

**ПРОСТОЙ АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ РАЗРЕЗОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
3D-МАССИВОВ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ  
(ЮГО-ВОСТОК РОССИИ)**

*В.А. Глаголев, А.М. Петрищевский*

*Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Шолом Алейхема 4,  
г. Биробиджан, 679016, e-mail: petris@stl.ru  
Поступила в редакцию 10 июня 2009 г.*

Разработан алгоритм, обеспечивающий автоматизированное построение карт-срезов и разрезов по дискретным значениям геолого-геофизических параметров, описываемых 3D-информационными массивами. Вводы и выходы данных осуществлены в стандартных форматах операционных систем Word, DOS и Surfer-8, что делает возможным его использование небольшими научно-техническими подразделениями при обработке геологической информации и интерпретации локальных ГИС. Приводятся примеры практической реализации алгоритма для изучения плотностных свойств земной коры и верхней мантии в Забайкалье и Сихотэ-Алине.

**Ключевые слова:** геoinформационные системы, алгоритм, гравитационное моделирование, Сихотэ-Алинь, Забайкалье, Юго-Восток России.

**ВВЕДЕНИЕ**

В последнее время на Дальнем Востоке России в региональных базах данных с геологической, геохимической и геодинамической информацией появляется все большее число массивов, отображающих свойства геологических сред в трехмерном пространстве (x, y, z). Чаще всего это электронная документация результатов разведки месторождений, сопровождаемая 3D-опробованием рудных полей [7], каталоги координат эпицентров и магнитуд землетрясений, реже – значения геофизических параметров, измеренные на разных глубинах или в разных частотных диапазонах пространственного спектра физических полей (сейсмотомография, электрические и магнитотеллурические зондирования). Выборки значений нужного параметра в нужном интервале глубин из 3D-массивов геолого-геофизической информации используются для построения горизонтальных срезов трехмерных моделей свойств геологических сред с помощью стандартных средств графического отображения цифровой информации, чаще всего – пакета Surfer.

Вместе с тем, часто возникает задача построения разрезов объемных ГИС-моделей, сводящаяся к составлению кросс-файла из совокупности горизон-

тальных срезов с последующей обработкой его стандартными графическими средствами. Использующиеся в России 3D-графические пакеты и пакеты программ обработки цифровой томографии (ArcGIS, 3D-Max, AutoCAD и др.) обычно обеспечены программами построения разрезов, однако эти программы поддерживаются только внутренними форматами и образами представления данных в конкретных ГИС, что делает невозможным их широкое использование при обработке трехмерных массивов информации в небольших научно-технических подразделениях по причине значительных затрат на приобретение и отладку громоздких СУБД-ГИС. По этой причине, вероятно, программное обеспечение для построения разрезов 3D-моделей ГИС отсутствует в большинстве территориальных фондов геолого-геофизической информации Дальнего Востока.

Нами разработан интерфейс, реализующий компьютерное построение разрезов 3D-моделей ГИС по произвольно выбранному направлению в заданном интервале глубин и использующий обычные форматы описания данных в Word, DOS и Surfer-8.

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ИНТЕРФЕЙСА**

Входным файлом на начальном этапе расчетной процедуры является цифровой массив  $M [j=1...4, i=$

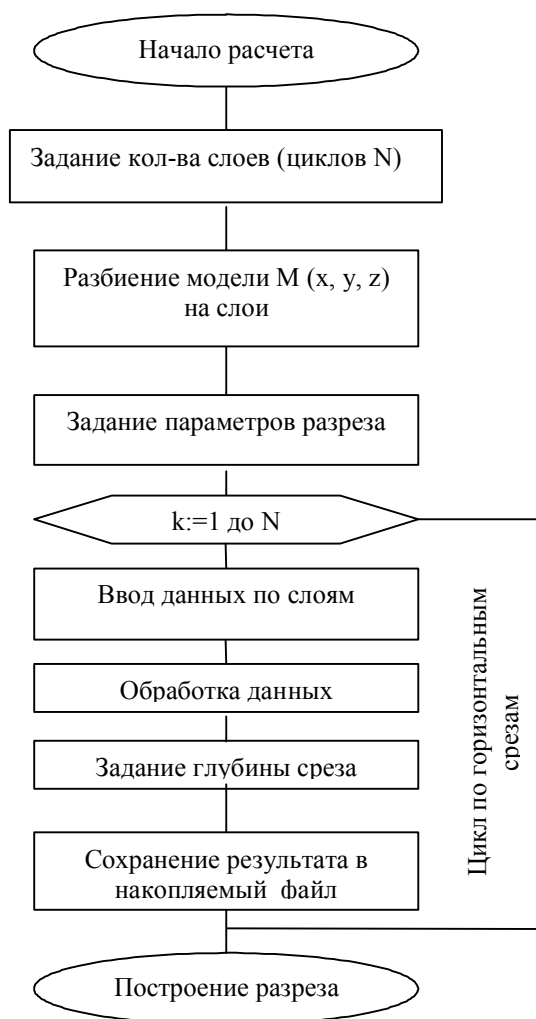


Рис. 1. Алгоритм рабочего интерфейса.

1.....n], где:  $j[1], j[2], j[3]$  – координаты  $(x, y, z)$  точек, в которых определены свойства среды  $j[4]$ ;  $n$  – число точек в массиве. Первая подпрограмма разбивает исходный массив  $M$  на подмассивы значений свойства среды в интервалах глубин от  $Z_1(k)$  до  $Z_2(k)$ . На выходе подпрограммы формируется  $k$ -набор 3-мерных массивов  $M(x, y, z_k = \text{const})$ , представляющих собой цифровые описания горизонтальных срезов исходной 3D-модели изучаемого свойства среды. Для отладки интерфейса использованы 3D-модели градиентов поверхностной плотности сферических источников гравитационных аномалий  $\mu_z(x, y, z = H_c)$ , эквивалентных плотностным неоднородностям компактного класса [9, 10]. В апробированных моделях  $H_c$  – поверхность, на которую выметаются массы слоя. В других случаях, когда  $M(x, y, z \neq \text{const})$ :  $z_k$  – глубина средней уровневой поверхности тонкого слоя  $(Z_2 - Z_1) / 2$ , к которой относятся значения параметра (магнитуд землетрясений, электрических

сопротивлений, температуры и др.) внутри слоя. Алгоритм интерфейса, реализованного в среде Turbo Delphi 2006 [2, 5, 14], приводится на рис. 1 и состоит из трех основных блоков: ввода (рис. 2-а), обработки (рис. 2б) и визуализации (рис. 2в) данных. Блок ввода загружает исходные данные, преобразует их в  $\text{grid}$ -файлы среды Surfer-8, затем конвертирует их в строковые массивы  $M(x, y)$  и передает цифровые описания пространственных распределений параметра в блоки обработки и визуализации. При открытии файла автоматически определяются границы и коэффициент масштабирования модели. Блок обработки данных производит определение значений моделируемого параметра в разрезе по координатам начала и конца профиля с заданным шагом с использованием строковых массивов, экспортируемых из среды Surfer-8.

Блок визуализации данных предназначен для графического отображения горизонтальных срезов объемной модели, графиков распределения параметра в текущем срезе и итогового разреза.

Программные модули рабочего интерфейса (рис. 1) состоят всего лишь из 400 операторов в среде Turbo Delphi простой конфигурации и занимают не более 100 МБ оперативной памяти. После формирования кросс-массива  $M(x, z)$  графическое отображение разреза получается с помощью стандартного пакета Surfer-8. Суммарное время на преобразование входных данных и построение разреза определяется длиной профиля и шагом интерполяции входных данных. В приводимых примерах (рис. 3–5) для компьютеров класса Pentium-IV оно составляет 15–20 минут.

#### ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРОСС-ИНТЕРФЕЙСА ДЛЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Разработанный программный продукт и технологическая схема построения разрезов 3D-моделей ГИС опробованы в районах Восточной Сибири и Дальнего Востока. Приводимые ниже разрезы (рис. 3, 5) представляют собой вертикальные сечения трехмерных моделей, описывающих распределения параметра  $\mu_z(x, y, H_c)$ , связанного с реологическими свойствами геологических сред. В жестких кристаллических средах этот параметр имеет большее значение, а в пластичных, вязких и частично расплавленных – меньшее [9, 10, 12]. Изучение распределений  $\mu_z$ -параметра в разрезах земной коры и верхней мантии используется с целью выявления и наглядного отображения особенностей пространственных взаимоотношений сред различной вязкости (или жесткости) и позволяет получить новую ин-

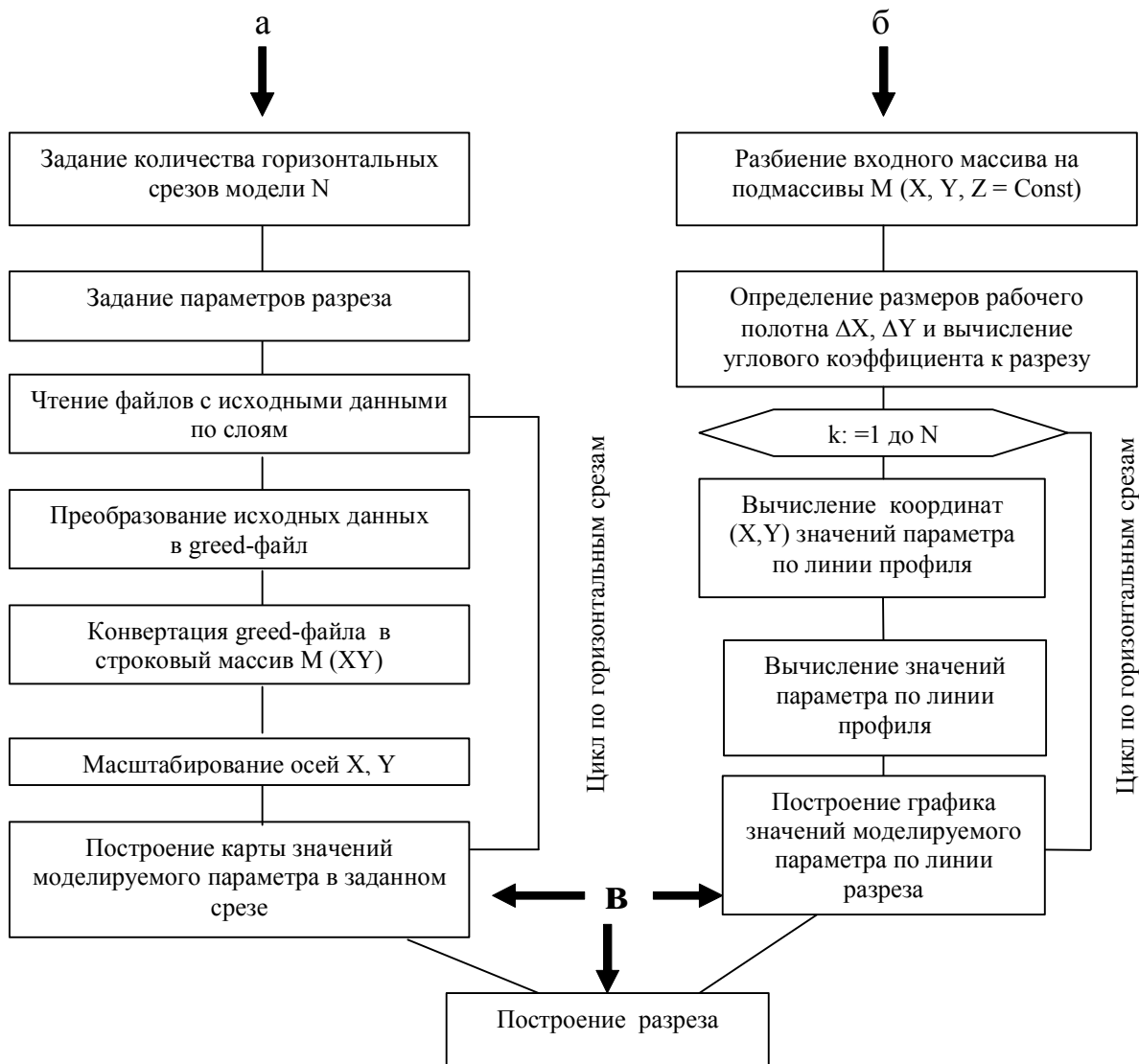


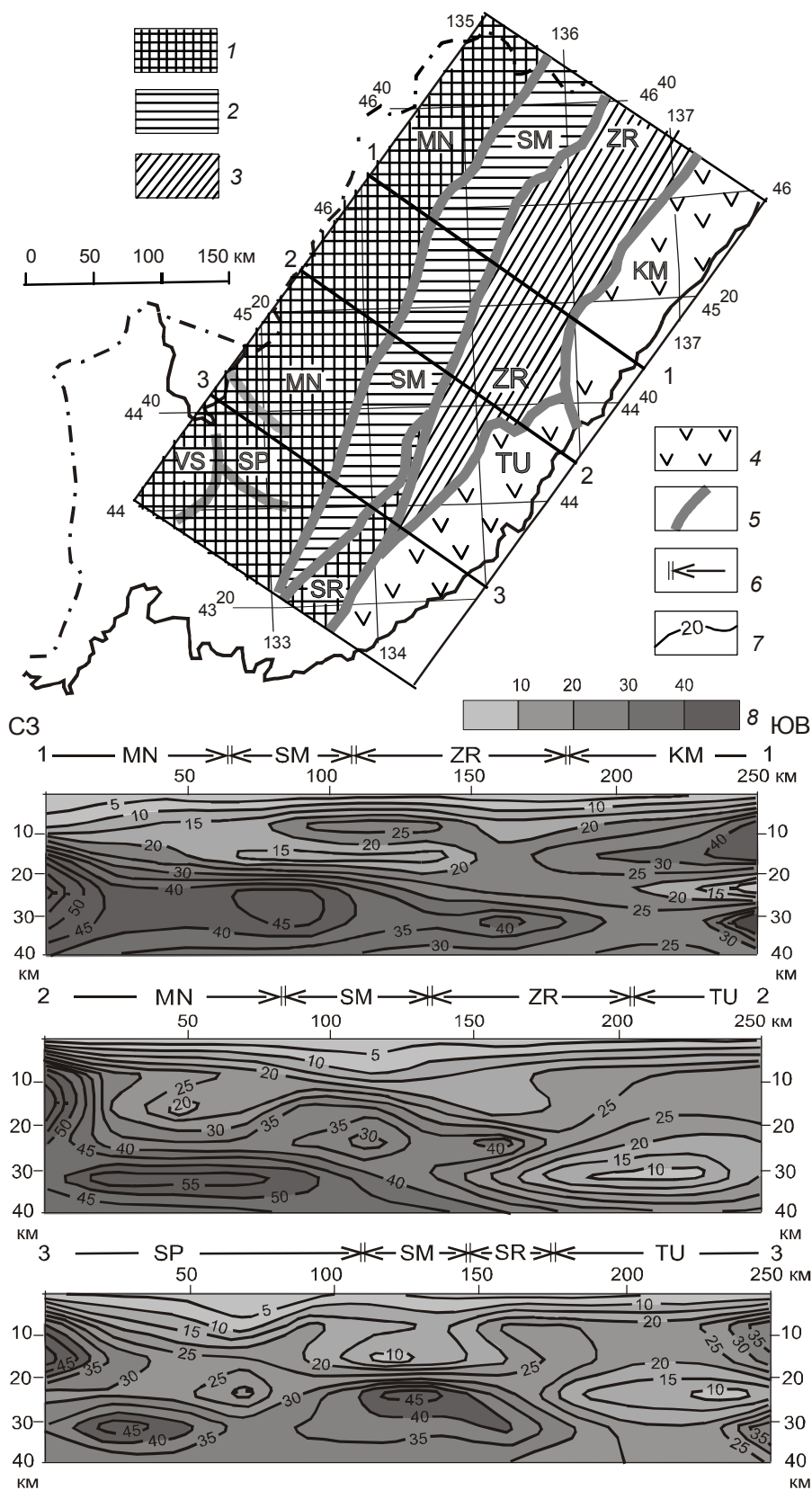
Рис. 2. Схема ввода (а), обработки (б) и визуализации (в) ГИС-данных.

формацию о глубинном геологическом строении и палеогеодинамике тектонических структур разного ранга (литосферных плит, астеносферы, земной коры и магматических поясов) [9, 10, 12]. При сопоставлении разрезов  $\mu_z$ -параметра с распределениями эпицентров землетрясений выявляются и пространственно параметризуются глубинные источники землетрясений: жесткие сейсмогенные блоки и пластины, подстилаемые вязкими средами, глубинные разломы и структуры центрального типа плюмовой природы [8, 11].

#### СИХОТЭ-АЛИНЬ

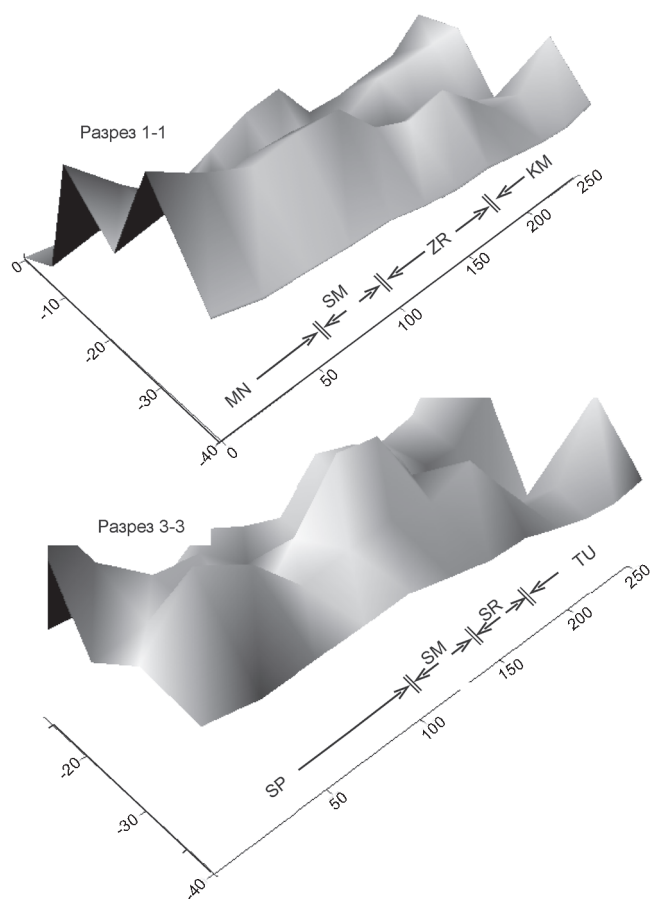
3D-массив в контуре модели, показанном на рисунке 3, содержит 683 определения  $\mu_z$  параметра в интервале глубин 0–55 км от поверхности геоида.

По описанной выше методике с помощью разработанного алгоритма построены разрезы объемной модели  $\mu_z(x, y, z)$  (рис. 3), существенно корректирующие представления о глубинном строении Сихотэ-Алинской складчатой системы (САСС). Во всех разрезах отчетливо проявлен пологий, падающий на юго-восток контакт кровли нижнекорового жесткого кристаллического слоя – структурного клина (соответствующего максимуму  $\mu_z$ -параметра) – с позднепалеозойскими и мезозойскими складчато-надвиговыми комплексами Сихотэ-Алия. Такое распределение градиентов плотности отвергает широко распространенную прежде (а у геофизиков – до сих пор) гипотезу прогибания земной коры в центральной части САСС, но соответствует современным геологическим данным [1, 18] о последовательном приращении



**Рис. 3.** Распределения градиентов плотности в разрезах земной коры Сихотэ-Алиня.

1-3 – тектонические комплексы (1 – архейские, протерозойские и палеозойские, 2 – преимущественно юрские, 3 – раннемеловые); 4 – вулканиты Восточно-Сихотэ-Алинского пояса; 5-6 – границы террейнов на схеме (5) и над разрезами (6); 7 – изолинии градиентов поверхностной плотности сферических источников гравитационных аномалий –  $\mu_z$  (1 ед. = 10<sup>-2</sup> кг/м<sup>2</sup>/км); 8 – шкала раскраски разрезов в единицах градиента плотности. Обозначения террейнов: MN – Матвеевско-Нахимовский, VS – Вознесенский, SP – Спасский, SM – Самаркинский, ZR – Журавлевский, SR – Сергеевский, TU – Таухинский, KM – Кемский.



**Рис. 4.** Аксонометрическая развертка разрезов  $\mu_z$ -параметра в земной коре Сихотэ-Алия.

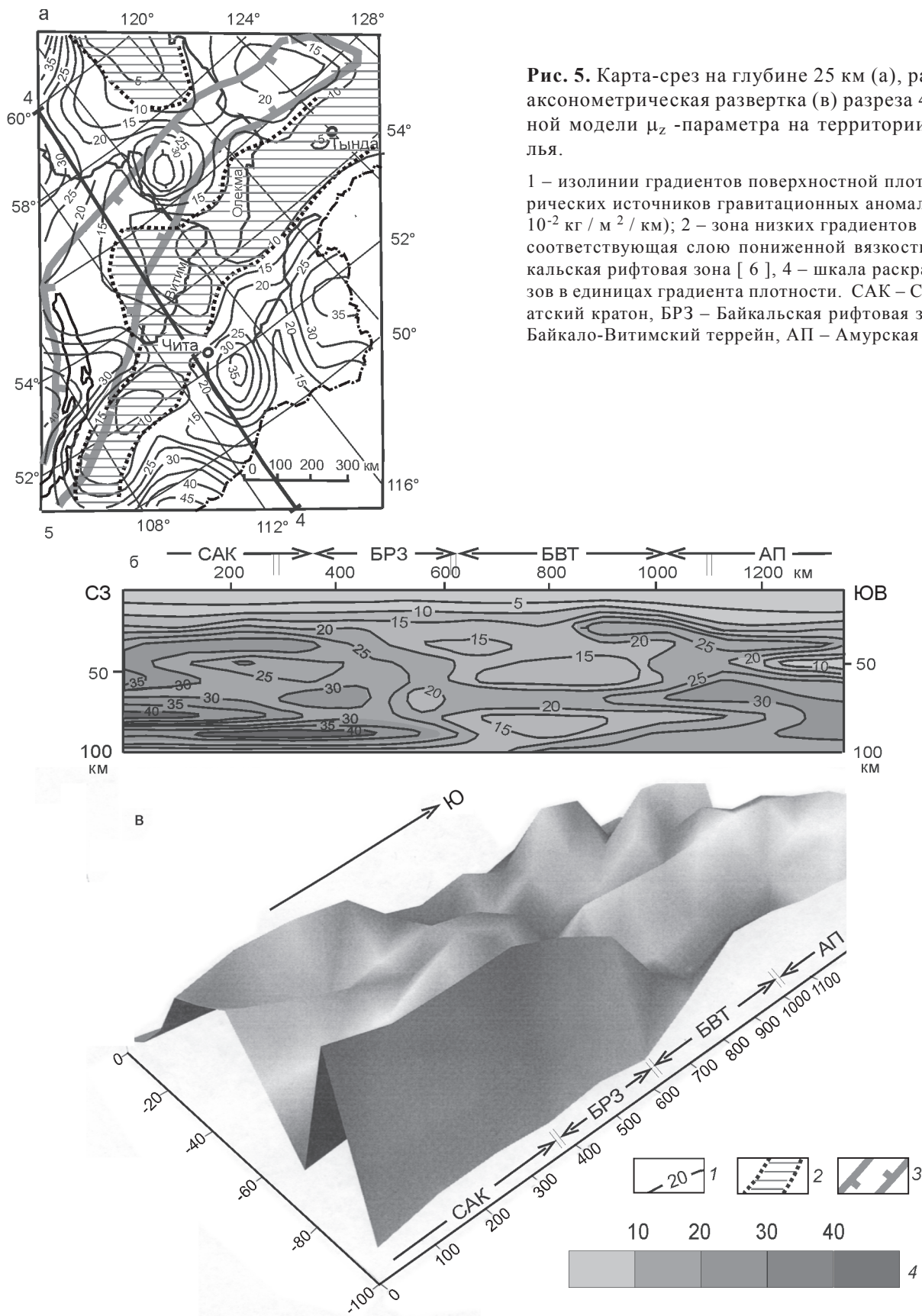
Обозначения структур на рис. 3.

и надвигании позднепалеозойских и мезозойских тектонических комплексов на Ханкайский супертеррейн – восточный фланг Амурской плиты. Приповерхностная восточная граница супертеррейна совпадает с границей Матвеевско-Нахимовского террейна, а глубинная – продвинута на юго-восток вплоть до западной границы Восточно-Сихотэ-Алинского вулканогена (Таухинского и Кемского террейнов).

По полученным данным (разрез 3-3 на рис. 3), Сергеевский архейско-протерозойский террейн, длительное время считавшийся аналогом “ханкайских” метаморфических комплексов, не имеет структурной связи с нижнекоровыми структурами Амурской плиты, что согласуется с палеотектоническими реконструкциями Сихотэ-Алия и подтверждает предположения о том, что этот террейн представляет собой перемещенный фрагмент Сино-Корейской параплатформы либо древней островной дуги [3, 18].

Совершенно иное распределение глубинных реологических неоднородностей обнаружено под Кемским и Таухинским террейнами. В разрезах 1-1 и 3-3 (рис. 3) приповерхностные вулканогенно-осадочные комплексы мощностью 4–5 км подстилаются жесткими пластинами (индицируемыми по максимумам градиентов плотности) в средней части земной коры (интервал глубин 6–20 км), надвинутыми на нижнекоровый структурный клин Амурской плиты. Повышенные значения  $\mu_z$ -параметра и широкое присутствие в составе этих террейнов андезитов и базальтов [15] дают основание предполагать океаническое (либо окраинноморское) происхождение этих пластин. Существование под ними (в интервале глубин 20–35 км) зон пониженных значений  $\mu_z$ -параметра, достигающих толщины 10–12 км (разрезы 2-2 и 3-3), является признаком реологической нарушенности нижнего слоя земной коры (или переходного слоя кора-мантия) в основании Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса. Из этого следует вывод, что магматические очаги, служившие источником позднемезозойских вулканических излияний на поверхности Земли, до сих пор могут находиться в вязком или частично расплавленном состоянии. Похожим образом минимумы градиентов плотности коррелируются с вулканическими и гранитоидными поясами на Камчатке, западном побережье Охотского моря, в Приамурье, Якутии и Забайкалье [9, 10, 12, 13].

Применение разработанного алгоритма позволило выявить более тонкие особенности  $\mu_z$ -моделей по сравнению с ручным методом построения разрезов. Более плотная сеть значений моделируемого параметра, используемых для построения разрезов, делает возможным получать аксонометрические развертки  $\mu_z$ -разрезов, в которых структурно-вещественные особенности геологических структур проявляются более наглядно (рис. 4). Так, в разрезе 1-1 отчетливо видно ступенчатое погружение нижнего слоя земной коры Матвеевско-Нахимовского террейна (входящего в состав Амурской плиты) под складчато-надвиговые комплексы Сихотэ-Алия и несогласное (дискордантное), по отношению к нему, структурное положение мезозойских террейнов: Самарского, Журавлевского и Кемского. Региональные тренды  $\mu_z$ -параметра в верхнекоровом и нижнекоровом слоях противоположны: в нижнем слое градиенты плотности увеличиваются в направлении от Японского моря к Амурской плите, а в верхнем – наоборот. Такое распределение  $\mu_z$ -параметра объясняется встречной геодинамикой континентального и окраинноморского структурных клиньев [17].



**Рис. 5.** Карта-срез на глубине 25 км (а), разрез (б) и аксонометрическая развертка (в) разреза 4-4 объемной модели  $\mu_z$ -параметра на территории Забайкалья.

1 – изолинии градиентов поверхностной плотности сферических источников гравитационных аномалий (1 ед. =  $10^{-2}$  кг / м<sup>2</sup> / км); 2 – зона низких градиентов плотности, соответствующая слою пониженной вязкости; 3 – Байкальская рифтовая зона [ 6 ], 4 – шкала раскраски разрезов в единицах градиента плотности. САК – Северо-Азиатский кратон, БРЗ – Байкальская рифтовая зона, БВТ – Байкало-Витимский террейн, АП – Амурская плита.

Похожие особенности просматриваются и в разрезе 3-3, но, кроме того, здесь ясно проявлена структурная обособленность Сергеевского архейско-протерозойского террейна от Амурской плиты (Спасского террейна).

### БАЙКАЛЬСКИЙ РИФТ

Байкальская рифтовая зона (БРЗ) является одной из крупнейших в мире кайнозойских структур растяжения, образовавшаяся в зоне сочленения Северо-Азиатского кратона (САК) с Амурской плитой (АП) [6]. На протяжении 40 лет конкурируют две точки зрения на природу этой зоны. Первая предполагает раздвиг литосферных плит – классический континентальный спрединг, вторая – пассивный механизм образования Байкальского рифта, характеризующийся односторонней направленностью процесса растяжения в юго-восточном направлении, который ограничивается земной корой [13]. Расчеты, выполненные с помощью разработанного кросс-интерфейса без привлечения вспомогательной геолого-геофизической информации, прояснили структурные взаимоотношения тектонических масс в слое 0–100 км от поверхности геоида (рис. 5), свидетельствующие в пользу пассивного характера байкальского рифтогенеза. Так, в разрезе 4-4 (рис. 5б) отчетливо проявлено погружение кровли нижнего слоя земной коры и литосферной мантии Северо-Азиатского кратона (зона повышенных значений  $\mu_z$ -параметра) в юго-восточном направлении. В этом и других [13] разрезах поверхность литосферного клина далеко простирается под рифтовую зону и на его юго-восточном фланге перекрывается слоем пониженной вязкости (детачментом), вдоль которого в мезозое и кайнозое отрывались и сползли в сторону Ангаро-Витимского гранитоидного батолита верхнекоровые тектонические пластины. Геодинамическая активность БРЗ не прекратилась до настоящего времени, что проявлено в аномалиях теплового потока и сейсмичности, однако эти процессы тоже смещены к юго-востоку, за пределы осевой части Байкальского рифта [4, 6, 13]. Там же располагаются и проявления кайнозойских базальтов. В полном соответствии с неглубоким залеганием вязкого слоя (рис. 5а), подавляющая часть эпицентров землетрясений в Байкальской рифтовой зоне концентрируется в среднекоровом интервале глубин: 12–20 км [6].

Еще более наглядное представление о глубинной структуре Байкальского рифта дает аксонометрическая развертка значений  $\mu_z$ -параметра в разрезе 4-4 (рис. 5в), в которой отчетливо прослеживается полого (обращаем внимание на резкое различие горизонтального и вертикального масштабов разреза)

наклоненная зона пониженных значений градиентов плотности, отделяющая литосферу Северо-Азиатского кратона от примыкающего к нему Байкало-Витимского супертеррейна и, далее к юго-востоку, Амурской плиты.

### ВЫВОДЫ

Разработанный алгоритм значительно повысил производительность расчетов и геологическую информативность метода оценки жесткости тектонических сред по градиентам плотности сферических источников гравитационных аномалий, эквивалентных компактным (квазиизометричным) плотностным неоднородностям [9]. С его помощью, без привлечения априорных геолого-геофизических данных и предварительных гипотез, в двух регионах изучены пространственные взаимоотношения тектонических масс разной жесткости и получена новая информация, проливающая свет на глубинное строение и происхождение окраинно-материковых складчатых и внутриконтинентальных рифтовых структур.

Основывающийся на формализованном подходе к моделированию и цифровом отображении геолого-геофизических данных, этот алгоритм применим для 3D-информационных массивов широкой специализации. С его помощью можно моделировать горизонтальные срезы и разрезы сейсмически активных тектонических структур (по данным мониторинга сейсмических событий) с целью выяснения тектонических причин землетрясений и использования этих разрезов при прогнозах сейсмической опасности; моделировать и изучать геохимические особенности рудных полей с целью пространственной параметризации и разделения дорудных, рудных и пострудных минеральных ассоциаций [7]; изучать пространственные распределения петрофизических и геофизических параметров (например, отображать результаты сейсмической томографии), аналитические продолжения потенциальных полей, их статистические и частотные преобразования. В последнем случае вместо Z-координаты в 3D-массивы геофизической информации подставляются значения гармоник или пространственных частот разложения спектра изучаемого параметра (в магнито- и гравиразведке) или измеренные значения геофизических параметров в разных частотных диапазонах (в электроразведке).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта ДВО РАН 09 – III – 08 – 437.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голозубов В.В. Тектоника юрских и нижнемеловых комплексов северо-западного обрамления Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2006. 239 с.

2. Дарахвелидзе П.Г., Марков Е.П. Программирование в Delphi 7. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 784 с.
3. Изосов Л.А., Коновалов Ю.И., Емельянова Т.А. Проблемы геологии и алмазности зоны перехода континент-океан (Япономорский и Желтоморский регионы). Владивосток: Дальнаука, 2000. 325 с.
4. Крылов С.В. Сейсмические исследования литосферы Сибири / Избранные труды. Новосибирск: Изд-во "ГЕО", 2006. 345 с.
5. Марков Е.П., Никифоров В.В. Delphi 2005 для Net. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 896 с.
6. Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М. и др. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины. Строение и геологическая история. Новосибирск: Изд-во "ГЕО", 2001. 251 с.
7. Петрищевский А.М., Холин В.Н., Цой Б.В. Физико-геохимические модели флюоритовых месторождений Приморья // Геология руд. месторождений. 1992. № 6. С. 48–60.
8. Петрищевский А.М., Ханчук А.И. Кайнозойский плюм в Верхнем Приамурье // Докл. РАН. Геофизика. 2006. Т. 406, № 3. С. 384–387.
9. Петрищевский А.М. Гравитационный индикатор реологических свойств тектоносферы дальневосточных окраин России // Физика Земли. 2006. № 8. С. 43–59.
10. Петрищевский А.М. Плотностная неоднородность литосферы юго-восточного обрамления Северо-Азиатского кратона // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, № 5. С. 566–583.
11. Петрищевский А.М. Связь сейсмичности с плотностными неоднородностями литосферы Дальнего Востока России // Вулканология и сейсмология. 2007. № 6. С. 60–71.
12. Петрищевский А.М. Вязкий слой на границе кора-мантия на Дальнем Востоке // Геотектоника. 2008. № 5. С. 37–48.
13. Петрищевский А.М. Реологическая гравитационная модель тектоносферы Забайкалья // Докл. РАН. Геофизика. 2009. Т. 426, № 2. С. 248–253.
14. Фленов М.Е. Библия Delphi. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 880 с.
15. Ханчук А.И., Раткин В.В., Рязанцева М.Д. и др. Геология и полезные ископаемые Приморского края: очерк. Владивосток: Дальнаука, 1995. 66 с.
16. Ханчук А.И., Петрищевский А.М. Астеносфера и плиты Северо-Восточной Азии // Докл. РАН. 2007. Т. 412, № 5. С. 689–693.
17. Юшманов Ю.П., Петрищевский А.М. Тектоника, глубинное строение и металлогения Прибрежной зоны Южного Сихотэ-Алиня. Владивосток: Дальнаука, 2004. 111 с.
18. Khanchuk A. I. Pre-Neogene tectonics of the Sea-of-Japan region: A view from Russian side // Earth Science (Chikyu Kagaku). 2001. V. 55, N. 5. P. 275–291.

*Рекомендована к печати Ю.Ф. Малышевым*

*V.A. Glagolev, A.M. Petrishchevskiy*

### **Simple algorithm for sections construction using 3D document files of geologic-geophysical data**

The algorithm providing automated construction of section maps and sections from discrete values of geologic-geophysical parameters described by 3D document files has been developed. Data input and output are based on standard formats of the Word, DOS and Surfer-8 operational systems, which makes it possible to use it by small scientific-technical teams when processing geologic information and interpreting local GIS. Examples of realization in practice of the algorithm for the study of density properties of the Earth's crust and upper mantle in the Transbaikal Region and Sikhote-Alin are discussed.

**Key words:** GIS, algorithm, gravitational modeling, Sikhote-Alin, Transbaikal Region, Юго-Восток России.