутивные таблицы других слоев с трехмерным изображением и срезами разрывных нарушений на различных глубинах включают только номера разломов, совпадающие с номером в таблице RATIONALE (поле ID) и соединены с ним по этому полю (рис 3). БД также содержит три таблицы с дополнительными сведениями о разрывных нарушениях, связанные с атрибутами слоя tektp (рис. 3). LEGEND_PUBL включает характеристики отдельных фрагментов разрывных нарушений по данным различных авторов (табл. 4). Две другие являются таблицами-справочниками. PUBL представляет собой список

журнальных публикаций, которые, помимо данных геологосъемочных работ, были использованы для уточнения расположения и особенностей разломов. LEGEND содержит данные по морфо-кинетическим характеристикам разрывных нарушений.

Заключение

На основе анализа геологических, геофизических и геоморфологических данных создана трехмерная модель разрывных нарушений района сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Модель представлена в виде карты разрывных нарушений на поверхности рельефа, слоев-срезов на глубинах 10, 20, 30, 40, 50 и 70 км и 3D-плоскостей сместителей разломов. Отдельные таблицы и слои в базе геоданных, характеризующие разрывные нарушения, связаны отношениями. Это позволяет формировать SQL-запросы средствами MS Access или ArcGIS для получения различных комбинаций данных.

Представленная геоинформационная система обеспечит доступ к геолого-геофизической информации для последующих исследований этой территории. После публикации настоящей статьи электронная версия представленной ГИС будет доступна на сайте НИГТЦ ДВО РАН в форме архива, содержащего файлы персональной базы геоданных, карт и 3D-сцен. Также в архив помещены слои пространственных объектов в обменных форматах (шейп-файлы и таблицы dBase). Исследования поддерживаются грантом ДВО РАН (проект 12-III-A-08-043).

Ключевые слова: 3D-модель, разломы, сейсмофокальная зона, Камчатская островная дуга, Алеутская островная дуга.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдейко Г.П., Палуева А.А., Лепиньч С.В. Сейсмо-активные тектонические структуры зоны субдукции под Восточную Камчатку // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2004. – № 3. – С. 18-35.
2. Апрельков С.Е., Попруженко С.В. Пенжинско-Западно-Камчатская складчатая зона и Укэлят-Срединный блок в структуре Корякского нагорья и Камчатки // Тихоокеанская геология. – 2009. – Т. 28. – № 4. – С. 90-04.
3. Баранов Б.В., Гедике К., Фрейтаг Р., Дозорова К.А. Активные разломы юго-восточной части Камчатского полуострова и Командорская зона сдвига // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. – 2010. – № 2. – Выпуск № 16. – С. 66-77.
4. Бахтеев М.К., Морозов О.А., Тихомирова С.Р. О парагенезисе позднекайнозойских структур зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 1992. – № 3. – С. 18-25.

Таблица 1

Слой и таблицы ГИС в файле ALKAM.mdb

Наименование слоя или таблицы	Тип слоя	Описание	Количество объектов в слое или записей в таблице	Примечания
phusl_dd	Слой линейных объектов	Изолинии рельефа	3109	Вспомогательные слои с топографическими данными
potal	Слой линейных объектов	Береговая линия	7	
rivers	Слой линейных объектов	Водотоки	751	
lakes	Слой полигональных объектов	Озера	133	
hypsp	Слой точечных объектов	Высоты	3	
contour	Слой линейных объектов	Границы исследуемой территория	1	
grav	Слой полигональных объектов	Гравитационное поле	50	Вспомогательные слои с геофизическими и геоморфологическими данными
power_down	Слой линейных объектов	Мощность нижней коры	60	
power_konsol	Слой линейных объектов	Мощность консолидированной коры	43	
power_up	Слой линейных объектов	Мощность верхней коры	29	
power_down_fon	Слой полигональных объектов	Мощность нижней коры (фон)	29	
power_konsol_fon	Слой полигональных объектов	Мощность консолидированной коры (фон)	29	
power_up_fon	Слой полигональных объектов	Мощность верхней коры (фон)	23	
kf_bzl	Слой полигональных объектов	Коэффициент базальтоидности коры	10	
voxel_seis	Слой точечных объектов	Воксельная модель сейсмической активности	654012	
region_seis	Слой полигональных объектов	Область повышенной сейсмической активности	1	
ring	Слой линейных объектов	Кольцевые структуры	2	

Наименование слоя или таблицы	Тип слоя	Описание	Количество объектов в слое или записей в таблице	Примечания
tektp	Слой линейных объектов	Положение разрывных нарушений на земной поверхности	113	Слой с данными по положению разрывных нарушений в пространстве
tektp_3D	Слой трехмерных полигональных объектов	Положение разрывных нарушений в пространстве	3305	
tektp_10_km	Слой линейных объектов	Положение разрывных нарушений на глубине 10 км	62	
tektp_20_km	Слой линейных объектов	Положение разрывных нарушений на глубине 20 км	57	
tektp_30_km	Слой линейных объектов	Положение разрывных нарушений на глубине 30 км	43	
tektp_40_km	Слой линейных объектов	Положение разрывных нарушений на глубине 40 км	33	
tektp_50_km	Слой линейных объектов	Положение разрывных нарушений на глубине 50 км	21	
tektp_70_km	Слой линейных объектов	Положение разрывных нарушений на глубине 70 км	3	
nadvig	Слой линейных объектов	Пологие надвиги	121	
LEGEND	Таблица	Таблица-справочник, содержащая сведения о морфо-кинетических характеристиках разломов	21	Вспомогательные семантические таблицы и запросы
LEGEND_PUBL	Таблица	Характеристики фрагментов разрывных нарушений по данным различных авторов	293	
PUBL	Таблица	Список опубликованных материалов	67	
RATIONALE	Таблица	Обоснование положения разрывных нарушений	51	
MATH_PERCENTAGE	Запрос	Процент совпадений разрывных нарушений на земной поверхности с разломами на схемах других авторов		

Таблица 2

Структура таблицы «RATIONALE»

Имя	Тип	Размер	Примечание
CODE	Длинное целое	4	Счетчик
ID	Длинное целое	4	Номер разрывного нарушения
Geology	Текстовый	255	Выраженность разрывного нарушения по геологическим, геоморфологическим, геофизическим данным (в магнитном поле, в гравитационном поле, по данным интерпретации МОВЗ, МТЗ)
Geomorphology	Текстовый	255	
Magnetic_field	Текстовый	100	
Gravity_field	Текстовый	100	
ECWM_MT	Текстовый	100	
Seismic_activity	Текстовый	100	Сведения о сейсмической активности разрывного нарушения
Comments	ПолеМЕМО	–	Комментарии

Таблица 3

Структура атрибутивной таблицы слоя «tektp»

Имя	Тип	Размер	Примечание
OBJECTID	Длинное целое	4	Идентификатор фрагментов разрывных нарушений
Shape	Поле объекта OLE	–	
Shape_Length	Двойное с плавающей точкой	8	Длина фрагмента разрывного нарушения
ID	Двойное с плавающей точкой	8	Номер разрывного нарушения (рис. 1)
NAME	Текстовый	150	Название разрывного нарушения
L_CODE	Двойное с плавающей точкой	8	Код разрывного нарушения, в соответствии с которым оно обозначается на карте
RANG	Целое	2	Ранг разрывного нарушения
MORPH	Текстовый	50	Положение разрывного нарушения (суша или акватория)
BEARING	Текстовый	50	Система, к которой относится разрывное нарушение
DIP	Текстовый	30	Азимут и угол падения разрывного нарушения
DEPTH	Двойное с плавающей точкой	8	Глубина от поверхности, до которой прослеживается поверхность сместителя, м
AKTIV	Текстовый	20	Активность разрывного нарушения

Таблица 4

Структура таблицы «LEGEND_PUBL»

Имя	Тип	Размер	Примечание
OBJECTID	Длинное целое	4	Идентификатор фрагментов разрывных нарушений
Definition	Текстовый	150	Характеристика фрагмента разрывного нарушения по данным авторов различных публикаций
R_CODE	Длинное целое	4	Номер публикации по списку из таблицы PUBL

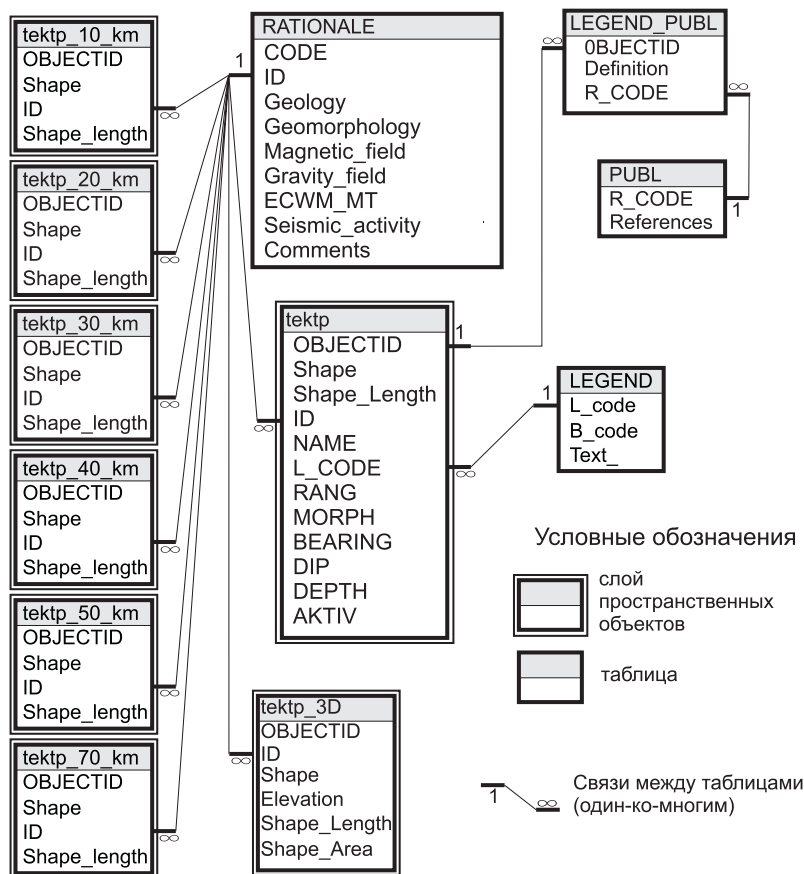


Рис. 3. Структура базы геоданных (файл ALKAM.mdb)

5. Бобков А.В., Леонов А.Е., Чебров В.Н. Визуализация сейсмических данных на виртуальном глобусе: мат-лы 22 Международной конференции по компьютерной графике. – М.: GraphiCon, 2012. – С. 163-168.

6. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Серия Восточно-Камчатская. Листы О-58-XXVI, XXXI, XXXII (издание второе) / Бояринова М.Е., Вешняков Н.А., Коркин А.Г., Савельев Д.П.; ред. Б.А. Марковский. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2007.

7. Галуев В.И. Технология построения физико-геологических моделей земной коры по региональным профилям // Геоинформатика. – 2008. – № 3. – С. 1-12.

8. Гордеев В.И., Гусев А.А., Левина В.И., Леонов В.Л., Чебров В.Н. Мелкофокусные землетрясения п-ова Камчатка // Вулканология и сейсмология. – 2006. – № 3. – С. 28-38.

9. Гундобин В.М. Геологическая карта СССР. Серия Западно-Камчатская. Лист О-57-XXXIII. Всесоюзное аэрогеологическое объединение «Аэрогеология» Мингео СССР, 1976.

10. Дараган Е.В. Геологическая карта СССР. Западно-Камчатская серия. Лист О-57-XXIX. Всесоюзное аэрогеологическое объединение «Аэрогеология» Мингео СССР, 1976.

11. Зинкевич В.П., Казимиров А.Д., Пейве А.А., Чураков Г.М. Новые данные о тектоническом строении

полуострова Камчатский Мыс (Восточная Камчатка): докл. АН СССР, 1985. – Т. 285. – № 4. – С. 954-958.

12. Карта полезных ископаемых Камчатской области масштаба 1:500 000 / гл. ред-ры: Литвинов А.Ф., Патока М.Г. (Камчатгеолком), Марковский Б.А. (ВСЕГЕИ). – Петропавловск-Камчатский: СПб. КФ ВСЕГЕИ, 1999.

13. Каталог гипоцентров землетрясений. КФ ГС РАН. – URL: <http://www.emsd.ru> (дата обращения: 14.02.2013).

14. Кожурин А.И. Активная геодинамика северо-западного сектора Тихоокеанского тектонического пояса (по данным изучения активных разломов): автореф. дисс. д.г-м.н. – М., 2013. – 46 с.

15. Кожурин А.И. Молодые сдвиги хр. Кумроч и полуострова Камчатский (Восточная Камчатка) // Тихоокеанская геология. – 1990. – № 6. – С. 45-55.

16. Литвинов А.Ф. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Серия Восточно-Камчатская. Лист О-58-XXIX, XX, 1989.

17. Махонина Л.И., Савочкина Е.Н. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Серия Западно-Камчатская. Лист О-57-XXVII, 1976.

18. Пилипчук Н.А., Успенский В.С. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Серия Восточно-Камчатская. Лист О-57-XXX. ФГУТП «КПСЭ», 2006.

19. Пилипчук Н.А., Успенский В.С. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Серия Восточно-Камчатская. Лист О-57-XXIV. ФГУГП «КПСЭ», 2008.
20. Пинегина Т.К., Кожурин А.И., Пономарева В.В. Оценка сейсмической и цунамиопасности для поселка Усть-Камчатск (Камчатка) по данным палеосейсмологических исследований // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2012. – № 1. – Выпуск № 19. – С. 138-159.
21. Пинегина Т.К., Кравчуновская Е.А., Ландер А.В., Кожурин А.И., Дж. Буржуа, Мартин Е.М. Голоценовые вертикальные движения побережья полуострова Камчатский (Камчатка) по данным изучения морских террас // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2010. – № 1. – Выпуск № 15. – С. 100-116.
22. Салтыков В.А., Горбатилов А.В., Степанова М.Ю. // Развитие модели глубинного строения средней части Толбачинского Дола : мат-лы конференции, посвященной Дню вуканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы», Петропавловск-Камчатский, 2013. – С. 212-218.
23. Селиверстов Н.И. Строение дна прикамчатских акваторий и геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. – М. : Изд-во «Научный Мир», 1998. – 250 с.
24. Селиверстов Н.И. Строение зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг по данным непрерывного сейсмического профилирования // Вулканология и сейсмология. – 1983. – № 2. – С. 53-67.
25. Селиверстов Н.И., Сугробов В.М., Яновский Ф.А. О геологическом строении и развитии Командорской котловины (по результатам геофизических исследований) // Вулканология и сейсмология. – 1995. – № 1. – С. 38-53.
26. Сидоров М.Д., Новаков Р.М. Плотностная модель зоны сочленения Камчатской и Алеутской островных дуг // Региональная геология и металлогения. – 2014. – № 58. – С. 59-65.
27. Сляднев Б.И., Боровцов А.К., Бурмаков Ю.А., Сидоренко В.И. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Корякско-Курильская. Лист О-57 – Палана. Объяснительная записка. – СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2013. – 256 с. + 9 вкл.
28. Сляднев Б.И., Боровцов А.К., Сидоренко В.И., Сапожникова Л.П. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Корякско-Курильская. Лист О-58 – Усть-Камчатск. Объяснительная записка. – СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2013. – 256 с. + 9 вкл.
29. Сляднев Б.И. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Серия Восточно-Камчатская. Лист О-58-XXV, XXVI (р. Уколка). – ПГО Камчатгеология, 1989.
30. Стерлигов Б.В. Разработка методики стохастического анализа комплекса геолого-геофизических данных для решения прогнозных задач на золото (на примере Енисейского кряжа) : автореф. дисс. к.г.-м.н. – М., 2010. – 132 с.
31. Федотов С.А., Жаринов Н.А., Гонтовая Л.И. Магматическая питающая система Ключевской группы вулканов (Камчатка) по данным об ее извержениях, землетрясениях, деформациях и глубинном строении // Вулканология и сейсмология. – 2010. – № 1. – С. 3-35.
32. Шапиро М.Н. Надвиг Гречишкина на побережье Камчатского залива // Геотектоника. – 1980. – № 3. – С. 102-110.
33. Шеймович В.С. Государственная геологическая карта СССР. Масштаб 1:200 000. Серия Западно-Камчатская. Лист О-57-XXXV (Ключи). – ПГО Камчатгеология, 1989.
34. Alexeiev Dmitriy V., Gaedicke Christoph, Tsukanov Nikolay V., Freitag Ralf. Collision of the Kronotskiy arc at the NE Eurasia margin and structural evolution of the Kamchatka-Aleutian junction // Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch), 2006.
35. Baranov B.V., Seliverstov N.I., Murav'ev A.V. and Muzurov E.L. The Komandorsky Basin as a product of spreading behind a transform plate boundary // Tectonophysics. – 1991. – Vol. 199. – Issues 2-4. – P. 237-269.
36. Gabriel G., Jahr T., Jentzsch G., Melzer J. Deep structure and evolution of the Harz Mountains: results of three-dimensional gravity and finite-element modeling // Tectonophysics. – 15 March 1997. – Vol. 270. – Issues 3-4. – P. 279-299.
37. Koulakov, E.I. Gordeev, N.L. Dobretsov, V.A. Vernikovskiy, S. Senyukov, A. Jakovlev, «Feeding paths of the Kluchevskoy volcano group (Kamchatka) from the results of local earthquake tomography». Geophys. Res. Lett. – 2011. – Vol. 38.
38. Kozhurin A.I. Active faulting at the Eurasian, North American and Pacific plates junction // Tectonophysics. – 2004. – Vol. 380. – P. 273-285.
39. Kozhurin A.I. (2007) Active Faulting in the Kamchatsky Peninsula, Kamchatka-Aleutian Junction // Eichelberger J, Gordeev E, Izbekov P, Lees J (eds). Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region. – American Geophysical Union, Washington, DC. – P. 263-282.
40. Vacher P., Souriau A. A three-dimensional model of the Pyrenean deep structure based on gravity modelling, seismic images and petrological constraints // Geophys. J. Int. – 2001. – Vol. 145. – P. 460-470.