

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУР РАЗЛИЧНОГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ГЕНЕЗИСА СРЕДСТВАМИ ГИС-ENDDB

Анна Владленовна Михеева, канд. физ.-мат. наук, науч. сотр.

E-mail: Anna@omzg.sscc.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМиМГ СО РАН)

http://www.sscc.ru

Данные дистанционного зондирования Земли по гравиметрии и детальной топографии, недавно реализованные в геоинформационной программной системе изучения исторических стихийных бедствий ENDDB, позволяют решать множество новых задач, таких как подтверждение на фактографическом материале открытых в последнее время новых диагностических морфоструктурных признаков астроблем, а также выявление закономерностей, связанных с геоморфологией различных сейсмогенных структур.

Ключевые слова: геоморфология, типичные морфологические элементы, ударный кратер, сейсмичность, каталог, аномалии силы тяжести.

Введение

В конце 80-х гг. прошлого века в Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (тогда Вычислительном центре СО АН СССР) была разработана и создана первая пользовательская система численного моделирования волн цунами с элементами ГИС [1]. Позже на ее базе автором была создана одна из первых ГИС-систем по визуализации сейсмо- и цунами-каталогов и их первичному анализу: «База данных землетрясений и цунами для Курило-Камчатского региона» [2]. Впоследствии эта разработка была рекомендована в качестве прототипа для создания региональных баз данных по проблеме цунами на XV сессии международной координационной группы МОК ЮНЕСКО по системе предупреждения цунами на Тихом океане [3]. К 1994-му году программная система развилась в экспертную систему визуализации данных землетрясений и цунами [4], где наряду с улучшением цифровой картографии были реализованы подпрограммы более глубокого анализа данных по различным рода выборкам из БД, в частности, построение графиков повторяемости землетрясений и цунами, а также карт сейсмической и цунами-активности. Все эти изменения проводились в рамках программы ETDB (Expert Tsunami Database). Дальнейшая модификация этой географической оболочки: пополнение базы данных большим списком сейсмологических каталогов различной детальности и масштаба, а также разработка (в соавторстве с П.Г. Дядьковым) ряда алгоритмов по анализу данных сейсмичности привели к созданию отдельной экспертной системы по исследованию сейсмичности EEDB (Expert Earthquake Database) [5].



А.В. Михеева

Последующие изменения подпрограмм ГИС EEDB связаны с охватом новых предметных областей геологии и геофизики. Добавление новых данных дистанционного зондирования Земли позволили расширить круг решаемых задач и создать геоинформационную систему изучения исторических стихийных бедствий ENDDB (the Earth's Natural Disasters Database). При этом все перечисленные прототипы: ETDB, EEDB, как и ENDDB, сохранили первоначальную структуру, представляя собой совокупность трех взаимодействующих программных блоков: системы управления базами данных соответствующей предметной области (цунами, землетрясений, или импактных структур), географической подсистемы, и подсистемы анализа данных. Наиболее ранний прототип содержал БД землетрясений и цунами, последняя версия (ENDDB) базы данных землетрясений и импактных структур. Все подсистемы объединены единым

пользовательским интерфейсом. Интерфейсная часть претерпела за эти годы значительные изменения от функционирующей в среде MS-DOS графической оболочки, ограниченной разрешающими способностями графических адаптеров EGA и VGA, до отвечающей современным стандартам Windows системы меню и диалоговых окон [6]. В настоящее время автором осуществлена адаптация всех подсистем GIS-EEDB к 64-разрядной платформе и разработана новая версия пакетов GIS-EEDB и ENDDB [7] для Windows 7 и 8. Для этой же платформы сотрудником Дагестанского филиала ГС РАН М. Магомед-Касумовым в начале 2014 г. разработан новый конвертор сейсмологических форматов.

Перечислим основные характеристики ГИС ENDDB. Полный объем автоматически сгенерированного и авторского кода программы ГИС составляет около 23 МБ и состоит из ~240 классов. Система ENDDB может быть установлена с исходного носителя на любой компьютер на базе Win32 или 64-разрядной платформы (включая Windows 1995–2010 NT/XP и Windows 7–8) и требует около 4 Гб памяти на жестком диске. Отдельные части и прототипы системы ENDDB: базы данных предметной области и программные комплексы, входящие в ее состав, запатентованы в Государственном регистре БД, Фонде алгоритмов и программ СОРАН и в Роспатенте (5 патентов на БД, программы и алгоритмы за 2007–2011 гг.), а сейсмологический прототип ГИС EEDB внедрен в ГС РАН и его филиалы (5 Актов о внедрении за 2012–2013 гг.).

Перечисленные расширения в географической и предметной базах данных системы ENDDB позволяют решать множество новых задач, таких как подтверждение на фактографическом материале открытых в последнее время новых диагностических морфоструктурных признаков астроблем (по «Каталогу импактных структур Земли» [8]), а также выявление закономерностей, связанных с геоморфологией различных сейсмологических структур (по сейсмологическим каталогам).

Так, исследование наиболее полного мирового Каталога [8] с помощью реализованных в системе ГИС-технологий позволило выявить типичные, многократно повторяющиеся особенности рельефа импактных структур, и путем сравнения различных элементов этих структур оценить их надежность, как диагностических признаков астроблем. Что касается математических методов исследования пространственно-временного распределения сейсмичности, унаследованных от системы GIS-EEDB (расчет графика повторяемости событий, построение карт и графиков распределения различных параметров сейсмичности во времени, пространстве и друг относительно друга), то они служат первому этапу исследования сейсмичности – выявлению пространственно-временного группирования событий. Впоследствии, выявленные этими алгоритмами сейсмические структуры необходимо подтверждать геолого-геофизическими наблюдениями. Для решения этих задач в рамках проекта ENDDB создана база данных геолого-геофизической информации, содержащая гравиметрическую пространственную модель, цифровую модель рельефа повышенной детальности (по современным данным ДЗЗ), слои сейсмических линеаментов, разломов, трещин земной коры, выявленных различными геолого-геофизическими методами, и т.д.

Геоинформационные данные и технологии системы ENDDB

Методы графической и картографической визуализации данных, унаследованные от прототипов системы ENDDB, позволяют визуализировать выборки каталогов на карте псевдотрехмерного рельефа (как в соответствии с задаваемой легендой, так и в масштабе карты). Для построения теневой модели рельефа в ENDDB используются массивы промеров высот рельефа ASTER GDEM (Global Digital Elevation Model) агентства NASA, а также технология цифровой картографии [6], заключающаяся в тонировании точек поверхности в зависимости от их яркости при боковом освещении поверхности.

В связи со значительно выросшим объемом хранимой информации по детальному рельефу, разработана методика фрагментарного добавления детальных данных ASTER GDEM, имеющих в свободном доступе в сети Интернет, в среду системы ENDDB. Эта операция необходима, т.к. внедрение в среду единого файла данных по рельефу всего мира столь высокого разрешения было бы неоправданно с точки зрения эффективности

работы системы (его размер составил бы $1,62 \times 10^{12}$ байт). Включение же необходимого массива детальных данных для района рассматриваемой локальной структуры составляет всего несколько минут и включает скачивание файлов по выбранной географической области, конвертацию исходных форматов этих файлов в формат ENDDB с помощью специально разработанной программы-конвертора и внесение соответствующих изменений в текстовый файл описания.

Не считая упомянутых фрагментов, в системе ENDDB имеются глобальные данные следующего разрешения. По рельефу – это массивы мировых данных GTOPO-30 [9] с 30-секундным разрешением и SRTM-90 с 3-секундным разрешением по территории России.

Для построения теневой модели поля гравитационных аномалий в ENDDB внедрены данные “Global marine gravity” в виде моделей V16.1 и V18.1 [10]. Эти модели, представляющие собой массивы точек значений гравиметрии, имеют одинаковую размерность, но различаются по качеству информации. В модели V16.1 приемлемое разрешение имеют лишь данные по акватории Земного шара, в то время как в модель V18.1 добавлены более подробные данные по суше и произведено уточнение данных в прибрежных регионах акватории с учетом интерполяции, что сделало эту модель более однородной. Полученное разрешение модели V18.1 неоднородно лишь в широтном направлении благодаря свойству исходной проекции предоставляемых данных – проекции Меркатора, приводящей к искажению площадей и преобразуемой нами в прямоугольную (т.е. в равноугольную цилиндрическую-секущую) проекцию. В результате разрешение увеличивается от экватора к полюсам, но в среднем составляет 30 сек. на точку. Сравнение с более поздней моделью V21.1 не выявило изменений в детальности сетки. Источником данных гравиметрии являются миссии ERS-1 и Geosat/GM, а также глобальная модель гравитационных аномалий EGM-2008 [11].

Методика ГИС-исследования морфоструктурных элементов геологических объектов средствами ENDDB заключается в подборе оптимальных параметров луча «подсветки», глубины тени и градации базовых цветов при построении теневой модели на регулярной сетке значений. Этот подход позволяет не только получить наиболее четкие объемные изображения ландшафта и графики, но и собрать материал для установления типовых морфоструктурных признаков визуальной идентификации кольцевых структур космического происхождения, а также блоковых или линейных структур сейсмичности (линементов), выявляемых средствами математического анализа пространственного распределения сейсмичности.

Для изучения формы рельефа кратеров помимо упомянутой теневой модели 3D-рельефа использовались спутниковые снимки программы Google Earth и ее отечественного аналога Imp.ITRIS [12]. В настоящее исследование были включены только те структуры Каталога [8], которые находятся в благоприятных условиях, обеспечивающих повышенную сохранность их рельефа, а именно, располагающиеся в тектонически-устойчивых районах выхода древних щитов и платформ с минимальным проявлением эндогенных процессов и отсутствием мощного покрова рыхлых отложений.

Недавно добавлено алгоритмическое расширение ENDDB для пересчетов исходного гравитационного поля с целью сглаживания влияния рельефа, а также для выявления региональной составляющей гравитационного поля, которая, например, может отражать мантийные неоднородности [13], определяющие основные структурные элементы с сейсмически активными границами. Для разделения поля на региональную и локальную составляющие использован способ вариаций или способ Андреева-Гриффина, использующего сглаживание в виде осреднения по окружностям:

$$\delta U(0) = U(0) - \bar{U}(R),$$

где $\bar{U}(R)$ – среднее значение поля U на окружности радиуса R .

Точка с нулевыми координатами здесь – центр скользящего окна. Вычисленное таким способом осредненное значение отражает региональные аномалии, а его вычитание из наблюдаемого значения в центре окружности дает в результате локальную аномалию.

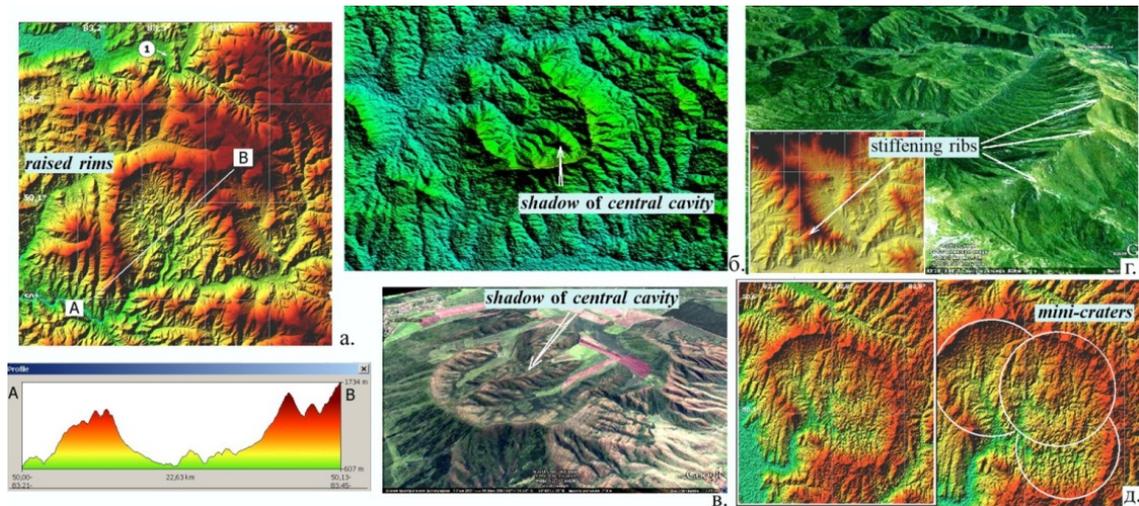


Рисунок 1 – Основные структурные элементы асимметрии, выявляемые в детальных моделях рельефа ENDDB (а, б, г, д) и Google Earth (в, г) различных ударных структур: а – Чаша, $D=14$ км: карта и разрез АВ (подковообразная форма кратерного вала); б – Орловский, $D=5$ км (тень центрального ударного конуса); в – Назар, $D=6$ км (то же); г – Ерофеевская, $D=10$ км (ребра жесткости); Волчихинская, $D=14$ км (сердцевидная форма кратера и мини-кратеры)

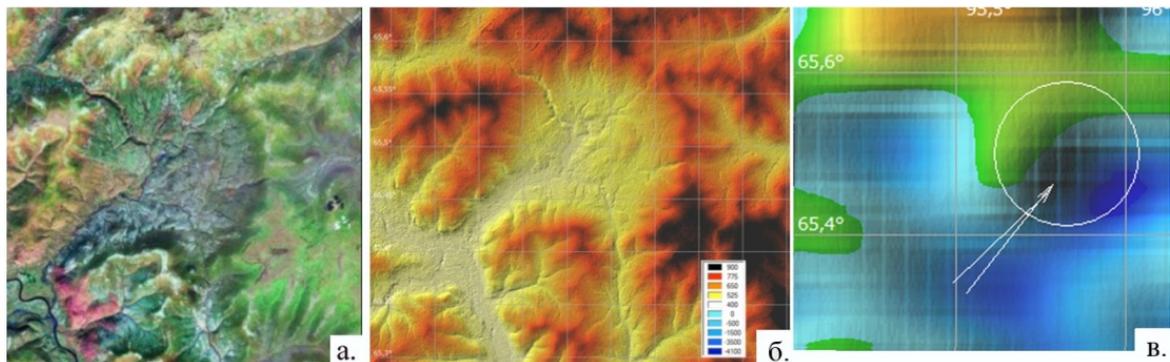


Рисунок 2 – Шлейфовидные элементы ударного кратера на примере структуры Логанча, $D=20$ км: а – на спутниковом снимке Google Earth, б – по ЦМР в программе ENDDB, в – по гравитационной модели V18.1 в программе ENDDB

Типичные структурные элементы, выявленные для ряда ударных кратеров

При использовании средств визуализации системы ENDDB в Каталоге [8] выявлены новые характерные морфологические элементы, выраженные в теневой модели рельефа и гравиметрии десятков структур: шлейфовидная асимметрия рельефа астроблем, сердцевидная форма кратера [14], мини-кратеры, подковообразная форма кратерного вала (рисунок 1) или отрицательных надкратерных гравитационных аномалий, и, наконец, отрицательная шлейфовидная аномалия силы тяжести [7, 14, 15] (рисунки 2, 3).

Асимметрия всех этих форм, также как и отмеченных ранее [16] элементов ударного кратера (тень центрального ударного конуса и наличие ребер жесткости, рисунок 1 б–г), может служить надежным индикатором для определения направления прилета космического тела (КТ), поскольку образуются лишь в случаях пологого его вхождения в атмосферу. В перечисленных работах приводятся примеры десятков структур, содержащих подобные типичные элементы, однако исследование структур каталога в массовом масштабе показало, что распространенность этих элементов не слишком высока и в большей степени зависит как от кинематических условий кратерообразования: скорости КТ и угла его вхождения в атмосферу; так и от внешних условий формирования и сохранения кратера: наличия водного слоя в момент кратерообразования, степени эрозии кратера, зависящей от его возраста и петрофизических свойств, геотектонической устойчивости региона (максимальной на древних щитах и платформах), степени проявления эндогенных процессов, наличием или отсутствием мощного покрова рыхлых отложений. Поэтому количество кратеров, обладающих большинством перечисленных элементов, не превышает 10 % каталога (рисунки 1, 2).

Другая ситуация с последним из перечисленных признаков ударного кратера – отрицательной аномалией силы тяжести в форме шлейфа. Последние исследования показали, что статистика этого признака достаточно высока, хотя и в ограниченном классе структур, так как разрешающая способность упомянутых данных гравиметрии (~30 сек для версий V18.1 и выше) позволяет провести исследование только для относительно крупных астероблем. В каталоге [8] содержится 71 достоверных, 71 вероятных, 275 предполагаемых и 77 неустановленных структур с диаметром $D=15\div 500$ км (что составляет ~21 % от полного количества записей). На момент написания статьи исследовано гравитационное поле четвертой части этих структур (127 записей). В результате составлен список кратеров (таблица), содержащих более или менее выраженные гравитационные шлейфы (изображения которых представлены на сайте [8]). Это 22 достоверные структуры; 18 вероятных; 72 предполагаемые и 4 структуры неустановленного происхождения (Анкоридж, Бакер горы, Басс Стрэйт, Бела и Земля Уилкса). Что, соответственно, составляет 90% от всех рассмотренных достоверных структур, 83% – рассмотренных вероятных, 87% предполагаемых и 57% структур неустановленного происхождения. Почти половина случаев выявления гравитационных шлейфов является предположительными, так как последние либо дистанцированы от астероблем в направлении подлета (рисунки 3б, 4а), либо смещены в сторону от кратера, что может говорить о локализации структур на периферии более крупной шлейфовидной аномалии. В таких случаях их выделение не является однозначным.

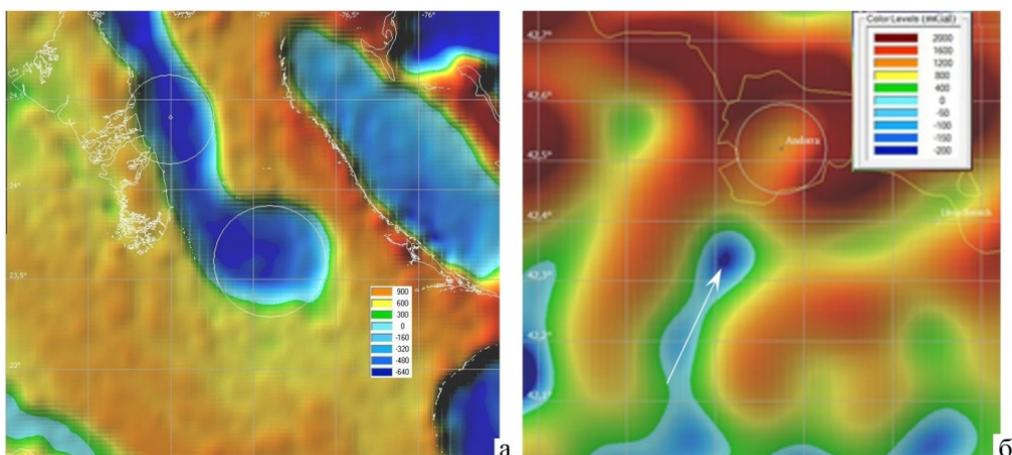


Рисунок 3 – Примеры хорошо выраженных шлейфовидных гравитационных аномалий (цвета согласно легенде в мГал) по цифровым данным ГИС ENDDB: а – предполагаемые структуры Багамы 1 и 2, $D=50$ км и $D=70$ км, б – котловина Андорры, $D=17$ км

Таблица 1 – Структуры, сопровождающиеся гравитационными «шлейфами»

Достоверные	Вероятные	Предполагаемые		
Амелия Крик	Азуара	Агусан Южный	Бавен	Биг Хорн басс.
Арагуайна	Алгамский	Адрар Мадет	Багамы (1 и 2)	Брандберг
Арганаты	Альберт принц	Аиркумская	Бадхызские	Бузачинский
Байконурская	Ангарская	Айнбек	Барабоо	Бусвельд
Беенчиме-	Байдарацкий	Айрон Эксис	Барбертон	Буртраскет
Салаатинская.	Баконь	Айс Кеп	Баросса	Вади Наам
Биверхед	Бангвеулу	Актюбинская	Баффина о.	Вайоминг
Болгышский	Белое озеро	Алешковские	Баянаульская	Валга
Вредефорт	Бесшокоы Южное	Пески	Беата Кратер	Вост. Атлантика
Калужская	Боровская	Аль-Хасима	Беду	Галапагос
Карлинская	Буркле	Альваро Обрегон	безымянный Ирак	Гранд Мараис
Карсвелл	Лимгитинот	Амалия-Команчи	безымянный Ливия2	Гуадалупе о.
Ладога	Кограм	Амирантский	безымянный Сау-	Джесказганская
Логанча	Онежская	Амундсена зал.	дов. Аравия	Ерофеевская
Мороквенг	Средне-Уральская	Андорры котл.	безымянный Тихий	Каменская
Попигай	новая	Антарктида 2	океан	Крк
Пучеж-Катунская	Филипповская	Ап Тхиен Ай	Белизе	Курайская

Уанапитей Штейнхейм Шубарбайгал Чиксулуб Эльгытгытгын Янисьярви	Фолкленд Цинхай	Аральская Аркану Атиу Атлан комета Афон Баба Яга	Бикертон Биг Кратер Бланчленд М. Бовер Бол. Куонамки Бол. Соленое оз Большой Узбек.	Минч Бэсин Настапока Нуринаская Прикаспийская Североустуртск. Сердце Индост. Тирренское море Увейнат Челкар озеро
--	--------------------	---	---	---

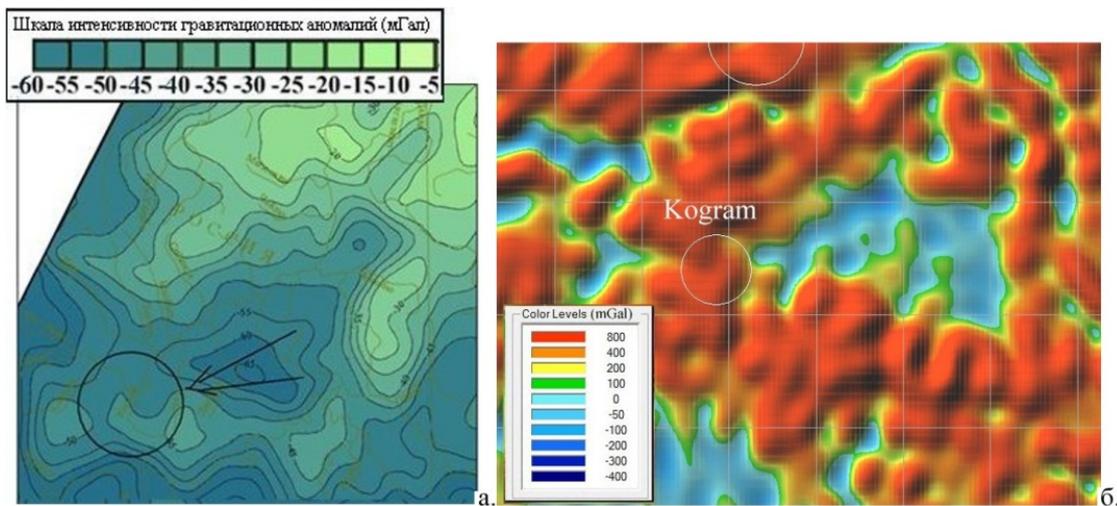


Рисунок 4 – Различия гравиметрических данных на примере структуры Кограм, $D=48$ км:
а – данные гравиметрической съемки СССР [17], б – спутниковые (альтиметрические) данные США [11]

Кроме того, нужно отметить, что используемые цифровые данные гравиметрии являются альтиметрическими и не всегда совпадают с данными гравиметрической съемки, отраженными на Гравиметрической карте России [17], которые мы отмечаем, как более достоверные, – гравитационные шлейфы на них являются более выраженными и меньше связаны с рельефом (рисунок 4). В связи с этим для уточнения локализации шлейфовидной аномалии предлагается использовать модификацию Гравитационного поля, сглаживающую влияние рельефа (рисунок 5).

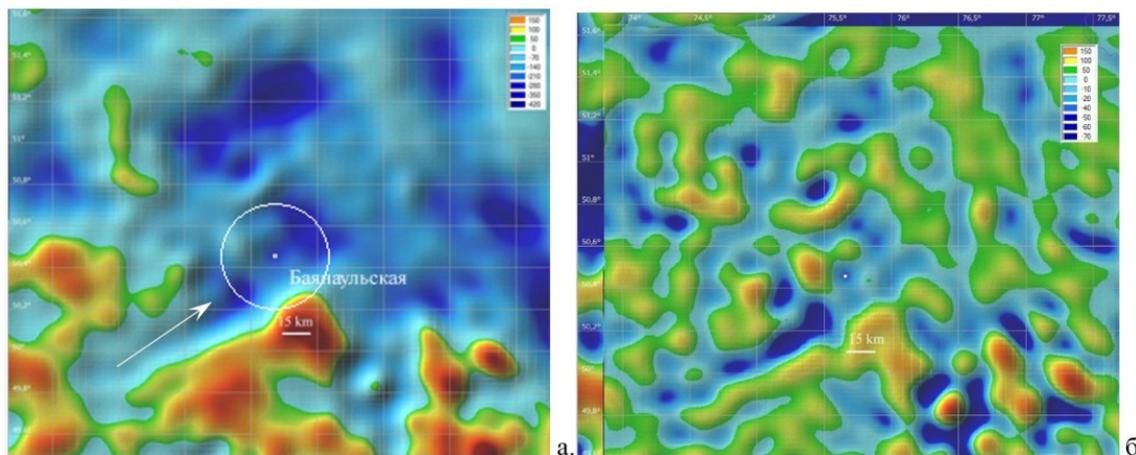


Рисунок 5 – Уточнение локализации шлейфовидной аномалии на примере предполагаемой структуры Баянгульская, $D = 50$ км: слева – гравиметрические данные [11], справа – трансформация гравиметрии способом Андреева-Гриффина (при $R=15$ км)

Важность открытия и систематизации характерных элементов астроблем, выраженных в гравитационном поле: центральное поднятие и кратерный вал, отмечаемые яркими положительными аномалиями (рисунок 6 а), а также шлейфовидные отрицательные аномалии со стороны подлета КТ (рисунок 6 б), особенно высока при диагностике структур, расположенных в труднодоступных районах: на дне морей и океанов, подо льдами Аркти-

ки и Антарктиды, т.е. там, где визуальные наблюдения затруднены и провести анализ геофизических признаков проще, чем морфоструктурных.

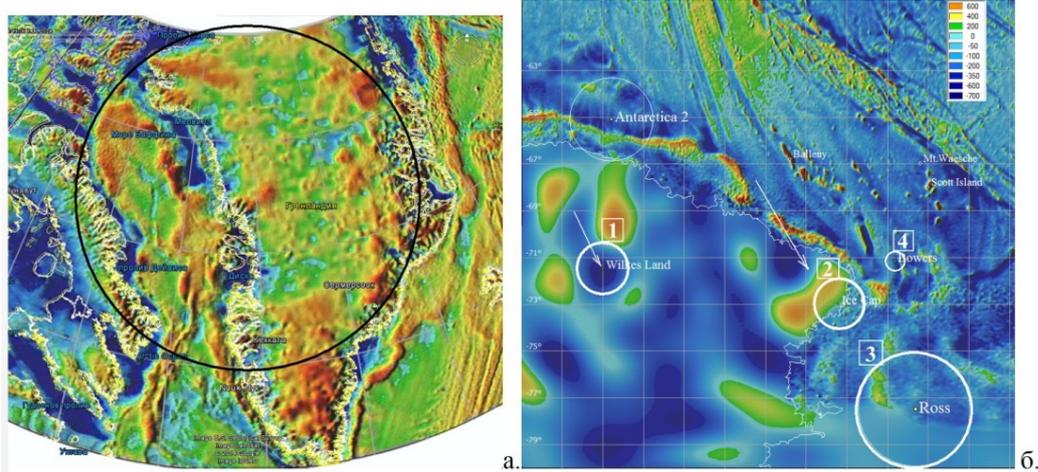


Рисунок 6 – Характерные морфологические элементы ударных структур, выраженные в гравитационных аномалиях кратеров: а – Арктический (D = 5500 км, по грави-аномалиям выявлена его центральная часть D = 950 км, возможно смещенная в результате удара), представлена сферическая проекция Google Earth карты аномалий, построенной в ENDDDB; б – группа кратеров Антарктиды: 1 – Земля Уилкса (D=243 км), 2 – Айс Кеп (D=240 км), 3 – море Росса (D=550 км), 4 – Бовер или Бауэр (D=100 км)

У хорошо сохранившихся кратеров гравитационные аномалии повторяют их округлую форму и, если при этом сопровождаются шлейфом, то даже при отсутствии погоризонтальной гравиметрической съемки, обнаруживающей бескорневой характер кольцевой аномалии кратера, возможно отнесение этих структур к разряду импактных. В качестве примеров ярко выраженных гравитационных аномалий можно привести гигантскую кольцевую структуру (гиаблему), скрытую под ледниковыми покровами Гренландии (рисунок 6а), а также группу кратеров в Антарктиде (рисунок 6 б), визуально объединяемые множественным гравитационным шлейфом в единую группу, предположительно разновозрастных образований. Отметим, что осложняющими факторами при геоинформационном исследовании полярных регионов является отсутствие доступных гравиметрических данных вокруг полюсов (от Северного Полюса до 81° с.ш. и от Южного Полюса до 81° ю.ш.), а также низкая разрешающая способность данных по суше как Антарктиды, так и северной части материков Северного полушария.

Теоретическое обоснование гравитационного фактора структурообразования

Влияние гравитационного фактора на геологическое структурообразование необходимо подтвердить теоретическими расчетами. Мы сравнили абсолютные величины F_T и F_{L1} (приливные силы от воздействия космического тела массой m и от воздействия Луны) на точку, лежащую на поверхности Земли, рассчитывая их в соответствии с геометрическим представлением приливной силы: $\vec{F} = \vec{F}_1 - \vec{F}_2$. Принимая во внимание, что угол Φ в радианах равен отношению длины дуги к радиусу, выражаем приливное ускорение формулой:

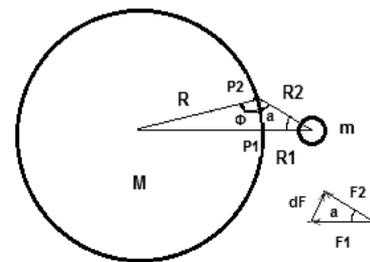
$$\vec{\alpha} = G \cdot m \cdot \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right), \tag{1}$$

По теореме косинусов:

$$R_2^2 = R^2 + (R + R_1)^2 - 2 \cdot R \cdot (R + R_1) \cdot \cos (180 - \alpha - \Phi),$$

$$\text{где } \frac{R}{\sin \alpha} = \frac{R+R_1}{\sin \Phi}, \tag{2}$$

Проведя расчеты функций $R_2(\Phi)$ по формуле (2) (при фиксированном расстоянии R_1 для углов Φ , близких к 180°, соответствующих нормали к поверхности), и α по формуле (1), мы получили следующее. Тело, равное по масштабу Тунгусскому МТ ($m \sim 1.5 \cdot 10^8$ кг), на высоте 10 км вызовет в Земле приливообразующую силу в 5 раз меньше лунной, а тело подобное Аризонскому (при $m \sim 2 \cdot 10^9$ кг) вызовет силу, превышающую лунную в 3 раза. Для Попигайского МТ (принимая



его диаметр – 8 км, а удельный вес минимальным – $2,5 \text{ г/см}^3$) при высоте 10 км получаем приливообразующую силу в 992 тысячи раз больше лунной, а при высоте 100 км – в 992 раза.

Таким образом, локальные приливные воздействия, вызываемые приближающимся к Земле крупным телом астероидных размеров, значительно превышают воздействия, вызываемые Луной. Известны данные непосредственных наблюдений, показывающие, что волны прилива, наблюдаемые в твердой коре при сложении поля тяготения Луны и Солнца, достигают 51 см (что составляет 65% от теоретически рассчитанного размаха амплитуды лунных приливов – 53,4 см, солнечных – 24,6 см; т.е. суммарного влияния – 78 см) [18]. Энергия этого прилива столь велика, что в сочетании с дополнительной, сравнимой по амплитуде, периодической волной прилива (в результате периодичности вращения узлов лунной орбиты) приводит к сильнейшему перераспределению масс в теле Земли, проявляющемуся в периодичности землетрясений и вулканизма Тихоокеанского подвижного пояса. Так, прогноз 19-летних циклов составляет до 94 % для сильных землетрясений ($M \geq 7$), а также для мощного вулканизма.

В отношении масс полученный гравитационный эффект равен $\Delta g/g \sim 0,2/10^6$, т.е. масса пород Земли в 1 т (10^6 г) изменяется в результате лунно-солнечного притяжения на 0,2 г, а в пересчете на массу твердой перисферы Земли ($M_n = 9 \times 10^{25} \text{ г}$) составит 10^{18} г (10^{12} т). Заметим, что величины дефектных масс M_a , соответствующие наблюдаемым кольцевым гравитационным аномалиям Δg внутри известных ударных кратеров, имеют порядок 10^9 т , например, Калужский: $D=16 \text{ км}$, $\Delta g=-12 \text{ мГал}$, $M_a=43.6 \times 10^9 \text{ т}$; Эльгыгытгын: $D=23 \text{ км}$, $\Delta g=-12 \text{ мГал}$, $M_a=40 \times 10^9 \text{ т}$ и т.д. [19]. Поэтому можно предположить, что образование этой массы дефектных (брекчированных и разрушенных) пород может быть связано не только с ударной энергией, работающей на выброс, но и с гравитационным воздействием приближающегося космического тела. Последнее предположение подтверждается наличием гравитационных аномалий сравнимой величины над траекторией подлета болида.

Типичные структурные элементы сейсмичности, выявленные в ГИС ENDDB

Гравитационный фактор может иметь не только экзогенное, но и эндогенное происхождение, что неоднократно отмечалось в литературе [13]. Данные гравиметрии позволяют выявлять эндогенные геологические структуры (например, мантийные неоднородности), влияющие на сейсмичность региона.

Для выявления существующей в природе взаимосвязанности землетрясений в ГИС ENDDB реализованы математические методы анализа сейсмичности, называемые методами пространственно-временного группирования событий. Эту взаимосвязанность, обусловленную как действием механизма триггирования, так и пространственной приуроченностью сейсмичности к активным зонам разломов, границам плит или сейсмических блоков, можно обнаружить следующими методами [5]:

- 1) статистическими методами выявления групп землетрясений, связанных общим генезисом (афтершоков, роев, кластеров);
- 2) методами распознавания пространственных образов;
- 3) методами выявления направления пространственной миграции сейсмичности и т.д.

Выявленные этими алгоритмами структуры должны подтверждаться данными геолого-геофизических наблюдений, и эта возможность также реализована в ГИС ENDDB.

Типичную картину сочетания различных структурных элементов представляет собой очаговая зона Чуйского землетрясения (рисунки 7 б–в). Показаны фрагменты ранее рассчитанных [20] сейсмических линеаментов, соответствующие линейным аномалиям поля силы тяжести и рассекающие область на блоки. Таким образом, Чуйское событие и его афтершоковый рой приурочены к единому сейсмическому блоку, очерченному линеаментами и при этом вытянуты вдоль границы наибольшего градиента гравитационного поля. Приуроченность очаговой сейсмичности к границам максимального градиента особенно хорошо просматривается на карте модифицированного поля аномалий силы тяжести спо-

собом Андреева-Гриффина (рисунок 7 в), поскольку именно выявление региональной составляющей гравитационных аномалий позволяет говорить об их возможной связи с мантийными неоднородностями, влияющими на структуру сейсмоактивности региона [13].

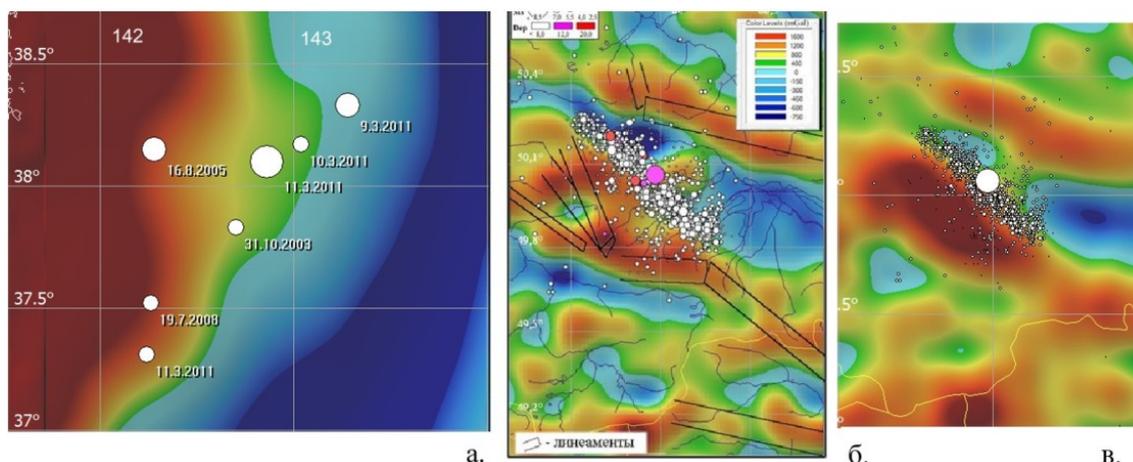


Рисунок 7 – Распределение сейсмичности вдоль границ, отмечаемых гравитационными аномалиями:
 а – землетрясения с $M \geq 6.8$ за 2003–2011 гг. (до мега-события Тохоку, включительно) на фоне региональных аномалий силы тяжести при $R=18$ км; б – афтершоки Чуйского землетрясения (27.09.2003) за 2003 г на фоне аномалий силы тяжести с сейсмическими линейными элементами [9]; в – то же на фоне региональных аномалий силы тяжести при $R=11$ км

Отметим, что попытка пересчитать исходные данные гравитационного поля без выявления региональной составляющей в поле виртуальных деформаций [21] (предположительно показывающих распределение геодинимических сжатий и растяжений в этом регионе), на локальном уровне слабо согласуется с механизмами очагов произошедших на их фоне землетрясений как по направлению, так и по амплитуде: наиболее сильные события афтершокового роя (их механизмы показаны на рисунке 8) приходятся на области как слабой, так и большой интенсивности фонового поля напряжений (рисунок 8б). Однако на региональном уровне крупные события и их афтершоки локализируются в областях сочленения полос интенсивного растяжения и сжатия (рисунок 8а). Последний факт, вероятно, определяет сдвиговый характер подвижки главного очага и большей части его спутников.

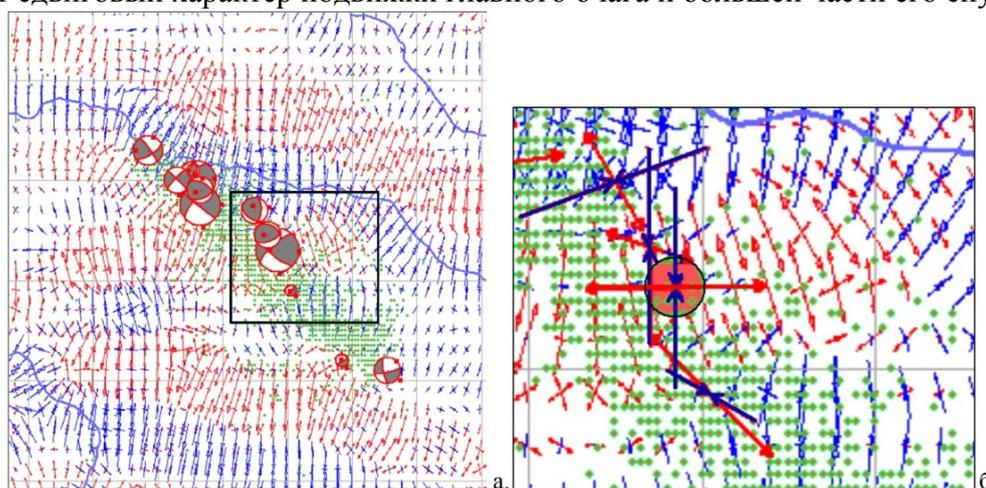


Рисунок 8 – Результат трансформации гравитационного поля в поле виртуальных деформаций [21] и механизмы землетрясений: а – афтершоковый рой Чуйского землетрясения (показаны определения механизмов землетрясений с $M \geq 2$); б – определения механизмов в виде осей растяжения (красным) и сжатия (синим) для главного толчка (27.09.2003, $M = 7.3$) и других событий, отмеченных рамкой на рисунке (а). Красный круг – главное событие, зеленые точки – афтершоки 2003 г. Фоновая карта рассчитана и предоставлена Ярославом Клокоцником (<http://www.asu.cas.cz/~jklkocni/index02.html>)

Заключение

Включение гравиметрической и детальной рельефной информации в систему ENDDB значительно расширило область ее применения, в частности, сделало возможным

решение сейсмогеодинамических задач идентификации сейсмических блоков, линеаментов и других сейсмоморфологических структур, которые были выявлены ранее методами пространственно-временного анализа сейсмологических данных. Геоинформационное сравнение всех имеющихся морфоструктурных элементов необходимо для построения детальных моделей состояния земной коры, обнаружения границ сейсмических блоков или отдельных разломов, а также для изучения сейсмического режима территорий.

Кроме того, использование новых данных сделало возможным решение задач выявления новых морфологических признаков, характерных для импактных структур. Отметим, что асимметрия различных геоморфологических характеристик ударных кратеров, выраженных в современном рельефе, и особенно шлейфовидная форма сопровождающих геофизических аномалий, позволяют с большой степенью уверенности отличать астроблемы от кольцевых структур эндогенного происхождения.

Автор благодарит К.К. Хазановича-Вульфа (Отделение планетологии РГО), И.И. Калининкова (ИФЗ РАН) и Я. Клокоцника (обсерватория Ондрейове, Чехия) за полезные обсуждения, Ан.Г. Марчука (ЛМВЦ ИВМиМГ) за разработку необходимых конверторов, обработку и предоставление данных гравиметрии, а также аспиранта Института Нефтегазовой Геологии и Геофизики СО РАН Дмитрия Кулешова за проведенные расчеты приливнообразующих ускорений.

Литература

1. *Gusiakov V.K., Marchuk An.G., Titov V.V.* Интерактивный программный комплекс для численного моделирования цунами на персональной ЭВМ // Морские природные катастрофы (цунами и штормовые волны). Тезисы докл. научн. конф. (Горький, 17–20 сентября 1990 г.) Горький: ГПИ, 1990.

2. *Гусьяков В.К., Осипова (Мухеева) А.В.* Автоматизированный каталог землетрясений и цунами Курило-Камчатского района // Вычислительные технологии. Новосибирск: ИВТ СО РАН, 1992. Т. 1. № 3. С. 197–204.

3. Summary Report // Fifteenth Session of the International Coordination Group for the Tsunami Warning System in the Pacific (Papeete, Tahiti, French Polynesia, July 24–28, 1995). Paris, IOC/UNESCO, 1995. 50 p.

4. *Gusiakov V.K., Marchuk An.G., Osipova (Mikheeva) A.V.* Expert Tsunami Database for the Pacific Region // The International Emergency Management and Engineering Conference (April 18–21, 1994). Hollywood Beach, Florida, USA / Ed. by J. Sullivan and S. Tufekci. 1994.

5. *Djadkov P.G., Mikheeva A.V.* The EEDB – Expert Earthquake Database for Seismic-Geodynamic Research // Bulletins of the Novosibirsk ICMG. Mathematical Modeling in Geophysics. 2010. No. 13. P. 15–30.

6 *Мухеева 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.

7. *Mikheeva A.V., Marchuk An.G., Dyadkov P.G.* Geoinformation Systems for Studying Seismicity and Impact Cratering using Remote Sensing Data // Geographic Information Systems (GIS): Techniques, Applications and Technologies. – Nantes University, France: Nova Science Publishers, 2014. P. 151–216.

8. *Мухеева А.В.* Web-сайт «Полный Каталог Импактных Структур Земли. 2400 записей» – 2014. URL: labmpg.sccc.ru/Impact/ (дата обращения: 01.12.2014).

9. *Petrenko V.E., Marchuk An.G.* Estimation of the Big Cosmic Bodies' Impact Frequency and Possibility of Cosmogenic Tsunamis // The International Emergency Management Society Conference – 1998. Disaster and Emergency Management: International Challenges for the Next Decade. The George Washington University, Washington DC, 1998. P. 435–443.

10. *Smith W.H.F., Sandwell D.T.* Global Seafloor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings // Science. 1997. Vol. 26. No. 277.

11. *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. Vol. 114/B1. p. Citation B01411.

12. Маринин И.В., Елецкий С.В., Чесноков В.В. Использование Imp.Itrис для предварительного и оперативного исследования цунами и оценки их последствий // Горный информационно-аналитический бюллетень. Изд-во МГГУ, 2009. Т. 18. № 12. С. 181–185.

13. Ипполитов О.М., Надежка Л.И., Ефременко М.А. Некоторые замечания о соотношении структурных элементов трансформированного поля силы тяжести и пространственного положения эпицентров землетрясений на территории ВКМ // Структура, свойства, динамика и минерагения литосферы Восточно-Европейской платформы / Материалы 16 международной конференции. – Воронеж, 2010. Т. 1. С. 312–316.

14. Mikheeva A.V. The new tasks of structural geomorphology, resolved by the ENDDB geoinformation system // Computing Center Bulletin. Series Math. model. In geoph. – Novosibirsk: NCC Publisher, 2014. No. 17. P. 57–72.

15. Михеева А.В., Хазанович-Вульф К.К. Следы гравитационного воздействия крупных болидов // Геоинформатика. 2014. № 1. С. 30–41.

16. Михеева А.В., Кузнецов В.Ф. Об изучении морфологических особенностей ударного кратера по материалам дистанционного зондирования Земли // Отечественная геология. 2013. № 4. С. 61–67.

17. Литвинова Т.В. (отв. исп.). Гравиметрическая карта России и прилегающих акваторий масштаба 1:2 500 000. СПб.: ВСЕГЕИ, 2010.

18. Мельхиор П. Физика и динамика планет. М.: Мир, 1975. 567 с.

19. Петренко В.Е. Геофизические признаки ударных кратеров Земли – обзор, анализ, модели, применение // Труды ИВМиГ СО РАН. Серия: Мат. модел. в геофизике. Новосибирск, 1998. Вып. 6. № 1. С. 119–157.

20. Ustov V.I. (Editor-in-Chief). Earthquake Source Zones of Northern Eurasia. Global Seismic Hazard Assessment Program. Region 7. 2000. URL: www.seismo.ethz.ch/static/gshap/neurasia/ (дата обращения: 01.12.2014).

21. Kalvoda J, Klokočník J, Kostelecký J, Bezděk, A. Mass Distribution of Earth Landforms Determined by Aspects of the Geopotential as Computed from the Global Gravity Field Model EGM 2008. – Acta Universitatis Carolinae Geographica 48(2), 2013. P. 17–25.

Studying geological structures of different genesis by means of geographic information system ENDDB

Anna Vladlenovna Mikheeva, PhD of Physical and Mathematical Sciences, researcher of ICM&MG SB RAS, Novosibirsk Scientific Centre Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics (ICM&MG) SB RAS

Using the shady relief model of ENDDB-program (the Earth's Natural Disasters Database) and data of "Global marine gravity", V18.1 for constructing relief maps and a shaded gravity anomaly allows us to visually reveal new morpho-structural elements of astroblems or to confirm the founded earlier morpho-structural regularities for a lot of astroblemes. In addition, the ENDDB tool can help to confirm a seismic morphological structures identified by special methods for grouping related earthquakes offered in it.

Keywords: Geomorphology, typical morphological elements, impact crater, seismicity, catalog, gravity anomaly.