

# КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ О ПРИРОДНЫХ КАТАСТРОФАХ ЗЕМЛИ

А. В. Михеева

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск*

УДК 519.254; 551.24; 552.6

В статье рассматривается наукоемкая программная система GIS-ENDDB [1], ориентированная на исследование причинно-следственных связей катастрофических событий в истории нашей планеты. Информационное обеспечение системы содержит данные о сейсмической активности Земли, тепловом потоке, детальном рельефе и аномалиях гравитационного поля и глубинной томографии, а также данные о параметрах космогенных структур. Рассмотрена функциональная структура программной системы и результаты использования её алгоритмов для анализа геодинамического процесса. Комплекс алгоритмов позволяет рассчитывать и визуализировать карты и диаграммы геофизических наблюдений, характеристики сейсмического процесса и режима кратерообразования, например, параметры энергии сейсмической активности (рис. 1), повреждаемости среды, кластеризации природных явлений. Среди последних изменений в подсистемах информационно-математического программного обеспечения — функции визуализации в разрезе характеристик сейсмического режима и данных томографии на глубинах до 700 км. В примерах анализа данных показано использование средств GIS-ENDDB при геодинамическом исследовании территорий глобального масштаба.

**Ключевые слова:** морфоструктурные элементы, геофизические аномалии, экспертная геоинформационная система, каталоги землетрясений и импактных структур.

## Введение

Различные эндогенные (происходящие в недрах Земли) и экзогенные (например, последствия ударного воздействия) геологические процессы меняют внешний и внутренний облик нашей планеты и связаны с глобальными катастрофическими событиями её 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 некоторых регионов. Для решения задач, ориентированных на исследование причинно-следственных связей процессов, влияющих на региональную геодинамику, разработана Программная система GIS-ENDDB (Earth's Natural Disasters Database — база данных природных катастроф Земли [1].

## 1 Информационное наполнение системы

Информационная база системы содержит данные импактного каталога Земли [2], 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.

Сейсмологическая база данных включает в себя каталоги NEIC и Significant (геофизической службы USGS), ISC (Международной сейсмологической службы ISC), а также созданный автором комплексный

азиатский каталог COMPLEX, объединяющий детальные каталоги ФИЦ ЕГС РАН (Геофизической службы РАН) ряда азиатских и дальневосточных областей и каталог китайской сейсмографической сети CSN, благодаря чему 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 теневой модели рельефа поверхности Земли высокого разрешения в систему ENDDDB включены массивы высот рельефа ASTER GDEM (Global Digital Elevation Model) с 1-секундным разрешением. Для построения карт аномалий геофизических полей используются данные “Global marine gravity” V18.1 (гравитационного поля) [3], “The global heat flow database of the international heat flow commission” (данные измерений теплового потока Университета Северной Дакоты) [4], а также 3D модель “SL2013sv” (скоростная модель томографии по  $S_V$  — волнам) [5].

## 2 Процедуры выявления глубинных геодинамических структур

К методам физико-математического анализа, реализованного в GIS-ENDDDB, относятся основные положения теории вероятности и математической статистики, физические законы разрушения сплошности среды, другие достижения отечественных и зарубежных авторов в предметной области исследования (например, [6]).

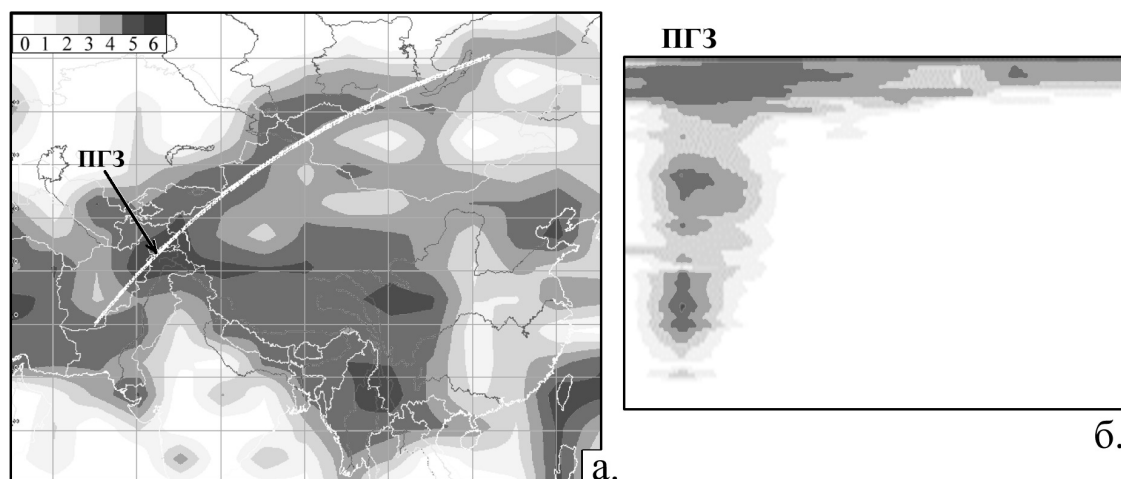


Рис. 1: Изолинии суммарной сейсмической энергии по данным каталога COMPLEX,  $4 \leq M_S \leq 8$ : а — на единицу площади (ячейка усреднения  $3 \times 5^\circ$ , изолиниям  $0, 2, \dots, 6$  соответствуют верхние значения  $E = 45 \cdot 10^4, 47 \cdot 10^5, 49 \cdot 10^6, 52 \cdot 10^7, 54 \cdot 10^8, 57 \cdot 10^9$  Дж/год/км<sup>2</sup>); б — в разрезе по профилю вдоль “Афро-Байкальского” линеамента (а), глубина разреза 300 км

Методы графического и пространственно-временного анализа основных характеристик сейсмо-геодинамического процесса дополнены функциями их распределения в разрезе по назначенным пользователем разнонаправленным профилям, что позволяет, например, установить приуроченность сейсмичности к земной коре или падающим слоям, проникающим в верхнюю мантию (рис. 1б), к глубинным структурам томографического разреза; а также установить наличие корреляции по времени глубинных и коровых землетрясений. Кроме того, в среде GIS-ENDDDB развиваются алгоритмы, выявляющие группирование событий в пространственном и пространственно-временном диапазоне (афтершоки, рои, эллипсы рассеяния, кластеры, цепочки и, наконец, линеаменты) [1], [8].

Всё это помогает расширить классические методы геотектонического исследования комплексным научно-экспериментальным подходом, позволяющим выделять современные тектонически-активные границы и разломы, изучать пространственную взаимосвязь сейсмичности и космогенных палео-структур (связанных с историческим прошлым Земли) и, в конечном итоге, интерпретировать данные с точки зрения построения сейсмо-геодинамических моделей литосферы. Например, сопоставление результатов формализованного расчета линеаментов с картами реальных геофизических проявлений и с данными анализа характеристик сейсмического режима позволяют выдвигать модели развития глобальных тектоногенных процессов (рис. 2).

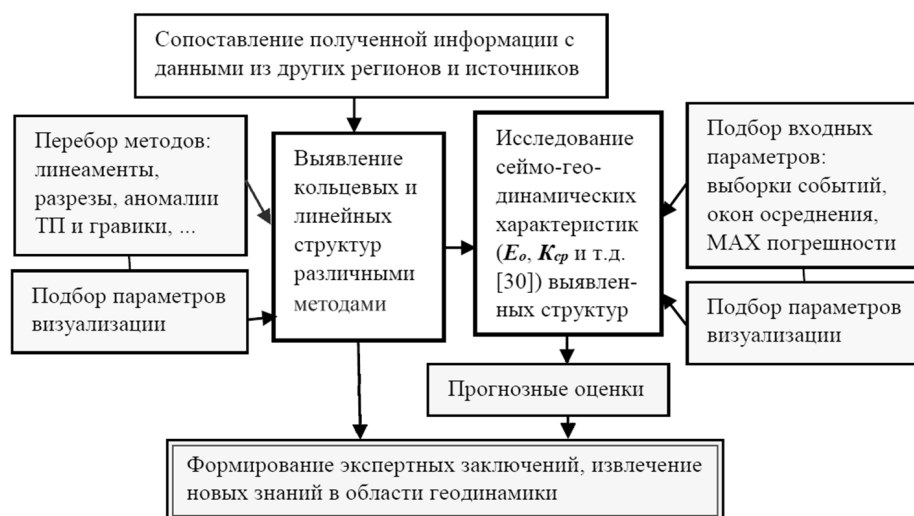


Рис. 2: Сценарий использования алгоритмов GIS-ENDDB для «геоинформационно-экспертного» анализа данных о природных катастрофах Земли

### 3 Алгоритм GIS-ENDDB построения глобальных линеаментов сейсмичности

Большое значение в наших исследованиях имеют алгоритмы линеаментных построений [8]. Один из этих алгоритмов, выявляющий линеаменты по большим кругам (БК) Земли предполагает, что на глобальном уровне разрушение среды происходит по сегментам большого круга Земли, если протяженный разрыв в консолидированной коре преодолевает слой Мохоровичича. На основании реализованных в GIS-ENDDB алгоритмов, по крупным землетрясениям Центральной Азии (каталог SIGN) на временном интервале 2250 лет выявляется центрально-ориентированная система глобальных линеаментов, включающая наиболее протяженный “Афро-Байкальский” линеамент (соответствующий Внутриазиатскому горному поясу) [8] (линеамент нанесен на рис. 1а, 4). Центром крестообразного схождения линеаментов этой системы является Памиро-Гиндукушская сейсмофокальная зона (ПГЗ) (рис. 1), уникальная, практически единственная на Земле узко-локализованная глубинная область в континентальных условиях, где происходит несколько тысяч землетрясений в год (с максимальной плотностью событий на глубинах 200–250 км, рис. 1б).

Существование разломной зоны, соответствующей “Афро-Байкальскому” (АБ) линеаменту, считается в настоящее время спорным, поскольку АБ-линеамент сечёт большое множество известных поперечных разломов субширотного и северо-западного простираения (особенно, в области Алтая и Саян). Это противоречие устраняется, если предположить и подтвердить геофизическими наблюдениями существование глубинного супер-разлома, соответствующего АБ-линеаменту, а многочисленные поперечные разломы интерпретировать как его производные в более хрупком верхнем слое земной коры.

Для исследования глубинных сейсмогенных структур спорного генезиса в GIS-ENDDB включены процедуры визуализации данных глубинной томографии на картах оттенённого рельефа (по слоям, с шагом по глубине 25 км) и в разрезах по профилям, выбранным пользователем.

Результаты подтвердили существование глубинной “разуплотненной” разломной зоны на протяжении “Афро-Байкальского” линеамента (линейной аномалии пониженных значений поля скоростей  $S_V$ -волн, проявившейся на глубинах 35–75 км). Данные томографии дали косвенное объяснение и обнаруженной ранее [7] корреляции сейсмо-геодинамического режима областей “Афро-Байкальского” глубинного разлома (Байкальской рифтовой зоны (БРЗ), Алтайской складчатой области, ПГЗ) с активностью таких регионов, как Дальневосточная и Западно-Тихоокеанская зоны субдукции.

### 4 Взаимная корреляция удаленных крупных землетрясений

В работе [7] была отмечена временная корреляция по количеству выделенной энергии в Байкальском регионе и зоне субдукции на Дальнем Востоке с 1945 по 2000 годы, что позволяет предположить межрегиональную

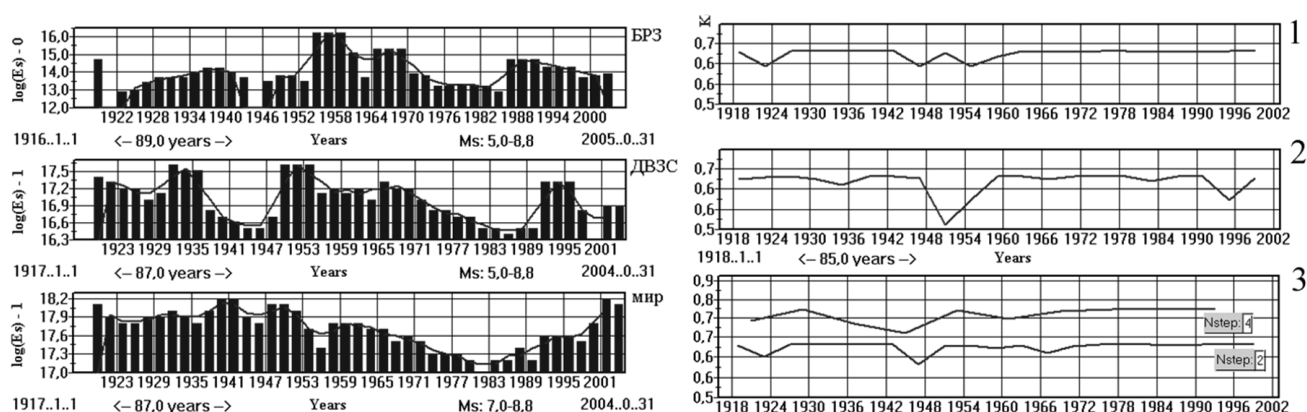


Рис. 3: Корреляция землетрясений Центральной Азии, Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) и Дальневосточной зоны субдукции (ДВЗС): графики суммарной энергии ( $\lg E$ ) в БРЗ, ДВЗС и по всему миру (слева) и графики коэффициента корреляции между ними (справа): 1 — между БРЗ и ДВЗС, 2 — между ДВЗС и миром, 3 — между БРЗ и миром (с шагом расчета 4 и 2)

взаимосвязанность процессов, сообщающихся через механизм триггерных воздействий. В частности, отмечено совпадение по времени землетрясений Токачи-оки (25.9.2003,  $M_W=8.3$ ) в зоне Западно-Тихоокеанской субдукции и Чуйского (27.9.2003,  $M_W=7.3$ ), произошедшего на расстоянии 4300 км на Алтае [7].

Исследованиями в среде GIS-ENDDB также выявлены факты «переключки» весьма удалённых друг от друга землетрясений БРЗ и Дальневосточной зоны субдукции (рис. 3). Кривая коэффициента корреляции  $K_{kop}$  между усреднёнными графиками суммарной сейсмической энергии, выделенной в Байкальском регионе и в зоне субдукции на Дальнем Востоке всего периода инструментальных наблюдений (1917–2004гг), показывает устойчивость значения  $K_{kop} = 0.6–0.7$  (даже при минимальном шаге расчёта — 2 столбца). Отметим, что алгоритм расчета предполагает задание трех параметров:

- диапазон усреднения —  $N_{ocp}$  (количество столбцов для расчёта среднего значения энергии  $E_{ocp}$ ),
- количество столбцов для расчёта коэффициента —  $N_{point}$ ,
- шаг расчёта коэффициента —  $N_{step}$  (при отсутствии перекрытия окон расчёта принимается  $N_{point} = N_{step}$ ).

Формула расчёта коэффициента корреляции:

$$K_{kop} = \frac{\sum_N \Delta E_{ocp} / N}{\sum_N \Delta E_{ocp}^2 / N}, \quad \text{где } N = N_{point}. \quad (1)$$

Причиной выявленных корреляций между различными, как считалось ранее, геодинамическими структурами предполагалось [7] формирование накануне сильнейших событий на территории между ними единого регионального поля напряжений в литосфере (до глубин, достигающих астеносферу) [7]. Однако, в результате исследования с привлечением данных томографии выдвинуто другое объяснение - все связанные временной корреляцией события принадлежат к единому геотектоническому образованию.

Действительно, по данным томографии на глубине 125 км выявляется единая межрегиональная  $\Omega$ -образная структура (рис. 4), включающая в себя Байкальскую рифтовую зону, Алтайскую складчатую область, Памиро-Гиндукушскую, Зондскую, Западно-Тихоокеанскую и Дальневосточную сейсмофокальные зоны и Тайвань-Филиппинскую дугу. Структура характеризуется строгой симметрией, проявляющейся не только в конфигурации границ плит (дополненной АБ-линеamentом), в распределении сейсмичности и подводных вулканов, но и в аномалиях гравиметрии. Один из центров структуры, отмечаемый по данным томографии глубинным гвоздеобразным образованием под полуостровом Индокитай (рис. 4а), указывает на предположительно ударную причину её образования, о чем свидетельствуют скоростные аномалии: наличие аномального («разуплотненного») кольца вокруг указанного «высокоплотностного» центра, единого кратерного вала и промежуточного вала (центрального хребта), встречаемых в осесимметричных кратерах с двойным ударом [11].

О том, что рассматриваемая структура может существовать в качестве единого геодинамического образования, могла бы свидетельствовать корреляция между коровыми и глубокофокусными землетрясениями в пределах этой структуры. Ранее подобная корреляция отмечалась, например, в Западно-Тихоокеанской зоне субдукции [9]: «коровые землетрясения предваряются возрастанием глубинной сейсмической активности, а сильный толчок возникает после глубинной активизации».

Нами подобная взаимосвязь была обнаружена в пределах «Афро-Байкальского» (АБ) сейсмического линеймента, включающего сейсмофокальную область ПГЗ. Как показывают графики временного распределения землетрясений (рис. 4б), все крупнейшие события ( $M_W \geq 7$ ), входящие в полосу линеймента, предваряются столь же крупными глубинными землетрясениями в ПГЗ. Так, за полтора года до Чуйского события в ПГЗ произошло два глубокофокусных землетрясения (3.3.2002: с  $M_W=7$  и  $M_W=7.4$ ) на глубинах  $H = 209$  и  $225$  км, после чего до 2004г по сильнейшим глубинным событиям в ПГЗ наступило затишье. Отметим, что накануне «парного» к Чуйскому событию землетрясения Токачи-оки (близ о.Хоккайдо) также произошло два глубокофокусных события под побережьем Приморья и Охотским морем (28.6.2002 и 17.11.2002: с  $M_W=7.3$ ) на глубинах  $H = 566$  и  $459$  км. Накануне последнего сильнейшего землетрясения области АБ-линеамента — 7 декабря 2015 в Таджикистане ( $M_W=7.2$ ) также произошло глубокофокусное событие в ПГЗ (26.10.2015,  $M_W=7.5$ ) на глубине  $H = 213$  км.

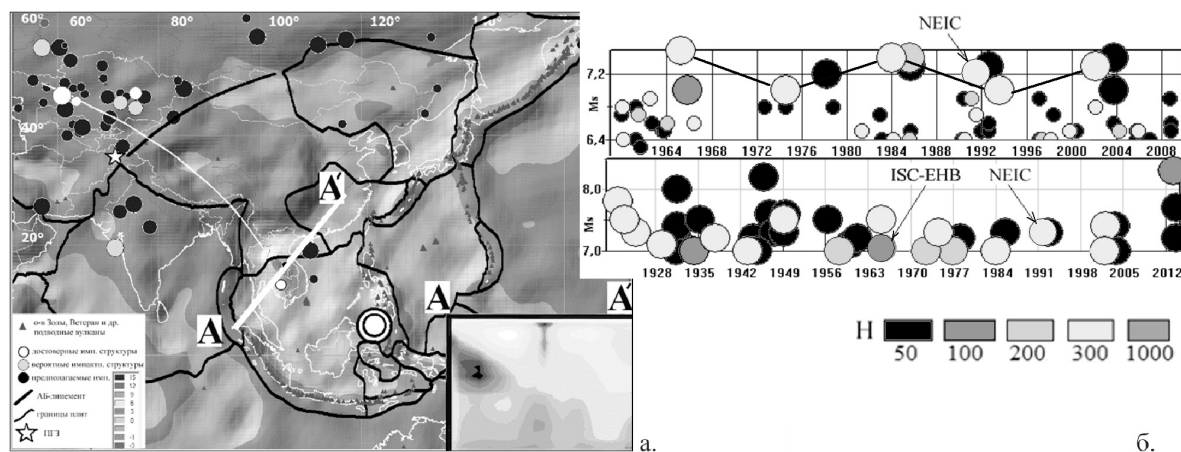


Рис. 4: Поле скоростей  $S_V$ -волн на глубине 125 км, разрез  $AA'$  до глубины 700 км и графики распределения по времени крупных событий в  $\Delta h$ -полосе «Афро-Байкальского» сейсмического линеймента (отмеченного черной дугой): а —  $\Omega$ -образная структура, выявляемая в рельефе скоростного поля; б — сверху: магнитуды землетрясений по данным ISC-EHB за 1960-2009гг для  $M_W \geq 6.4$  (одно событие добавлено из NEIC); внизу — магнитуды землетрясений по данным ISC за 1920-2013гг для  $M_W \geq 7$  (2 события добавлены из ISC-EHB и NEIC). Белой дугой отмечена возможная траектория выпадения космического «дождя», пересекающая область максимальной плотности достоверных и предполагаемых импактных структур

Как показывает график 4,б (внизу), за весь период инструментальных наблюдений в области полосы АБ-линеамента (по данным наиболее полного глобального каталога ISC) за крупнейшими глубинными событиями (или их сериями - для более ранней части графика) следуют столь же сильные коровые ( $H \leq 50$ ) события.

Возвращаясь к упомянутой выше  $\Omega$ -образной структуре, мы также обнаруживаем в её пределах 100-процентную корреляцию между всеми глубинными ( $M_W \geq 8$ ) и коровыми ( $M_W \geq 7$ ) событиями с временем задержки не более 1,5 года.

Отметим, что на графике 4,б (вверху) заметна ещё одна закономерность распределения по времени сильнейших глубинных землетрясений ( $M_W \geq 7$ ,  $H=200-300$  км) сейсмофокальной зоны Памира-Гиндукуша (по данным каталога ISC-EHB, наиболее очищенного и уточнённого по глубинам) — их периодичность с периодом 9-11 лет. Предполагается, что подобная периодичность может быть связана с космогенным фактором (11-летним циклом солнечной активности), с которым, например, соотносят 9-15-летние циклы повышенной активности магматических вулканов.

Восприимчивость активности глубинных землетрясений (достигающих глубин астеносферного слоя) тем же факторам, что и активность вулканов; а также узкая локализация этих землетрясений, формирующих так называемые «сейсмические гвозди» [10] (рис. 1б, врезка на рис. 5а) и закономерная передача деформаций от

них коровым землетрясениям позволяют предположить приуроченность глубокофокусных землетрясений к глубинным каналам субвертикального движения мантийного материала. Эти каналы должны иметь особые реологические свойства, вызывающие их повышенную сейсмическую активность и поддерживающие триггерный механизм передачи напряжений в верхние слои литосферы с последующим их распространением вдоль глубинного разлома. Данные томографии подтверждают наличие таких каналов в мантии, достигающих глубин от 400 до 700 км (рис. 5).

## 5 Глубинные структуры в литосфере и астеносфере по данным томографии

Известно, что в зонах субдукции «часть океанической литосферы (преимущественно мантийные породы) пододвигается под континенты» (рис. 5). С другой стороны, по данным сейсмичности можно предположить существование отдельных локальных областей погружения литосферных масс на глубинах от 400 до 700 км (врезка на рис. 5а). Оба эти процесса фиксируются данными томографии и графиками относительного количества землетрясений различного механизма. Графики показывают, что процесс пододвигания характеризуется преимущественно механизмом сжатия (график на рис. 5а), а процесс погружения — механизмом растяжения (рис. 5б).

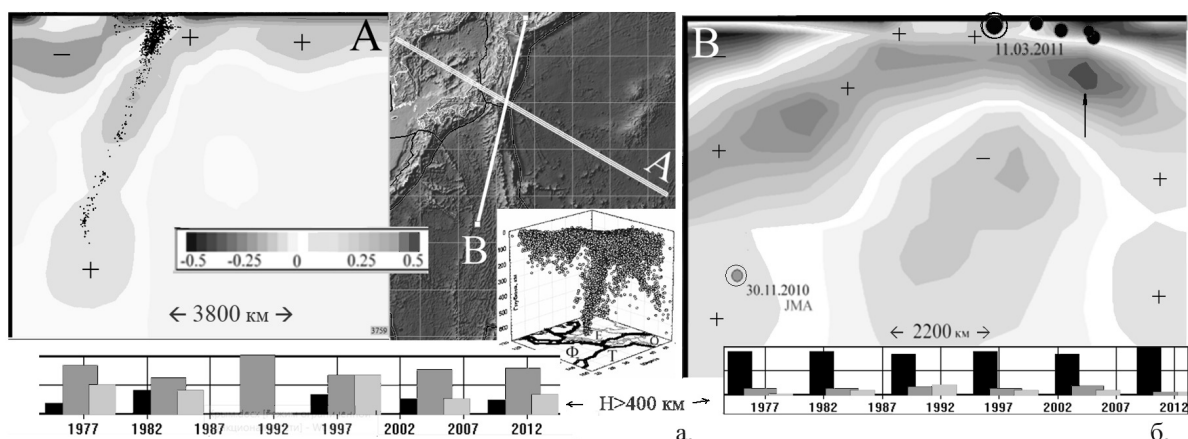


Рис. 5: Структуры «пододвигания» и «погружения» на разрезах  $S_V$ -полей (на цветовой шкале указаны возмущения в % к базовой скорости  $S_V$ , отмеченные на разрезах знаками + и -): а — канало-образная структура пододвигания океанических масс под Японское море (разрез по профилю А). Черными точками нанесены землетрясения; во врезке — канало-образное распределение сейсмичности в зоне пересечения Филиппинской, Тихоокеанской и Евразийской плит по [10], включающее все три показанных (а, б) канала, б — пододвигание и погружение Тихоокеанской плиты в области Курильско-Марианского структурного угла (разрез по профилю В); кружками нанесены землетрясения с  $M \geq 7$ , включая ВВЯЗ и его глубинный предвестник. Глубина разрезов  $H=700$  км. Ниже показаны графики относительного количества землетрясений различного механизма в районе «Японского» (слева) и «Идзу-Марианского» (справа) каналов в переходном слое ( $H \geq 400$  км): чёрным — сбросы, серым — взбросы, светлосерым — сдвиги

Как показывает разрез рисунка 5 (б), хотя Великое Восточно-Японское землетрясение (ВВЯЗ, 11.03.2011,  $M_W=9.0$ ) принадлежит более неоднородному (в поле скоростей) верхнему слою литосферы, в отдельных точках очага очевидна идентичность его плотностных и, скорее всего, упругих свойств с нижними слоями, где слева наблюдается «Идзу-Марианский» канал пододвигания (до 400 км) и последующего погружения (при  $H \geq 400$  км), в котором произошло глубинное землетрясение за 3 месяца до ВВЯЗ (30.11.2010,  $M_W=7.1$ ,  $H=494$  км) (даты этих землетрясений отмечены на рис. 5б). Отметим, что и в «Японском» (ортогональном «Идзу-Марианскому») канале (рис. 5а), который отражает процесс пододвигания масс на всем своем протяжении (вплоть до  $H=650$  км), накануне ВВЯЗ также произошло глубинное землетрясение 18.02.2010,  $M_W=6.9$  (за год до катастрофического события) на глубине 577 км (область пересечения «Японского» канала с плоскостью разреза 5 (б) расположена правее и ниже ВВЯЗ в виде положительной скоростной аномалии, показанной на разрезе стрелкой).

Следовательно, глубинные события, даже произошедшие на глубинах  $H \geq 400$  км могут передавать напряжения и деформации на верхние (в том числе, и коровые) уровни вдоль каналов с особыми реологическими свойствами. Таким образом, вероятно, и происходит взаимосвязь полей напряжений коровых и мантийных слоев (рис. 5), объединяющая удаленные события в единую геодинамическую систему.

## Заключение

Программная оболочка GIS-ENDDB в процессе своего развития постепенно преобразовалась из информационной системы географической визуализации базы данных катастрофических событий в наукоёмкую экспертную систему. В результате ENDDDB кроме исторических каталогов и графической оболочки Земли стала представлять собой целый комплекс исследовательских методик. В примерах анализа данных показано использование принципов геоинформационного и экспертного подхода [11] в исследованиях геодинамического режима территорий глобального масштаба.

## Список литературы

- [1] Mikheeva A.V., Marchuk An.G., Dyadkov P.G. Geoinformation Systems for Studying Seismicity and Impact Cratering using Remote Sensing Data // in Book: "Geographic Information Systems (GIS): Techniques, Applications and Technologies". Nova Science Publishers, 2014. P. 151-216 Вальковский В. А., Малышкин В. Э. Синтез параллельных программ и систем на вычислительных моделях. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1988.
- [2] Mikheeva A.V. The new data of "Catalogue of the Earth's impact structures" // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Suppl.1. S19 (July 2008). V. 72 (12): P. A627–A627.
- [3] 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.
- [4] 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).
- [5] Schaeffer A. J. Lebedev S. 1. Global shear speed structure of the upper mantle and transition zone // *Geophysical Journal International*. 2013. Iss. 194. P. 417–449. DOI: 10.1093/gji/ggt095
- [6] Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений. Основы, методика, реализация. М.: Наука, 2006. 254 с.
- [7] Дядьков П.Г. Закономерности в изменениях напряжённого состояния земной коры и сейсмического режима в Байкальском регионе в условиях влияния процессов на ближайших конвергентных границах плит // Всероссийское совещание «Современная геодинамика...» (20–23 сентября 2005 г). Иркутск, 2005. С. 174–180.
- [8] Kalinnikov I.I., Mikheeva, A.V. Algorithms of building lineaments in the program GIS-ENDDB // *Bulletin of Novosibirsk Computer Center, Series: Mathematical Models in Geophysics*. 2016. Iss. 13, P. 1–9.
- [9] Mogi K. Deep seismic activities preceding the three large 'shallow' earthquakes off south-east Hokkaido, Japan - the 2003 Tokachi-oki earthquake, the 1993 Kushiro-oki earthquake and the 1952 Tokachi-oki earthquake // *Earth Planets Space*. 2004. No. 56. P. 353–357.
- [10] Владковский В.Н. Субвертикальные скопления гипоцентров землетрясений - сейсмические "гвозди" // *Вестник ОНЗ РАН*. 2012. № 4. NZ1001.
- [11] Михеева А.В. Геоструктурные элементы, выявляемые математическими алгоритмами и цифровыми моделями геоинформационно-вычислительной системы GIS-ENDDB. Новосибирск: Омега Принт, 2016. 300 с. [elibrary.ru/item.asp?id=27622389](http://elibrary.ru/item.asp?id=27622389).

*Михеева Анна Владленовна — к.ф.-м.н., науч.сотр. Института  
вычислительной математики и математической геофизики СО РАН;  
e-mail: [anna@omzg.ssc.ru](mailto:anna@omzg.ssc.ru).*

*Дата поступления — 10 мая 2017 г.*