

УДК 519.254; 551.24; 551.439

© А.В. Михеева

А.В. Михеева

# ЮЖНО-АЗИАТСКАЯ МЕГАСТРУКТУРА ПО ДАННЫМ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ GIS-ENDDB

## Введение

Разнообразные эндогенные и экзогенные геологические процессы меняют внешний и внутренний облик нашей планеты и связаны с глобальными катастрофическими событиями ее истории. Эти процессы характеризуют современную геодинамическую обстановку, и исключение из рассмотрения хотя бы одного из факторов (например, экзогенного) может привести к неправильным оценкам состояния и геодинамического развития регионов. Для исследования причинно-следственных связей, влияющих на региональную геодинамику процессов, разработана программная система GIS-ENDDB (Earth's Natural Disasters Database – база данных природных катастроф Земли [10]). В статье приводится пример использования геофизических данных GIS-ENDDB для выявления и исследования геотектонических мегаструктур на примере глубинной Южно-Азиатской структуры – ЮАС (включающей известные сейсмические фокальные зоны: Памиро-Гиндукушскую, Зондскую, Западно-Тихоокеанскую и Дальневосточную, а также Тайваньско-Филиппинскую дугу), в пределах которой ранее отмечалась корреляция сейсмичности во времени [26] (именно исходя из этой корреляции сделано предположение о том, что данная структура существует в качестве единого геодинамического образования).

Привлечение геофизических данных системы GIS-ENDDB, в частности построение скоростных разрезов сейсмотомографии, призвано помочь уточнить геоморфологические характеристики этой гигантской кольцевой структуры, а также выдвинуть и обосновать возможные причины ее происхождения. Есть ли в центре этой структуры геофизические признаки плюма? Об этом может свидетельствовать знак сейсмо-скоростных аномалий. Так, известные области поднятия из недр расплавленного материала (например, в районах Исландии, Йеллоустона, Ключевской группы вулканов) отображаются в разрезах отрицательными аномалиями скоростей, а зоны субдукции – положительными, свидетельствующими о поступлении холодного и плотного материала литосферы вглубь менее вязкой мантии.

## Информационная база системы GIS-ENDDB

содержит данные импактного каталога Земли [25], каталога вулканов, сейсмологические данные из более 10 глобальных каталогов землетрясений (мирового масштаба), а также массивы измерений теплового потока Земли, детального рельефа поверхности, аномалий гравитационного поля и глубинной томографии. Для визуализации и исследования этих данных создана методическая база на основе методов физико-математического анализа, геоинформационных технологий и геоинформационно-экспертных подходов к интерпретации полученных данных.

Для геодинамических исследований Центральной Азии используются глобальные сейсмологические каталоги NEIC и Significant Earthquake (Геофизической службы США USGS), ISC (Международной сейсмологической службы ISC), а также созданный автором комплексный азиатский каталог COMPLEX, объединяющий детальные каталоги ФИЦ ЕГС РАН (Единой геофизической службы РАН) ряда азиатских и дальневосточных областей и каталог китайской сейсмографической сети CSN, благодаря чему каталог COMPLEX является на порядок более полным и представительным каталогом (с  $M_{np} = 3-3,5$ ) по Центральной и Юго-Восточной Азии в сравнении с ISC или CSN ( $M_{np} = 4-4,5$ ).

Для построения карт аномалий геофизических полей используются данные «Global marine gravity» V18.1 (гравитационного поля) [30], «The global heat flow database of the international heat flow commission» (данные измерений теплового потока Университета Северной Дакоты [33]), а для построения карт и глубинных разрезов (до глубин 700 км) используется 3D-модель «SL2013sv» (скоростная модель сейсмотомографии по S-волнам) [31].

Согласно [31], модель сейсмической томографии является наиболее детальной из созданных до сих пор глобальных моделей и представляет собой 28 слоев измерений на регулярной сетке с шагом:  $0,5^\circ$  – по широте и долготе; 25 км – по глубине. Таким образом, модель охватывает глубины до 700 км, включая литосферу, астеносферу и переходную зону между верхней и средней мантией. Точность значений

отклонения скорости  $S_v$  от базовой – 0,001%. Максимальный разброс значений: от –26,26% (встречаемой на глубине  $H = 50$  км) до 12,527% (на  $H = 25$  км). Данные модели «SL2013sv» добавлены в пакет GIS-ENDDB в виде 28 бинарных файлов (*tomogr25, ..., tomogr700*) с помощью специального конвертора. Каждый файл соответствует отдельному томографическому слою (первый файл – слою  $H = 25$  км, последний – слою  $H = 700$  км). Включение данных в среду GIS-ENDDB осуществлялось стандартной процедурой подключения новых слоев путем добавления описательного блока каждого слоя в текстовый файл *raster\_eedb.mgd*. Этим же способом подключены новые топографические данные, данные гравиметрии и теплового потока, также визуализируемые в виде псевдо-трехмерных слоев [12] (рис. 3, 6а). Для построения томографических разрезов разработаны алгоритм заполнения временного массива размерностью  $28 \times 200 \times 200$  и функция расчета и отрисовки разреза по выбранному пользователем профилю. Отрисовка разреза (рис. 1, 4) осуществляется в отдельном окне. Окно вывода используется также для визуализации распределения параметров сейсмического режима в виде последовательности разрезов (по равномерным интервалам времени) и последовательности карт этих параметров (при неактивной опции «dep»).

Для построения томографического разреза предварительно выбирается томографическая цифровая модель, последовательно загружаются томографические слои по выбранной области в 3-мерный массив памяти и строится профиль на карте (опция меню «*F(s)-section*»). Параметры построения томографического разреза (схема 1): шаг вдоль профиля (в километрах), шаг по глубине (в километрах), глубина разреза, количество цветов (оттенков синего цвета для отрицательных вариаций значений ( $S_v$ ) и оттенков желто-оранжево-красного спектра для положительных вариаций), наличие или отсутствие на разрезе эпицентров землетрясений (попавших в рамку профиля). По гравиметрической цифровой модели или модели теплового потока возможно построение профилей, в том числе совместно с томографическим разрезом.

**Глубинные структуры в литосфере и астеносфере по данным томографии.** Для исследования глубинных тектоногенных структур в GIS-ENDDB включены процедуры визуализации данных глубинной сейсмотомографии на картах оттененного рельефа (по слоям) и в разрезах (по профилю, выбранному пользователем). Далее, методы графического и пространственно-временного анализа характеристик сейсмогеодинамического процесса, унаследованные из подсистемы анализа GIS-EEDB

[11] и дополненные новыми характеристиками, а также функциями распределения всех характеристик в разрезе (также по назначенным пользователем разнонаправленным профилям), позволяют получать информацию о динамике сейсмогеодинамического режима в выявленных на томографических разрезах глубинных структурах. Наиболее типичным структурным образованием на глубинах верхней мантии (достигающим глубины до 400-700 км), выявленным по данным томографии, являются глубинные «каналы», иногда совпадающие с каналообразными структурами сейсмичности – «сейсмическими гвоздями» [3, 19] или представляющие собой фрагментирование на глубине субдукционных пластин.

Отметим, что под термином «канал» мы понимаем направленные в *глубь* мантии цилиндрические или воронкообразные положительные  $S_v$ -аномалии (ортогональные или косоориентированные к поверхности), ширина и интенсивность которых обычно убывает с глубиной, что позволяет их связать с потоком движущегося (или законсервированного в прошлом движения) сжатого литосферного материала вглубь.

Рассмотрим наличие и типичность «каналов» на примере областей, где геодинамические процессы, связанные с глубинной тектоникой, наиболее изучены. Известно, что в зонах субдукции «часть океанической литосферы (преимущественно мантийные породы) пододвигается под континенты» [16] (возможно также, что в процесс пододвигания вовлечены и краевые части литосферных плит континента). Данные томографии в качестве структур повышенных скоростей  $S_v$ -волн (рис. 1) фиксируют как процессы наклонного пододвигания, так и сменяющие их на различных глубинах процессы вертикального погружения литосферных масс в астеносфере (термины «пододвигания» и «погружения» по [16]) на глубины до ~400 км. Процесс погружения сопровождается фрагментацией на «каналы» и иногда выполаживанием (рис. 1б).

Например, для Индийской плиты (под Евразийскую) глубина структур пододвигания не превышает верхние 250 км разреза (литосфера на рис. 1а), для Тихоокеанской плиты под Евразийскую (рис. 1б) – верхние 50-100 км. Процессы погружения начинаются в астеносфере, соответственно, с глубин 250-300 км в случае взаимодействия континентальных плит и 100-150 в случае субдукции океанической плиты под континентальную (рис. 1б), в последнем случае иногда выполаживаясь в полосе глубин  $H = 250-400$  км и простираясь по горизонтали до тысяч километров. Образование глубинных «каналов» на площади под центральным Тибетом (рис. 1а) (т.е. в зоне активного коллизионного надвигообразования) иногда объясняется моделью «мантийной субдукции» [5].

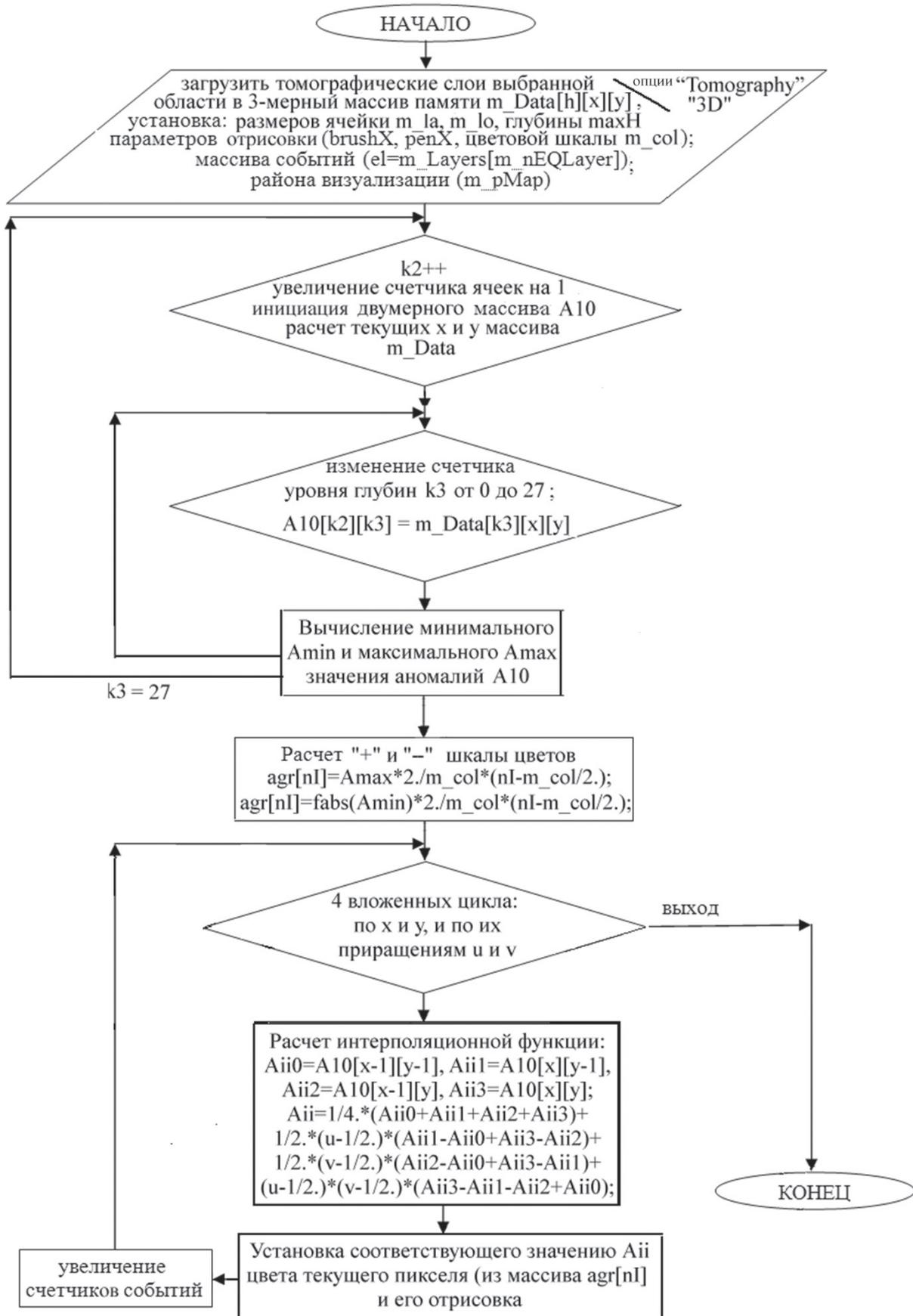


Схема 1. Алгоритм построения томографического разреза

Scheme 1. Algorithm for constructing a tomographic cross-section

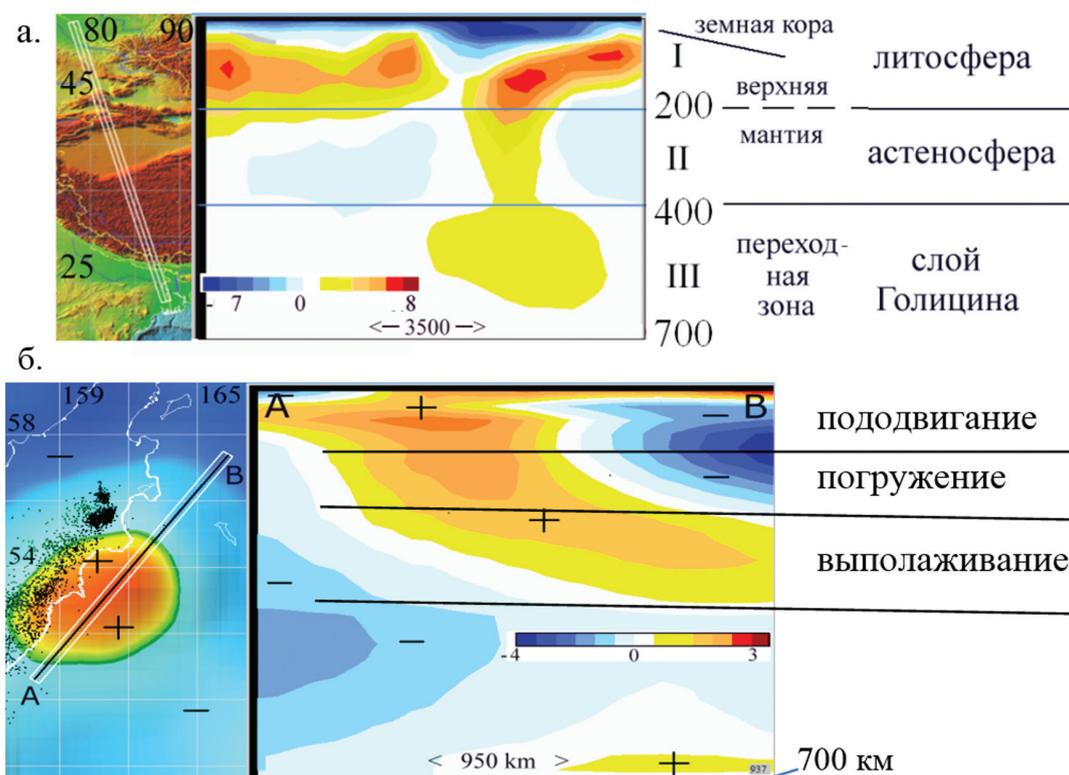


Рис. 1. Структуры «пододвигания» и субвертикального «погружения» в зоне коллизии (а) и субдукции (б) на томографической карте (слева) и в разрезе (справа): а – по профилю через южную Сибирь – Такла-Макан – Средний Тибет, виден приподнятый жесткий край Таримского блока (справа показано соответствие разреза томографии современным представлениям о строении Земли): I – пододвигание, II – погружение; б – пододвигание ( $0 \leq H \leq 80$  км), погружение ( $100 \leq H \leq 200$  км) и выполаживание ( $\sim 230 \leq H \leq 350$  км) вдоль побережья Камчатки. На цветовой шкале показаны возмущения в % к базовой скорости  $S_v$  [3]

Fig. 1. Structures of «pushing» and sub-vertical «immersion» in the zone of collision (a) and subduction (b) on the tomographic map (left) and in the cross-section (right): a – profile through southern Siberia – Takla-Makan – Middle Tibet, the raised hard edge of the Tarim block is visible (on the right: the conformity of the tomography cross-section with the latest views about the internal structure of the Earth): I – pushing, II – immersion; б – pushing ( $0 \leq H \leq 80$  km), immersion ( $100 \leq H \leq 200$  km) and flattening ( $\sim 230 \leq H \leq 350$  km) processes along the coast of Kamchatka. The perturbations in % to the base  $S_v$  velocity [3] are indicated on the color scale

Несмотря на различия геодинамических процессов, вызывающих погружение плотного материала в верхних 400 км разреза, уровень  $H = 300-400$  км литосферные массы могут преодолеть лишь по сравнительно узким «каналам», растекаясь по латерали в слое Голицина (ниже уровня  $H \sim 450$  км) и образуя замкнутые «резервуары» (рис. 1а) или (реже: в зонах наиболее интенсивной субдукции) слои различной протяженности (рис. 5б), отмечаемые аномалиями повышенных скоростей S-волн.

Описанные закономерности ставят вопросы о причинах появления каналаобразных структур, по которым происходит погружение плотных (холодных) литосферных масс (характерный максимальный диаметр устья «каналов»  $D = 600 \pm 200$  км) и проникание в слой Голицина (С-слой) через узко локализованные «окна» (характерный диаметр этой наиболее узкой части «каналов»  $D = 400 \pm 100$  км).

### Южно-Азиатская геофизическая структура

Южно-Азиатской названа  $\Omega$ -образная глубинная структура, проявляемая на карте суммарного  $S_v$ -поля по томографическим слоям ниже подошвы литосферы ( $H > 225$  км) (рис. 2). Картина, наблюдаемая на томографических картах различной глубины и в разрезах области ЮАС (рис. 3), отличается от описанных выше областей сопряжения плит, хотя и несет в себе элементы сходства с ними. Прежде всего, ЮАС характеризуют скоростные (или сейсмopлотностные) признаки гигантской кольцевой структуры диаметром  $\sim 5400$  км (названной согласно [6] «Зондско-Марианской»):

- зона «погруженного» кольца (аномально пониженных скоростей) (рис. 3б) вокруг «высокоплотностного» Индокитайского гвоздеобразного центра, проявляемого на глубинах 80-250 км (рис. 4а, б);

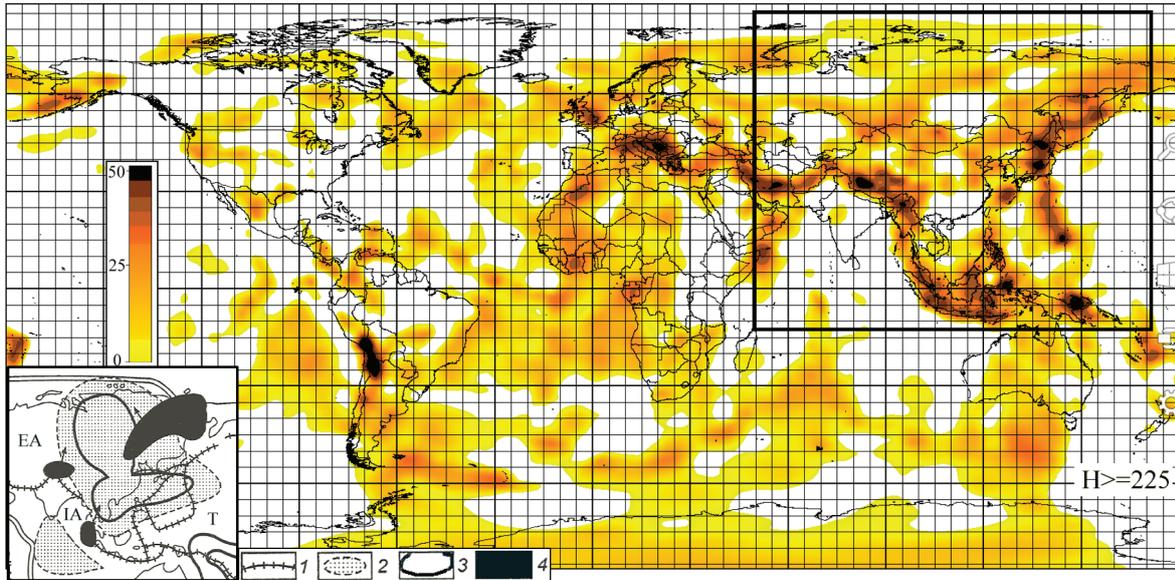


Рис. 2. Мировая карта суммарного  $S_V$ -поля по томографическим слоям ниже подошвы литосферы:  $225 \leq H \leq 700$  км. Максимумы отмечаются  $\Omega$ -образная геофизическая мегаструктура (ЮАС) и локальная область в центральной части тихоокеанского побережья Южной Америки.

Во врезке – мантийные аномалии в отмеченной рамкой области согласно [5]:

- 1 – зоны субдукции, 2 – положительные аномалии скорости Р-волн на глубине 2600-2900 км,
- 3 – восходящие потоки на глубине 1000 км, 4 – области длительной субдукции

Fig. 2. World map of the total  $S_V$ -field of tomographic layers below the base of the lithosphere:  $225 \leq H \leq 700$  km. The maxima indicate a  $\Omega$ -shaped geophysical megastructure and a local area in the central part of the Pacific coast of South America.

In the inserted picture: the mantle anomalies in the marked area according to [5]:

- 1 – subduction zones, 2 – positive anomalies of the P-waves velocity at a depth of 2600-2900 km,
- 3 – ascending flows at a depth of 1000 km, 4 – areas of long-term subduction

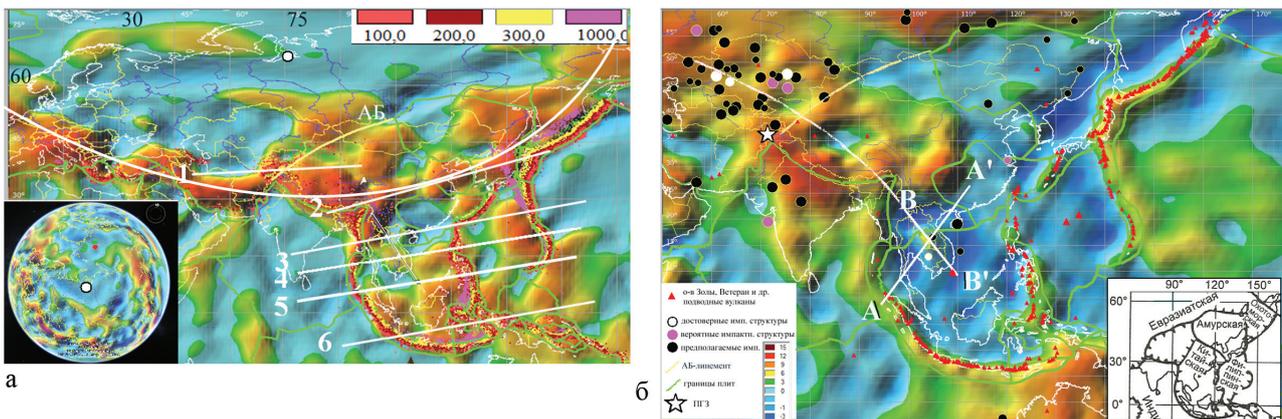


Рис. 3.  $\Omega$ -образная Южно-Азиатская структура в рельефе скоростного поля: а) на глубине 475 км с глубоководными землетрясениями ( $H \geq 50$  км, NEIC) и «Евразийской» дугой (белый круг – ее центр); б) на глубине 125 км с вулканами и импактными структурами. АБ – «Внутриазиатский» сейсмолинеамент. Во врезке рисунка (а) слева – полное «Евразийское» кольцо ( $H = 475$  км), наложенное на глобус Google Earth (белая точка – ее центр, красная точка – Северный полюс), во врезке рисунка (б) – межплитные разломы по [5]

Fig. 3.  $\Omega$ -shaped South-Asian structure in a SV-speed relief: a) at a depth of 475 km with deep-focus earthquakes (of  $H \geq 50$  km, NEIC) and the «Eurasian» arc (the white circle is its center); б) at a depth of 125 km with volcanoes and impact craters. АБ – is the «Intra-Asian» seismolineament. In the inserted picture on the left of (a): the full «Eurasian» ring ( $H = 475$  km) superimposed on the Google Earth globe (the white dot is its center, the red dot is the North Pole), in the inserted picture of (б): the interplate faults according to [5]

- кольцевой разлом, соответствующий Зондской и Идзу-Бонинской дугам (рис. 3);
- чашеобразная форма пододвигания литосферного материала вдоль этого разлома, выявляемая серией параллельных друг другу вертикальных разрезов (рис. 3а, 5).

Упомянутая чашеобразная аномалия, по «Билатеральной модели конвергенции» Т. Ирвайна [24] и реконструкции Н.Л. Добрецова [5], является одним из двух («Перу» и «Вьетнам») глобальных центров нисходящих потоков, лежащих на геомагнитном экваторе (рис. 5д). Однако кольцевая разуплотненная зона внутри этой чаши (опоясывающая ИГЦ), согласно данным томографии, не может являться валиковой ячейкой конвекции на уровне астеносферы с нисходящей составляющей со стороны субдукции и восходящей – со стороны ИГЦ. Гвоздеобразная аномалия ИГЦ (учитывая ее максимальный наклон ~50° к горизонту в ЮЮЗ направлении, рис. 4б) и аномально повышенные  $S_v$ -скорости, скорее, может отражать нисходящий поток материала утоненной континентальной литосферы вдоль «канала» разуплотнения пород, образованного, например, в результате наклонного проникновения ударника (по аналогии с наблюдаемыми фактами проникновения железных ударников в мягкие породы мишени, рис. 4в).

Симметрично рассматриваемому Индокитайскому центру (ИГЦ) в пределах кольцевой части Южно-Азиатской структуры отмечается второй, менее выраженный центр (ФЦ), соответствующий расположению двух подводных вулканов в центре Филиппинского моря (рис. 3б, 5в) (близ ИГЦ также есть подводные вулканы: острова Золы и Ветеран, что также делает его схожим с зонами субдукции, сопровождаемыми вулканической деятельностью). ИГЦ и ФЦ разделены осевым «срединным хребтом» вдоль Тайвань-Филиппинской дуги (что встречается также в структурах двойного удара [10]) и оконтуриваются общим кольцевым разломом (вдоль Зондско-Марианского псевдокольцевого образования) с диаметром  $D = 5400$  км.

Таким образом, однотипность сейсмических аномалий, имеющих положительные значения как у выявляемой гвоздеобразной аномалии в центре ЮАС, так и у аномалий в зонах субдукции (иногда также каналобразных), опровергает гипотезу о существовании в центре ЮАС плюма. Наблюдаемые погружения литосферного материала, скорее всего, могут происходить не в результате конвекции, а в процессе гравитационного опускания материала литосферы в разуплотненные каналобразные структуры, а также зоны разрушения вдоль линейных и кольцевых глубинных разломов. В частности, в ЮАС погружения происходят как вдоль кольцевого

Зондско-Марианского разлома в виде слэба, так и вдоль ИГЦ в виде «канала». Может ли эта кольцевая структура быть образована ударом?

Размеры кольцевого разлома (5400 км) и собственно ИГЦ (400×500 км – по диаметру «зонтика», 250 км – по его вертикальной оси и 550 км – по наклонной, рис. 4а, б) могут соответствовать, согласно экспериментальным данным [4, 9, 12], эффективным параметрам проникающего удара с диаметром ударника  $L$  от 135 км. Эта оценка получена, согласно экспериментально установленной формуле Чартерса и Саммерса [9], на скоростях до 4 км/с:

$$H/L = 2,28(Q_p/Q_r)^{2/3}(V/c)^{2/3},$$

где  $V$  – скорость ударника,  $L$  – диаметр ударника,  $Q_p/Q_r$  – соотношение плотностей ударника и мишени,  $c$  – скорость звука в породе мишени. При этом диаметр зоны разрушения  $D$  имеет предел в 10-40 диаметров ударника [9, 12, 15], а скорость  $V$  может увеличиваться по меньшей мере до 12-18 км/с без нарушения подобия [13].

Кроме того, экспериментально установлено [15], что для разных сочетаний материалов снаряда и мишени (WC/Al, Fe/Al, Fe/Cu) в определенном диапазоне скоростей ( $V \sim 1-2$  км/с) значение коэффициента формы кратера (отношение  $H/D$ ) резко растет, т.е. кратеры «становятся похожими на глубокие тоннели» [15]. При дальнейшем росте скорости форма кратера все более приближается к полусферической.

Согласно приведенной формуле, при скорости ударника, сравнимой со скоростью звука в мишени, и при плотности ударника в 2,9 раза превышающей плотность мишени, глубина проникновения при  $L \sim 135$  км становится  $H \sim 620$  км, а при равной плотности ударника и мишени  $H \sim 308$  км. При высокоскоростном ударе более плотного, чем мишень, ударника, форма кратера становится более сложной, чем полусферическая [14, 17] (рис. 4г, д, ж), а кольцевые разломы по периферии зоны разрушения (рис. 4д, е) в глобальном масштабе могут преодолеть границу Моха и создавать зоны разуплотнения в верхней мантии, затягивающие плотный литосферный материал вглубь при движении плит. Подобному процессу преобразования (заполнения плотными массами) может быть подвергнут и сам кратер, который в результате проникающего воздействия должен иметь форму воронки с цилиндрической «лункой» («каналом») в глубокой части, представляющей собой турбулентный след (дорожку Кармана) [8] из разуплотненного пористого [4, 18] переработанного материала мишени с включениями вещества микроударника [8, 18].

Таким образом, отмечаемая в томографии аномалия ЮАС с центром в ИГЦ объединяет в себе морфоструктурные признаки кратеров, наблюдаемых

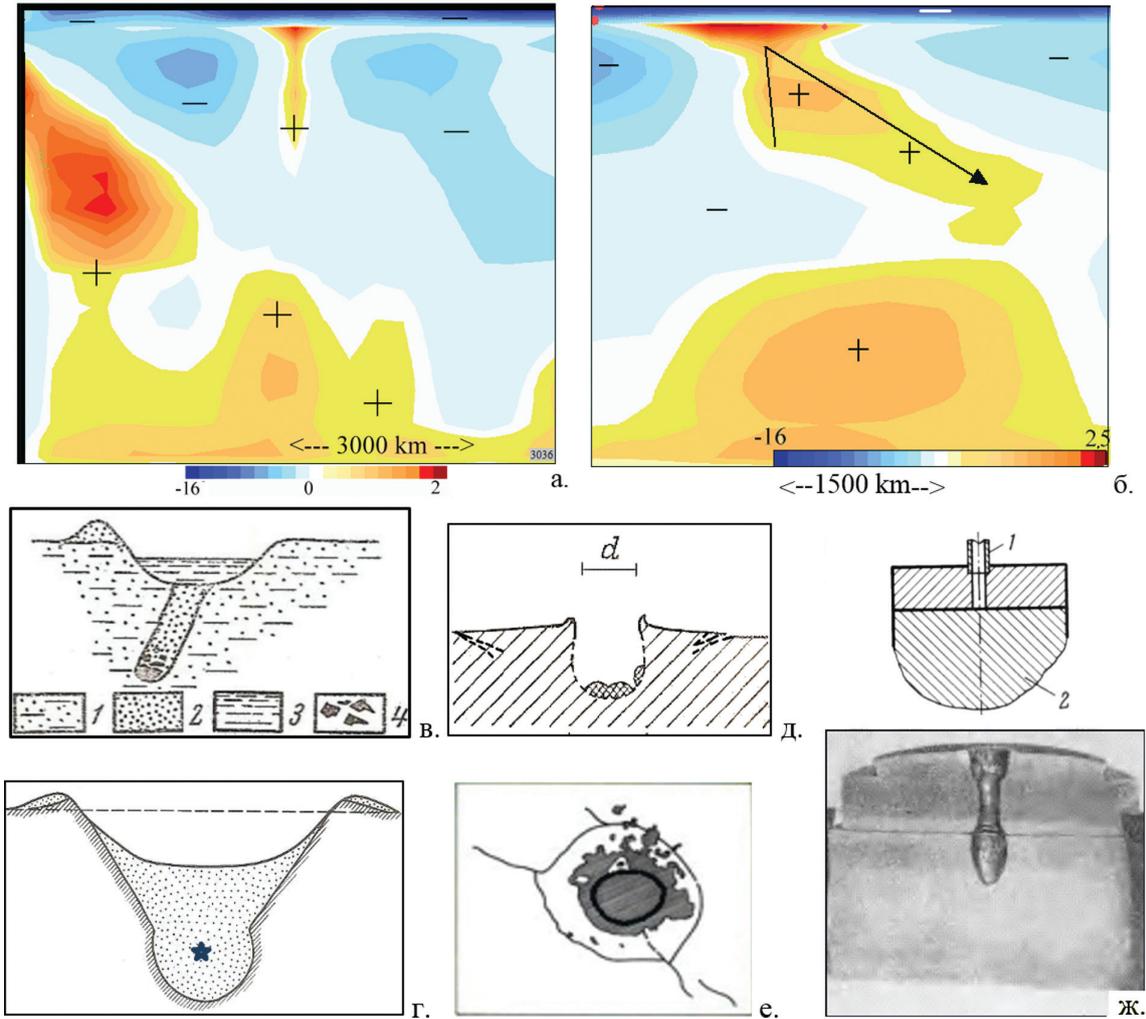


Рис. 4. Индокитайская гвоздеобразная структура (ИГЦ) и геоструктурные признаки ударных процессов.  
 а – томографический разрез ИГЦ по профилю AA' (рис. 3а) (ячейка осреднения 15×25 км, 24 цвета цветовой шкалы  $S_v$  в % к базовой, глубина разреза 700 км); б – то же по профилю BB' в направлении наклона ИГЦ-аномалии; в, г – примеры наблюдений ударных признаков: в – косо-ориентированного проникающего действия ударника в мягкий материал для фрагмента (в несколько тонн) Сихотэ-Алинского железного дождя [7] (1 – рыхлый грунт, 2 – мелкий насыпной материал, 3 – вода, 4 – метеоритные осколки, их окислы), г – схема строения воронки взрыва на выброс (звездочка – место заложения взрывчатого вещества) [17], д – колбообразная форма микрократера и очертание поверхностного откола (создающего концентрические трещины) в лабораторных экспериментах с железным ударником и мишенью из натрово-известкового стекла:  $L = d = 2$  мкм,  $V = 5,8$  км/с (в мишени из плавленного кварца глубина результирующей лунки и диаметр зоны откола увеличиваются) [34], е – образование ударных кольцевых трещин в результате искусственного удара [23], ж – кратер в стальной преграде от удара компактной массой (сгустком частиц вольфрама:  $L \sim 5$  мм) со скоростью 24 км/с (прямой удар в замкнутое пространство: 1 – трубка, по которой движется сгусток, 2 – преграда) [14]

*Fig. 4. Indochinese nail-shaped structure (INS) and geosignatures of impact processes.*  
*a – tomographic cross-section of the INS along the AA' profile (fig. 3a): averaging cell: 15×25 km, 24 gradations of the  $S_v$  color scale (in % to the base), depth of the cross-section is 700 km; б – the same along the BB' profile in the direction of the INS-anomaly inclination; в, г – examples of impact signs observations: в – oblique-oriented penetrating action of a impactor into soft material for a fragment (of several tons) of Sikhote-Alin iron rain [7] (1 – loose soil, 2 – fine piled up material, 3 – water, 4 – meteoritic fragments, their oxides), г – scheme of the structure of ejection explosion hole (asterisk is the location of the explosive) [17], д – microcrater's flask form and surface spalling (creating concentric cracks) in laboratory experiments with an iron impactor and soda-lime glass target:  $L = d = 2 \mu\text{m}$ ,  $V = 5,8$  km/s (in the case of fused quartz target, the depth of the resulting hole and the diameter of the spalling area increase) [34], е – formation of the impact ring cracks as a result of synthetic impact [23], ж – crater in a steel barrier after a compact mass impact (clot of tungsten particles:  $L \sim 5$  mm) at a speed of 24 km/s (direct impact into an enclosed space: 1 – tube along which the clot moves, 2 – barrier) [14]*

в различных экспериментах: воронку взрыва на выброс (рис. 4г) – в верхней конической части ИГЦ, кратер прямого удара в замкнутое пространство (рис. 4ж) – в поперечном сечении ИГЦ, косоориентированный канал (рис. 4в) – в продольном сечении и концентрические трещины – по периферии ЮАС (рис. 4д, е). Поскольку приведенные данные экспериментальных методов для оценки характеристик высокоскоростного удара достаточно неоднозначны (ввиду технических ограничений этих методов [12]), для уточнения модели проникания обратимся к методам численного моделирования [1]. Численные расчеты позволяют учесть, что удар производится в слоисто-неоднородную мишень, представляющую собой (рис. 1) пластину более плотной литосферы (при величине отношения ее толщины к диаметру ударника  $\xi \leq 1$ ), лежащей на менее вязких породах верхней мантии. Согласно [1], при ударе железной сферы в алюминиевую пластину ( $Q_p/Q_r \sim 2,9$ ) большая часть энергии расходуется на процесс пробивания, а не кратерообразования (процессы кратерообразования начинают преобладать при  $\xi \leq 2$  [1]). При росте  $\xi$  растет диаметр воронки кратера (отверстия в пластине), т.к. растет количество энергии, передаваемой в боковом направлении. Например, для  $\xi = 1/4$  и  $H \sim 2L \Rightarrow D \sim 2L$  [1], и с ростом глубины расчета  $H$  диаметр  $D$  почти не увеличивается. Также в работе [1] отмечается характерная черта пробивания при наклонном ударе (алюминиевой пластины железным цилиндром): «наблюдается разделение потоков массы ударника и мишени: основная масса материала ударника перемещается близко к направлению удара, а центр масс запреградных осколков мишени движется по траектории, составляющей с вертикальной осью меньший угол, чем направление удара». Возможно, именно эта закономерность проявлена в двухосевой глубинной конфигурации ИГЦ, где одна из осей соответствует возможному направлению удара (рис. 4б).

По периметру  $\Omega$ -образной структуры, по данным сейсмотомографии, кроме субдукционных слэбов, располагаются субдукционные «каналы», наиболее глубокие из которых (глубиной до 600-700 км) прослеживаются в боковых кулисо-образных ветвях структуры, состоящих из цепочек береговых или островных дуг (рис. 2, 3а). Глубинные «каналы» направлены к центру этих дуг (рис. 5а). Учитывая, билатеральную симметрию ветвей структуры (рис. 2) и то, что наиболее сейсмоактивные и максимальные по глубине «каналы» пододвигания приходятся на противоположные точки разворота ветвей, можно предположить, что  $\Omega$ -образная структура состоит из наложенных друг на друга двух разномасштабных и разновозрастных кольцевых структур, по периметру

которых происходит (или происходила в прошлом) мантийная субдукция.

Осевой симметрией, совпадающей с осью ЮАС, характеризуется также распределение рестигов наиболее длительных зон субдукции (рис. 4а,б), выраженных положительной аномалией скоростей Р-волн на глубинах нижней мантии, а также конфигурация аномалии нисходящих потоков вещества на глубине 1000 км (врезка рис. 2) [5].

На поверхности билатеральная симметрия ЮАС (с той же осью) выражена: в конфигурации границ плит (во врезке справа рис. 3б [5]), по форме симметричного положительного обода в аномалиях гравиметрии (рис. 6а), а также в аномалиях характеристик сейсмогеодинамического режима: максимальных магнитуд  $M_{MAX}$  и максимальных глубин  $H_{MAX}$  землетрясений [26]. Симметрия наблюдается также в распределении подводных вулканов (рис. 3б) по периметру и оси структуры.

Отметим, что в области ИГЦ фокусируется центр распределения по латерали Австрало-Азиатского пояса тектитов (возраст 0,793 млн лет) (рис. 6б), предположительно, ударного происхождения [2, 21-22]. Отмечены в этой области и другие признаки ударного события, например, согласно [21] содержащие тектиты отложения затоплений отражают влияние ударного события на региональную биосферу и климат: обезлесивание местности, рост атмосферных осадков и эрозии почв. Несмотря на это до сих пор не существует единого мнения, какая из кольцевых структур на поверхности может претендовать на роль родительского кратера Австрало-Азиатских тектитов. В каталог [25] включено несколько структур полуострова Индокитай, трактуемых разными авторами в качестве кандидата на источник тектитов: Тонле Сап ( $D \sim 100$  км), Кьюи Нхон ( $D \sim 100$  км), Саваннахет ( $D \sim 17-90$  км) и др. Множество перечисленных КС каталога в области ИГЦ, а также повышенная плотность ударных кратеров (достоверных и предположительных) приурочены к Большому кругу Земли, обозначенном дугой на рис. 3б (включая, например, достоверный ударный кратер Жаманшин, также содержащий тектиты ударного происхождения), что можно трактовать как дугообразный след сопутствующего метеоритного (или кометного) дождя, образованный в процессе вращения Земли. Вдоль этого «шлейфа» располагается и большое скопление каналобразных погружений литосферы на глубину переходного слоя (рис. 1а и др.), отмечаемые множеством локальных аномалий выпуклой формы на карте поля скоростей на уровне  $H = 125$  км (рис. 3б), а также зоны кайнозойского горообразования в областях докайнозойских материковых платформ.

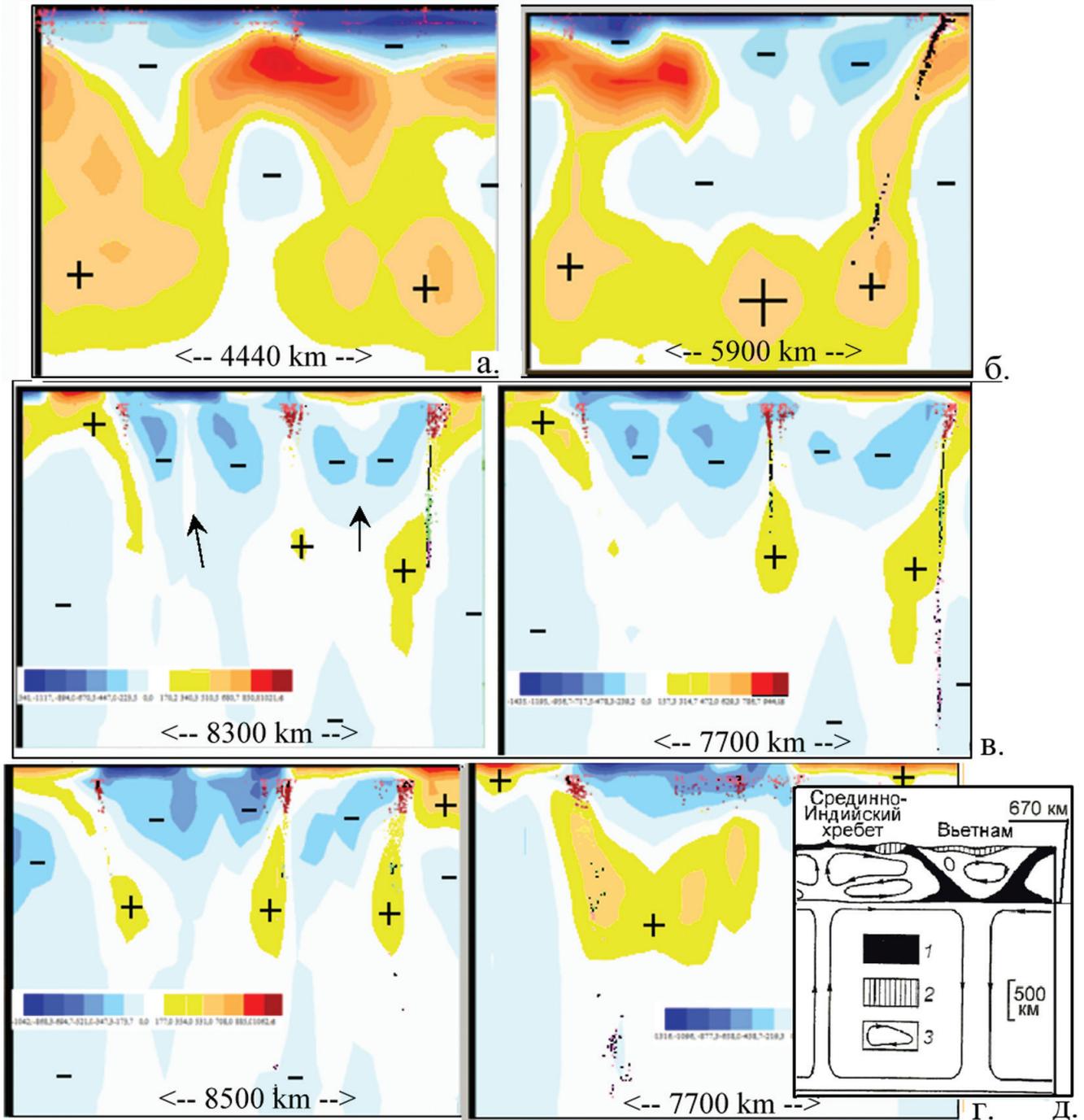


Рис. 5. Томографические разрезы Южно-Азиатской структуры по шести профилям рисунка 3а: а – разрез по профилю 1 (слияние «Персидского» и «Кабульского», также «Срединно-Тибетского» и «Тибетского-2» каналов); б – по профилю 2 (симметричные «Юговосточно-Тибетский» и «Япономорский» каналы); в – по профилям 3 и 4 (стрелками указаны ИГЦ и центр Филиппинского моря); г – по профилям 5 и 6; д – гипотетический экваториальный разрез через мантию Земли [5]: 1 – океаническая и 2 – континентальная литосфера, 3 – конвективные течения в астеносфере и нижней мантии

Fig. 5. Tomographic cross-sections of the South Asian structure in six profiles of figure 3a: a – cross-section along profile 1 (the two merging pairs: «Persian» and «Kabul» channels, «Mid-Tibet» and «Tibet-2» channels); б – by profile 2 (symmetric «South-East-Tibet» and «Japan Sea» channels); в – by profiles 3 and 4 (arrows indicate the INS and the center of the Philippine Sea); г – by profiles 5 and 6; д – a hypothetical equatorial cross-section through the Earth's mantle [5]: 1 – oceanic and 2 – continental lithosphere, 3 – convective currents in the asthenosphere and lower mantle

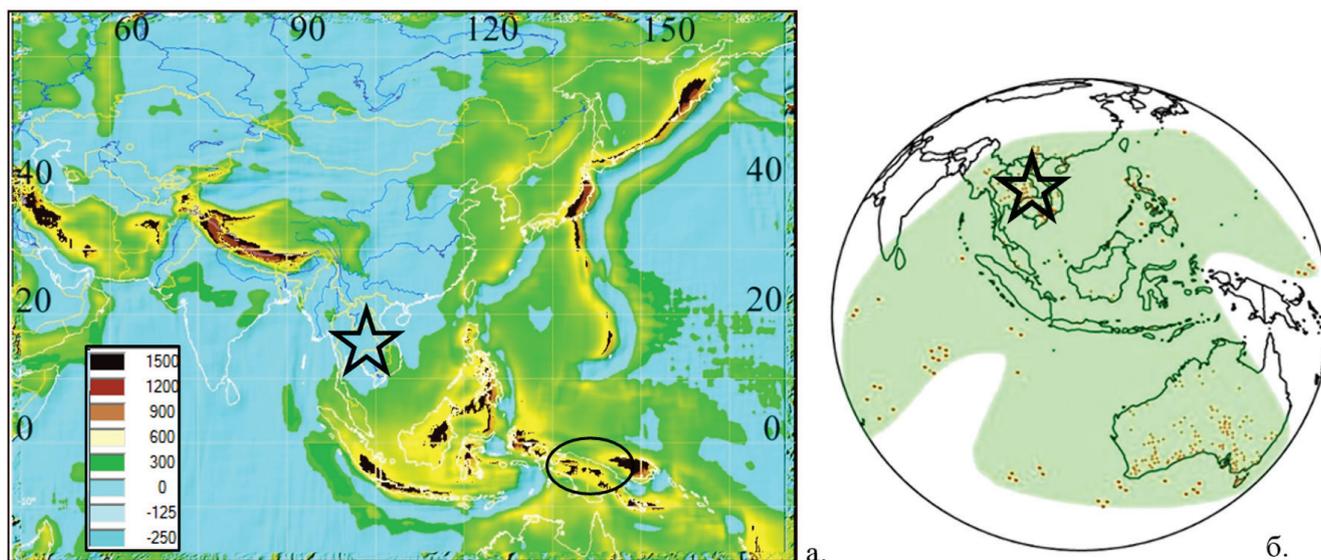


Рис. 6. Симметрия Южно-Азиатской структуры по данным гравиметрии,  $\Delta g$  в мГал (а) и распределение слоя ударных тектитов (б). Звездочкой отмечена локализация ИГЦ (рис. 4а)

Fig. 6. Symmetry of the South-Asian structure according to gravimetry data  $\Delta g$  (mGal) (a) and distribution of the impact tektite layer (б). The localization of INS is marked with an asterisk (Fig. 4a)

Хотя возраст Зондской субдукции в настоящее время предполагается 7-10 млн лет [27] (а возраст коллизии со стороны Индо-Австралийской (ИА) плиты – 5 млн лет [5]), возраст изменения кинематики субдукции датируется четвертичным периодом [20, 32], например, К/Аг-датировка связанных с субдукцией вулканов составляет 1,6-0,3 млн лет [29]. Что касается предполагаемого возраста субдукции, то величина 5-10 млн лет, действительно, соответствует соотношению между скоростью движения ИА-плиты (до 8 см/год) и глубиной проникновения литосферного материала, отмечаемой максимальными глубинами сейсмичности (до  $H_{MAX} \sim 670$  км в южной части дуги). Однако, в случае нелинейности протекания геологических процессов [28] современная скорость движения плиты может соответствовать стадии замедления субдукции, а ее возраст – на порядок меньшей величине.

Итак, более крупная глубинная кольцевая структура (врезка рис. 3а) сохранилась в виде кулисообразной дуги по краю Евразийской плиты (белая дуга на рис. 3а) и выражена интенсивной положительной аномалией  $S_v$  на глубинах 225 км и более. Волнистый контур дуги создан множеством глубинных «каналов» по ее периметру. Вероятно, изначальное количество «каналов» было большим, но часть из них разрушена (в интенсивной положительной аномалии  $S_v$  на глубине 475 км сохранилась лишь нижняя резервуарная часть этих «каналов»: см. цепочку положительных максимумов вдоль

дуги на рис. 3а и пример глубинного резервуара в центре профиля 2, отмечаемого также в разрезе по профилю 2 на рис. 5а). Остальные «каналы» проявлены в аномалиях благодаря продолжившемуся перемещению по ним литосферного материала, но лишь единицы из них используются современными сейсмогеодинамическими процессами, выраженными в интенсивной сейсмичности (показанной черными точками на рис. 5).

Таким образом, можно предположить, что глубинные структуры, слагающие ЮАС и проявляемые глубинными положительными сейсмическими аномалиями, могли образоваться в результате гравитационного движения литосферного материала в разуплотненные глубинные зоны. Эти зоны могли появиться по разным причинам и в разное время. Выявляемые вдоль ветвей ЮАС глубинные «каналы», цепочка которых образует в плане Евразийское кольцо, трудно объяснить с ударной точки зрения. Но кольцевая часть ЮАС по геометрическим характеристикам отвечает модели ударного образования, представляя собой полусферическую чашу разуплотнения с кольцевым разломом, и каналообразную структуру в центре, которая могла быть образована той частью ударника, которая вела себя как жесткое тело.

**Заключение**

Создана специализированная база данных природных катастроф и геофизических наблюдений GIS-ENDDDB (the Earth’s Natural Disasters DataBase),

функционирующая в единой геоинформационной среде и позволяющая исследовать важные для задач геотектоники и геодинамики физические характеристики геосреды (плотностные, энергетические и т.д.). В статье приводится пример использования геофизических данных GIS-ENDDB для выявления и исследования геотектонических мегаструктур, в пределах которых ранее отмечалась корреляция сейсмичности во времени. Продемонстрирован пример возможностей информационной системы для интерпретации комплекса данных геофизических наблюдений, дистанционного зондирования Земли, данных каталогов катастрофических событий (сейсмичности, вулканов и пост-импактных структур), сопоставление которых приводит к некоторым новым предположениям в геодинамике.

Средствами ГИС-системы выявлено, что наиболее типичным структурным образованием на глубинах верхней мантии (достигающими глубин до 400-700 км) являются глубинные «каналы», иногда совпадающие с каналобразными структурами сейсмичности: «сейсмическими гвоздями». Обнаружена также регулярность пространственного расположения «каналов» по периметру глобальной  $\Omega$ -образной структуры и признаки билатеральной симметрии других ее тектонических элементов. В результате можно предположить существование единой глубинной Южно-Азиатской структуры, геометрические характеристики которой согласуются с моделью высокоскоростного удара, проникающего в верхние слои мантии.

Автор выражает признательность Нигматзянову Р.С. за полезные обсуждения и советы.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН (проект 0315-2016-0009).

**Ключевые слова:** морфоструктурные элементы, геофизические аномалии, каталоги импактных структур и сейсмических событий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев А.С., Петренко В.Е. Примеры численного моделирования процессов высокоскоростного соударения твердых тел в гидродинамическом приближении // Отчет о НИР : по теме «Сияние-2» / ВЦ СО АН СССР, Книга 5: Исследование отражательно-излучательных характеристик космических обломков в различных диапазонах. Разработка моделей образования и эволюции космических объектов и техногенных частиц в околоземном космическом пространстве. – Новосибирск, 1992. – 191 с.
2. Вишневецкий С.А. Флюидалные тонко-полосчатые импактные стекла в зювитах некоторых астроблем (и среди некоторых тектитов): аккреционно-смесительная модель образования во взрывном облаке крупных импактных событий / С.А. Вишневецкий, Л.Н. Гишинская, С.М. Лебедева, Н.А. Пальчик, Л.Н. Поспелова // Урал. минерал. сб. – 2002. – № 12. – С. 234-310.
3. Владковский В.Н. Субвертикальные скопления гипоцентров землетрясений – сейсмические «гвозди» // Вестник ОНЗ РАН. – 2012. – № 4. – NZ1001.
4. Высокоскоростное ударное взаимодействие твердых микрочастиц с подложкой / С.Ю. Ганигин, В.В. Калашников, И.Д. Ибатуллин, А.Ю. Мурзин, О.Ю. Глазунова, А.А. Григорьев // Общие проблемы машиностроения : Известия Самарского НЦ РАН. 2013. – Т. 15, № 4 (2). – С. 339-342.
5. Добрецов Н.Л., Кидряшкин А.Г., Кидряшкин А.А. Глубинная геодинамика. – 2-изд., доп. и перераб. – Новосибирск : Изд-во СО РАН : Филиал «Гео», 2001. – 409 с.
6. Зейлик Б.С. О происхождении дугообразных и кольцевых структур на Земле и других планетах (ударно-взрывная тектоника). – М. : Геоинформ, 1978. – 58 с.
7. Зоткин И.Т., Цветков В.И. О поисках метеоритных кратеров на Земле // Астрономический вестник. – 1970. – № 1. – Вып. 4. – С. 5-65.
8. Макаров П.В. Модель сверхглубокого проникания твердых частиц в металлы // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т. 9, № 3. – С. 61-70.
9. Мелош Г. Образование ударных кратеров: геологический процесс. – М. : Мир, 1994. – 336 с.
10. Михеева А.В. Геоструктурные элементы, выявляемые математическими алгоритмами и цифровыми моделями геоинформационно-вычислительной системы GIS-ENDDB. – Новосибирск : Омега Принт, 2016. – 300 с.
11. Михеева А.В., Дядьков П.Г., Марчук Ан.Г. Геоинформационная система GIS-EEDB и методы пространственно-временного анализа сейсмологических данных // Геоинформатика. – 2013. – № 2. – С. 58-65.
12. Нигматзянов Р.С. Галактическая первопричина границ в истории земли // Отечественная геология. – 2015. – № 3. – С. 70-83.
13. Орленко Л.П. Физика взрыва и удара : учебное пособие для вузов. – М. : Физматлит, 2006. – 304 с.
14. Русаков М.М. Опытное моделирование метеоритного удара // Журнал ПМТФ. – 1966. – № 4. – С. 167-169.
15. Свифт Х.Ф. Механика соударения со сверхвысокими скоростями // Динамика удара. – М. : Мир, 1985. – С. 173-197.
16. Трифионов В.Г. Живая тектоника голоцена // Вестник АН СССР. – 1987. – № 4. – С. 99-112.
17. Ударные кратеры на Луне и планетах / Базилевский А.Т., Иванов Б.А., Флоренский К.П. [и др.]. – М. : Наука, 1983. – 200 с.

18. Хомская И.В. Взаимодействие ускоренных взрывом порошковых частиц с металлическими преградами / И.В. Хомская, В.И. Зельдович, Н.Ю. Фролова, А.Э. Хейфец, С.М. Ушеренко // *Физика экстремальных состояний вещества* – 2002. – ИПХФ РАН, 2002. – С. 78-80.

19. Шевченко В.И., Арефьев С.С., Лукк А.А. Близвертикальные скопления очагов землетрясений, не связанные с тектонической структурой земной коры // *Физика земли*. – 2011. – № 4. – С. 16-38.

20. Constraints on the tectonic setting of the Andaman ophiolites, Bay of Bengal, India, from SHRIMP U-Pb zircon geochronology of plagiogranite / D. Srinivasa Sarma [et al.] // *J. Geol.* – 2010. – V. 118, No. 6. – P. 691-697.

21. Flood deposits penecontemporaneous with ~0.8 Ma tektite fall in NE Thailand: impact-induced environmental effects? / Peter W. Haines, Kieren T. Howard, Jason R. Ali, Clive F. Burrett, Sangad Bunopas // *Earth and Planet. Sci. Lett.* – 2004. – V. 225, No. 1. – P. 19-28.

22. Ford Ramsay J. An empirical model for the Australasian tektite field // *Austral. J. Earth Sci.* – 1988. – V. 35, No. 4. – P. 483-490.

23. Greeley R. Impact basins: Implications for formations from experiments / R. Greeley [et al.] // *LPI Contributions*. – 1980. – No. 414. – P. 18.

24. Irvine T.N. Global convection and Hawaiian upper mantle structure // *Carnegie Inst. Washington Year Book*. – 1991. – V. 90. – P. 3-11.

25. Mikhееva A.V. The new data of «Catalogue of the Earth's impact structures» // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2008. Suppl. 1. S19 (July 2008). 72 (12): A627-A627. DOI: 10.1016/j.gca.2008.05.016. – URL: <http://labmpg.sccc.ru/> (date of access: 28.06.2018).

26. Mikhееva A.V. The Central and South-East Asian geodynamic structures manifested in the seismicity and tomography data // *Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. Series: Math. Model. in Geophys.* – 2017. – V. 20. – P. 4-55.

27. Nishimura S., Harjono H., Suparka S. The Krakatau Islands: the geotectonic setting // *Geo Journal*. – 1992. – V. 28, No. 2. – P. 87-98.

28. Patriat P., Achache J. India Eurasia collision chronology has implications for crustal shortening and driving mechanism of plates // *Nature*. – 1984. – V. 311 (5987). – P. 615-621.

29. Remarques sur la repartition du volcanisme potassique quaternaire de Java (Indonesie) / Rubini Soeria-Atmadja [et al.] // *C. R. Acad. Sci. Ser. 2.* – 1988. – V. 2, No. 6. – P. 635-641.

30. Sandwell D.T. W.H.F. Smith Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge segmentation versus spreading rate // *J. Geophys. Res.* – 2009. – V. 114. P. B01411.

31. Schaeffer A.J., Lebedev S.I. Global shear speed structure of the upper mantle and transition zone // *Geophysical Journal International*. – 2013. – V. 194. – P. 417-449. DOI: 10.1093/gji/ggt095.

32. Sunardi E., Kimura J. Temporal chemical variations in late Cenozoic volcanic rocks around the Bandung Basin, West Java, Indonesia // *Ganko*. – 1998. – V. 93, No. 4. – P. 103-128.

33. The global heat flow database of the international heat flow commission : Site Provided by the University of North Dakota, 2015. – URL: [www.heatflow.und.edu/index2.html](http://www.heatflow.und.edu/index2.html) (date of access: 28.06.2018).

34. Vedder J.F., Mandeville J.-C. Microcraters formed in glass by projectiles of various densities // *Journal of Geophysical Research*. – 1974. – V. 79, No. 23. – P. 3247-3256.

### REFERENCES

1. Alekseev A.S., Petrenko V.E. Examples of numerical simulation of high-speed collision of solid bodies in the hydrodynamic approximation // Report / USSR Academy of Sciences. Computing Center; Theme «Light-2», Book 5: Research reflective-radiative characteristics of space debris in various ranges. Developing formation models and the evolution of cosmic objects and synthetic particles in near-Earth space. Novosibirsk, 1992. 191 p.

2. Vishnevsky S.A. Fluid thin-banded impact glasses in the suvits of some astroblemes (and among some tektites): accretion-mixing model of the formation of large impact events in the explosive cloud / S.A. Vishnevsky, L.N. Gilinskaya, S.M. Lebedeva, N.A. Palchik, L.N. Pospelov // *Ural. mineral. coll.* 2002. No 12. P. 234-310.

3. Vladkovsky V.N. Subvertical accumulation of earthquake hypocenters – seismic «nails» // *Vestnik ONZ RAS*. 2012. No. 4. NZ1001.

4. High-speed shock interaction of solid microparticles with a substrate / S.Yu. Ganigin, V.V. Kalashnikov, I.D. Ibatullin, A.Yu. Murzin, O.Yu. Glazunov, A.A. Grigoriev // *General Problems of Mechanical Engineering : Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2013. V. 15, No. 4 (2). P. 339-342.

5. Dobretsov N.L., Kidryashkin A.G., Kidryashkin A.A. Deep geodynamics. Novosibirsk Publishing House of the SB RAS. Branch «Geo», 2001. 409 p.

6. Zeilik B.S. Shock-Explosive Tectonics and a Plate Tectonic Synopsis. AlmaAta : Gylym, 1991. 58 p.

7. Zotkin I.T., Tsvetkov V.I. Search for meteorite craters on the Earth // *Solar System Research*. 1970. No. 1, Iss. 4. P. 5-65.

8. Makarov P.V. Model of ultra-deep penetration of solid particles into metals // *Physical mesomechanics*. 2006. V. 9, No. 3. P. 61-70.

9. Melosh H.J. Impact Cratering: A Geologic Process. M. : Mir, 1994. 245 p.

10. Mikheeva A.V. The geostructural elements revealed by mathematical algorithms and digital models of the geo-information-computational system GISENDDB. Novosibirsk : IPGG, 2016. 300 p.
11. Mikheeva A.V., Dyadkov P.G., Marchuk An.G. Geographic information system GIS-EEDB and methods of spatial-temporal analysis of seismological data // *Geoinformatics*. 2013. No. 2. P. 58-65.
12. Nigmatzyanov R.S. Galactic prime cause of boundaries in the history of the earth // *Domestic geology*. 2015. No. 3. P. 70-83.
13. Orlenko L.P. Physics of explosion and impact: a textbook for universities. M. : Fizmatlit, 2006. 304 p.
14. Rusakov M.M. Experimental modeling of meteorite impact // *Journal AMTP*. 1966. No. 4. P. 167-169.
15. Swift H.F. The mechanics of collisions with ultra-high speeds // *The dynamics of impact*. – M. : Mir, 1985. P. 173-197.
16. Trifonov V.G. Living Tectonics of the Holocene // *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR*. 1987. No. 4. P. 99-112.
17. Impact craters on the Moon and planets / A.T. Bazilevsky, B.A. Ivanov, K.P. Florensky [et al]. – M. : Science, 1983. 200 p.
18. Chomskaya I.V. Interaction of accelerated by an explosion powder particles with metal barriers / I.V. Chomskaya, V.I. Zeldovich, N.Yu. Frolova, A.E. Heifetz, S.M. Usherenko // *Physics of Extreme States of Matter*. IPCP RAS, 2002. P.78-80.
19. Shevchenko V.I., Arefjev S.S., Lukk A.A. Near-vertical clusters of earthquake sources not related to the tectonic structure of the Earth crust // *Physics*. 2011. No. 4. P. 16-38.
20. Constraints on the tectonic setting of the Andaman ophiolites, Bay of Bengal, India, from SHRIMP U-Pb zircon geochronology of plagiogranite / D. Srinivasa Sarma [et al.] // *J. Geol.* 2010. V. 118, No. 6. P. 691-697.
21. Flood deposits penecontemporaneous with ~0.8 Ma tektite fall in NE Thailand: impact-induced environmental effects? / Peter W. Haines, Kieren T. Howard, Jason R. Ali, Clive F. Burrett, Sangad Bunopas // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2004. V. 225, No. 1. P. 19-28
22. Ford Ramsay J. An empirical model for the Australasian tektite field // *Austral. J. Earth Sci.* 1988. V. 35, No. 4. P. 483-490.
23. Greeley R. Impact basins: Implications for formations from experiments / R. Greeley [et al.] // *LPI Contributions*. 1980. No. 414. P. 18.
24. Irvine T.N. Global convection and Hawaiian upper mantle structure // *Carnegie Inst. Washington Year Book*, 1991. V. 90. P. 3-11.
25. Mikheeva A.V. The new data of «Catalogue of the Earth's impact structures» // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2008. Suppl. 1. S19 (July 2008). 72 (12): A627-A627. DOI: 10.1016/j.gca.2008.05.016. URL: <http://labmpg.sccc.ru/> (date of access: 28.06.2018).
26. Mikheeva A.V. The Central and South-East Asian geodynamic structures manifested in the seismicity and tomography data // *Bulletin of the Novosibirsk Computing Center, Series: Math. Model. in Geophys.* 2017. Vol. 20. P. 4-55.
27. Nishimura S., Harjono H., Suparka S. The Krakatau Islands: the geotectonic setting // *Geo Journal*. 1992. V. 28, No. 2. P. 87-98.
28. Patriat P., Achache J. India–Eurasia collision chronology has implications for crustal shortening and driving mechanism of plates // *Nature*. 1984. V. 311 (5987). P. 615-621.
29. Remarques sur la repartition du volcanisme potassique quaternaire de Java (Indonesie) / Rubini Soeria-Atmadja [et al.] // *C. R. Acad. Sci. Ser. 2*. 1988. V. 2. No. 6. P. 635-641.
30. Sandwell D.T., Smith W.H.F. Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge segmentation versus spreading rate // *J. Geophys. Res.* 2009. V.114. P. B01411.
31. Schaeffer A.J., Lebedev S.I. Global shear speed structure of the upper mantle and transition zone // *Geophysical Journal International*. 2013. V. 194. P. 417-449. DOI: 10.1093/gji/ggt095.
32. Sunardi E., Kimura J. Temporal chemical variations in late Cenozoic volcanic rocks around the Bandung Basin, West Java, Indonesia // *Ganko*. 1998. V. 93, No. 4. P. 103-128.
33. The global heat flow database of the international heat flow commission. Site Provided by the University of North Dakota, 2015. URL: [www.heatflow.und.edu/index2.html](http://www.heatflow.und.edu/index2.html) (date of access: 28.06.2018).
34. Vedder J.F., Mandeville J.-C. Microcraters formed in glass by projectiles of various densities // *Journal of Geophysical Research*. 1974. V. 79, No. 23. P. 3247-3256.