

## Изостазия и сейсмичность

© С. В. Мишин, А. А. Панфилов, И. М. Хасанов, 2018

Северо-Восточный комплексный институт ДВО РАН, Магадан, Россия  
Поступила 12 сентября 2017 г.

Розглянуто модель будови земної кори, що формується тяжінням планети. Важливу роль у такій структурі відведено процесам ізостації. Аналіз результатів сейсмо-розвідувальних робіт методом відбитих хвиль дає змогу припустити, що відбивні площадки в земних надрах відповідають тріщинам і порожнинам у гірських породах, що складають структури земної кори. Зроблено припущення, що вагові навантаження, які утворює тяжіння планети, витримуються каркасом — опорними площадками, на яких контактують геологічні тіла різного складу і форми. Вага рівних обсягів порід кори варіює внаслідок відмінностей у густині речовини, наявності тріщин і порожнин. Гірські споруди формуються саме через такі варіації, які визначають запаси потенціальної енергії мас гірських порід. Наявність височин, суміжних з долинами, визначає градієнти потенціальної енергії і додаткові вагові навантаження у зонах, що облямовують гірські споруди. В результаті тривалої дії вагових навантажень опорні площадки можуть руйнуватися, що зумовлює переміщення блоків гірських порід; при цьому потенціальна енергія частково перетворюється в пакети механічного імпульсу — сейсмічне випромінювання, яке характеризує процес землетрусу.

Як модель сейсмічних процесів розглянуто удар у результаті переміщення великих блоків гірських порід. Землетрус уявляється наслідком часткового руйнування гірських споруд. Наведено результати модельних розрахунків нижніх кромки гірських споруд для двох ділянок території Магаданської області РФ.

**Ключові слова:** геологічні тіла, ізостатична рівновага, землетрус, густина, імпульс.

**Введение.** Земные недра сложены геологическими телами, упорядоченными в поле тяготения планеты. Контакты между телами формируют жесткий каркас, который не позволяет телам смещаться — каждое тело опирается на другие тела, поддерживая вес вышележащих пород. Опорные площадки тел формируют каркас или скелет некоторого объема недр, который обеспечивает устойчивость конструкции. Средняя плотность этого объема обычно меньше плотности образцов пород, складывающих его, за счет трещин и полостей, включенных в объем. На рис. 1 приведен сейсмический разрез МОВ—ОГТ, полученный при работах по глубинному сейсмическому зондированию профиля ЗДВ [Сальников и др., 2014]. Рисунок иллюстрирует множество отражающих площадок, заполняющих недра участка. Отражающие площадки, по-видимому, связаны с границами геологических тел, трещинами и полостями, имеющимися в земных

недрах. Ступенчатость отражающих площадок с учетом других геофизических данных интерпретируются в виде границ, разделяющих структуры земной коры. Наиболее четко выделяется обычно граница Мохоровичича — подошва земной коры.

Оптимальное равновесие масс в поле тяготения определяется гидростатикой — массы должны располагаться в виде сферических слоев равной плотности. Однако дневная поверхность Земли значительно отличается от сферы, а плотности горных пород варьируют в известных пределах. Распределение крупных массивов в большинстве случаев подчиняется изостатическому равновесию — геологические тела «плавают» в субстрате подобно айсбергам в воде. Разломы свидетельствуют о перемещении геологических тел — это следы движений. Каждый разлом представляется частью замкнутой поверхности, ограничивающей сместившуюся массу горных пород.

Изостазия надежно определена для крупных отдельных частей земной коры — Фенноскандии, Карелии, Антарктиды [Короновский, 2001], отмечены сравнительно высокие скорости установления изостатического равновесия, однако не определены минимальные размеры геологических тел, которые подчиняются закономерностям изостазии. Учитывая просадки возводимых крупных сооружений, можно предположить, что процессы восстановления изостатического равновесия протекают и для горных сооружений локальных структур. Во всяком случае основным состоянием геологических тел следует считать статическое равновесное состояние, изменяющееся с перемещением масс, связанным с разнообразными процессами.

**Горные сооружения.** Природные объекты, возвышающиеся над окружающей дневной поверхностью, назовем горными сооружениями. Каждый такой объект обладает запасом потенциальной энергии в сравнении с прилегающими ландшафтами. Каждое горное сооружение создает дополнительное давление на опорные поверхности, удерживающие массы в равновесии.

Склоны гор определяют формирование градиентов давления. Эти градиенты остаются существенными и в области глубинных структур, формирующих опорные горизонты горных сооружений. Архитектура этих объектов обыкновенно весьма совершенна — они существуют в течение тысячелетий. Однако горные сооружения все-таки изменяются со временем — сопротивление опор в отдельных местах преодолевается и массивные тела смещаются в новые равновесные состояния, приобретая и отдавая кинетическую энергию, равную произведению веса тела и разницы высот первоначального и конечного состояний. Эта кинетическая энергия формирует пакет сейсмического излучения, сопровождающего процесс перестройки горного сооружения. Сейсмические сигналы генерируются в процессе торможения движущихся масс, а не в процессе разрушения среды (для разрушения требуется затрата энергии) [Мишин, Хасанов, 2015].

В качестве наглядного примера горного сооружения рассмотрим о-в Завьялова (рис. 2), располагающийся в Охотском море в 50 км от г. Магадана. Высшая точ-

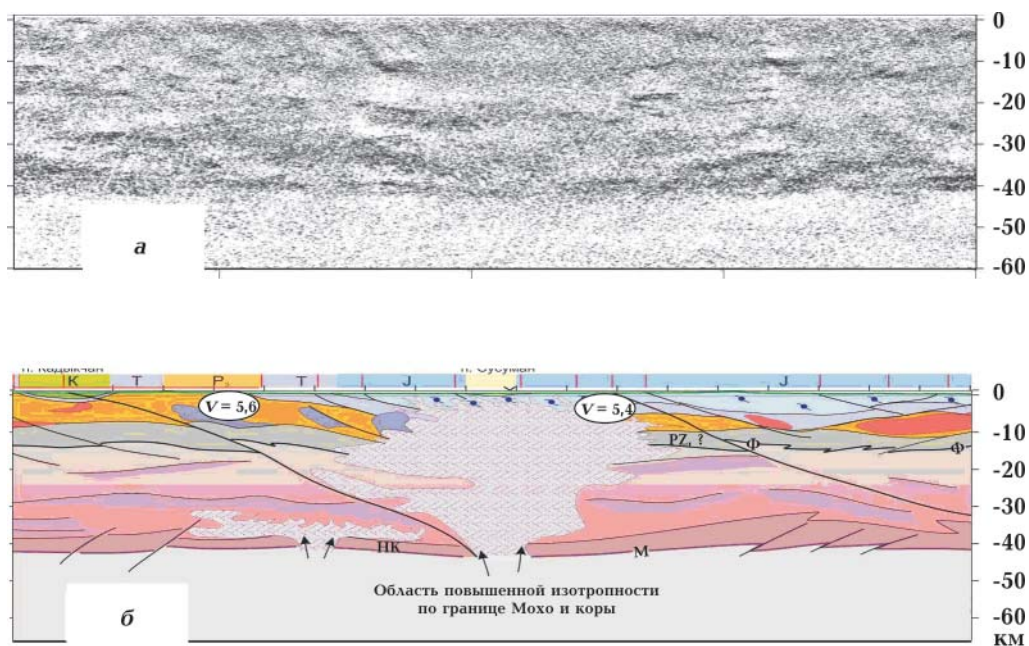


Рис. 1. Интерпретация геофизических данных участка профиля ГСЗ ЗДВ (Иньяли-Дебинский синклиорий): а — разрез МОВ—ОГТ; б — схема строения земной коры этого участка.

ка острова достигает 1116 м над уровнем моря — давление под этой областью на уровне моря достигает  $3000 \text{ т/м}^2$ . Значения высоты дневной поверхности над уровнем моря оцифрованы с шагом 1 км (см. рис. 2). На рис. 3 представлена оценка положения нижней поверхности горного сооружения: плотность пород сооружения  $2,5$  и  $2,7 \text{ т/м}^3$ , а плотность подстилающего субстрата —  $3 \text{ т/м}^3$ . Средняя плотность пород горного сооружения, по-видимому, меньше плотности образцов, измеряемых в  $\text{г/см}^3$ , за счет множества трещин и пустот, содержащихся в объемах геологических тел.

Сооружение и каждый его элемент опираются на внешние элементы среды так же, как и строительная конструкция. Устойчивость конструкции определяется существованием жесткого каркаса, который формируется множеством факторов — прочностью скальных пород, их раздробленностью или сланцеватостью, формами элементов, связанных в конструкцию, длительностью существования системы, ее

влажносодержанием и пр. Характеристики скальных пород в инженерной геологии рассматриваются, как правило, вблизи дневной поверхности [Мюллер, 1971].

За 40 лет сейсмические станции зарегистрировали 23 землетрясения в районе о-ва Завьялова (на участке с координатами  $58,8$ — $59,5$  °с.ш. и  $150$ — $151$  ° в.д.). Остров располагается вне зоны магаданской сети станций, поэтому в статистике возможны погрешности как в определении положений очагов, так и в интенсивности толчков. Энергетические классы К зарегистрированных землетрясений имеют значения от 7 до 11.

Как и на всей территории области, здесь землетрясения нередко происходят сериями — в 1977 г. отмечено 6 толчков энергетических классов от 7 до 10, в 1985 г. — 5 последовательных событий от  $K=9,3$  до  $K=10,8$ , в 1991 г. — 4 землетрясения энергетических классов от 8 до 10. Глубина очагов оценивается первыми километрами — можно предположить, что гипо-

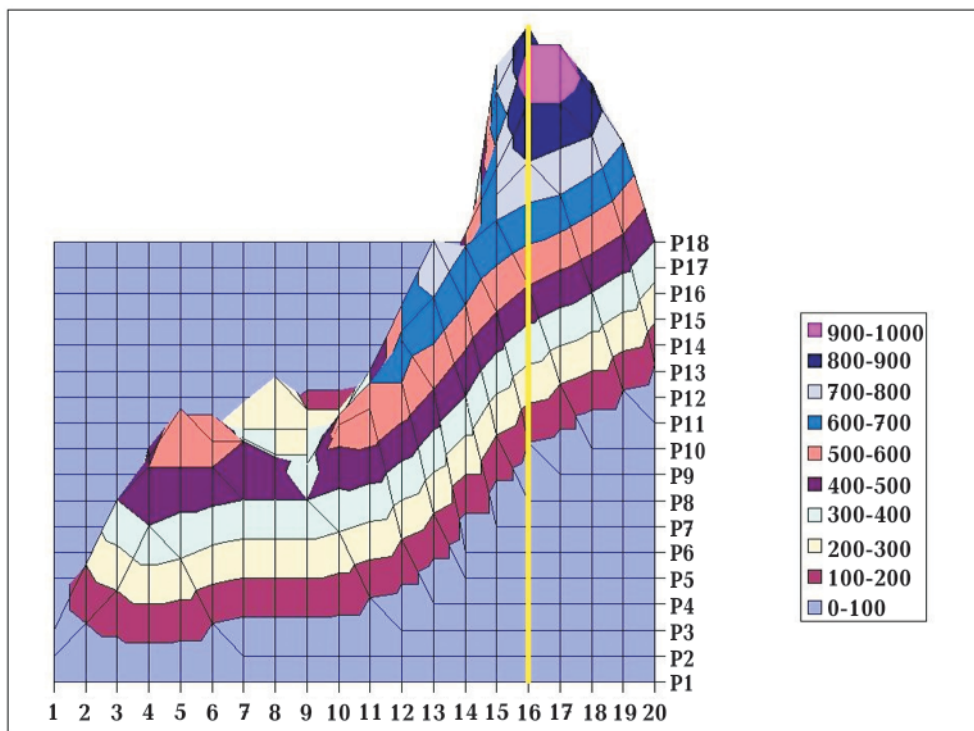


Рис. 2. Пример горного сооружения о-ва Завьялова: желтая вертикаль — профиль, «разрез» по которому представлен на рис. 2.

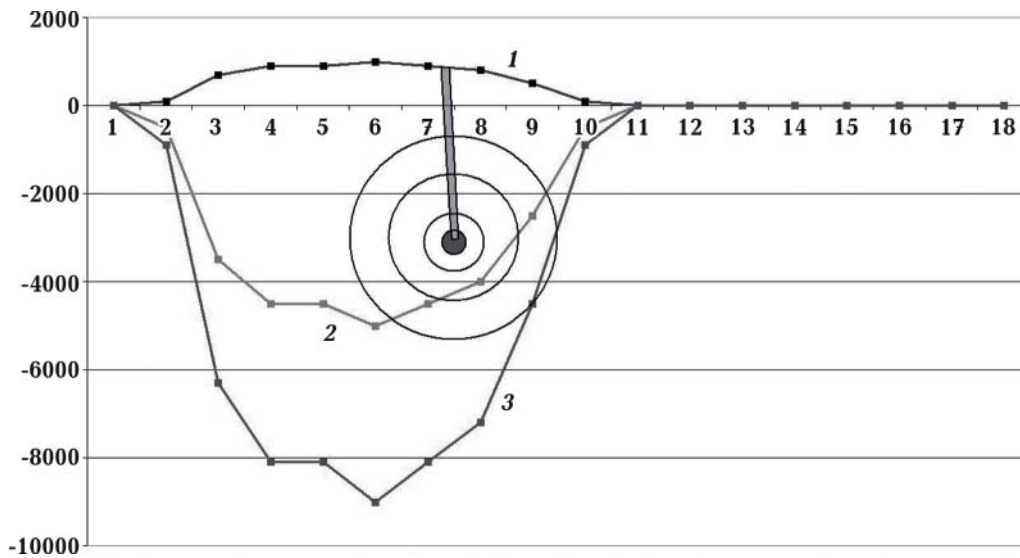


Рис. 3. Изостатическая компенсация горного сооружения (разрез по вертикали рис. 1). Кружок — гипоцентр землетрясения при смещении блока: 1 — земная поверхность, 2 — основание горного сооружения при его средней плотности  $2,5 \text{ т/м}^3$ , 3 — при плотности  $2,7 \text{ т/м}^3$ .

центры землетрясений размещаются в теле горного сооружения. На территории Магаданской области множество горных сооружений о-ва Завьялова рассматривается как очевидная отдельность над ровной поверхностью моря.

На уровне моря под вершиной острова Завьялова давление достигает  $3000 \text{ т/м}^2$ . Землетрясения, регистрируемые сетью, обычно происходят на глубинах 3—10 км. На этих глубинах давления, создаваемые весом толщи пород, имеют значения  $10000\text{—}30000 \text{ т/м}^2$  ( $100\text{—}300 \text{ МПа}$ ). Заметим, что под возвышенностью острова давление окажется больше на  $3000 \text{ т/м}^2$  ( $30 \text{ МПа}$ ), чем под поверхностью моря. В соответствии с кинетической теорией прочности [Журков, 1986] долговечность существования опоры под горой окажется ниже, чем под морским дном (при условии одинаковых механических свойств пород вблизи поверхности и на глубине, что маловероятно). Вероятность разрушения опоры и смещения блока горных пород на глубине существует, и такую вероятность следует оценить. Если опора разрушится на глубине нескольких километров, то в движение будут вовлечены и массы, расположенные ниже уровня моря, что

должно увеличить энергию процесса.

Как и рукотворное строение, горное сооружение без ремонта будет разрушаться. Например, будет зарегистрировано землетрясение  $M=4,5$  с глубиной очага 5 км. С нашей точки зрения [Мишин, 2013; Мишин, Хасанов, 2015] это значит, что блок объемом  $1 \text{ км}^3$  сместился вниз на 10 см. Допустим, это параллелепипед со стороной  $L=5 \text{ км}$ . Потенциальная энергия тяготения генерирует кинетическую энергию, которая составит  $E=mgh=P^2/2m$  (здесь  $m$  — масса блока,  $E$  — энергия,  $P$  — механический импульс,  $g$  — ускорение свободного падения,  $h$  — высота падения). При торможении движения механический импульс  $P$  формирует пакет сейсмического излучения, который регистрируется сейсмическими приборами. Это сейсмическое излучение представлено продольными (количество движения) и поперечными (момент количества движения) волнами, соответствующими прямолинейному движению и поворотам блока. Удар (торможение блока) продолжается в процессе распространения продольной волны вдоль ударяющего тела. В нашем случае время удара 1 с ( $\Delta t=L/v_p \approx 1 \text{ с}$ ). Итак, в данном примере масса сместившегося блока составит  $m=3 \cdot 10^{12} \text{ кг}$ ,

энергия толчка  $E=3 \cdot 10^{12}$  Дж, импульс  $P \approx 4 \cdot 10^{12}$  кгм/с. Импульс передается среде в области удара на опорной площадке. Во время удара действует ньютоновская сила  $f=dP/dt \approx P/\Delta t \approx 4 \cdot 10^{12}$  Н. Приобретенный импульс распространяется из очага со скоростью сейсмических волн, плотность импульса уменьшается пропорционально квадрату расстояния. Волновой фронт действует на окружающую среду — создает давление при передаче импульса. Результатом такого давления могут являться ослабления структуры среды в непосредственной близости от очага, что станет причиной последующих перемещений блоков — афтершоков нашего события.

Горное сооружение острова представляется в виде нескольких зон, которым соответствуют вершины. Каждая из этих зон сама по себе — горное сооружение, имеющее запас потенциальной энергии относительно окружающего ландшафта. Система элементов сооружения, во-первых, существует в поле тяготения Земли и, во-вторых, характеризуется химическими связями на уровне горных пород. Связанные химически блоки горных пород располагаются в равновесии в поле тяготения Земли. Длительное существование горного сооружения свидетельствует о том, что архитектура этого природного объекта выполнена на хорошем уровне, связи между массивными элементами (блоками) сооружения выдерживают длительные весовые нагрузки. Однако внешние воздействия (изменения температуры, влажности, рН) приводят к интенсивной переработке вещества горных пород на экзоконтактах горного сооружения, изменяется материал и в глубоких недрах. Характер связей блоков, выполняющих сооружение, наконец меняется, отдельные связи разрушаются и часть массивных элементов объекта смещается вниз и вбок в поле тяготения Земли. Перемещение и торможение масс сопровождаются формированием сейсмических сигналов, которые могут восприниматься и как землетрясение. В результате отделения частей сооружения немедленно изменяется си-

стема гравитационных нагрузок на оставшиеся прочностные связи. В большинстве случаев новая система связей оказывается менее устойчивой, отчего новые разрушения системы происходят через короткие промежутки времени. Последовательные эпизоды процесса преобразования горного сооружения (перемещение и торможение его фрагментов) сопровождаются пакетами сейсмического излучения большей или меньшей интенсивности. Формируется рой землетрясений, если события не носили чрезвычайный характер или афтершоковая последовательность событий также типична для процесса сейсмической активности. Перемещения отдельных блоков в процессе роя или афтершоковой последовательности редко бывают значительными — размеры свежих разломов, регистрируемых даже при крупнейших событиях, не превышают нескольких метров, оставаясь в большинстве случаев в пределах сантиметров. В отдельных случаях перемещения блоков сопровождаются свободным падением масс. Такие процессы наиболее очевидны: это обвалы пород, достигающие иногда огромной мощности. Во всяком случае сейсмические сигналы связаны не с высвобождением поверхностей, а с ударами массивных смещающихся тел. В качестве предвестников землетрясений могут быть сейсмические и акустические сигналы из области подготовки события — с глубин 5—10 км от дневной поверхности.

**Примеры горных сооружений.** Полуостров Кони располагается в стокилометровой зоне с центром в г. Магадан. За 25 лет (1975—2000) на территории участка (в круге радиусом 50 км от точки с координатами  $59,6^\circ$  с.ш. и  $151,6^\circ$  в.д.) зарегистрировано 42 землетрясения. Из них 4 имели энергетический класс  $K \geq 10$ , а 38 характеризовались энергетическими классами  $K \geq 8$ .

Слева с участком соседствует зона исторического землетрясения 1851 г., которое ощущалось «от Тауйского форпоста до Туманского» [Мушкетов, Орлов, 1883]. В этой зоне за тот же период также не от-

мечались сильные толчки. В зоне радиусом 50 км от предполагаемого эпицентра 1851 г. (59,5 с.ш. и 153,3° в.д.) за 25 лет отмечен 31 толчок, только 5 из них имели энергетиче-

Горное сооружение «плавает» в субстрате за счет меньшей средней плотности пород, слагающих геологические тела, сохраняя изостатическое равновесие. Ав-

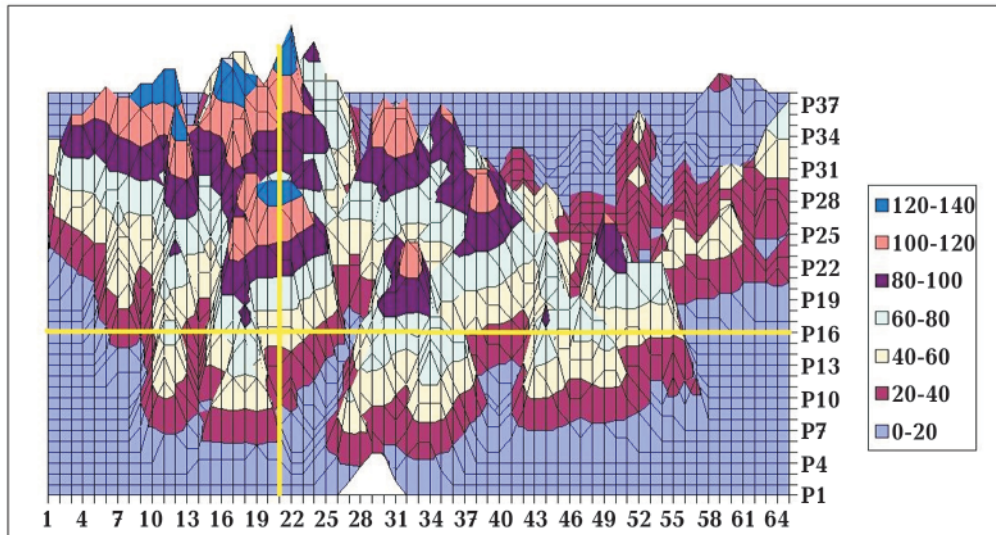


Рис. 4. Рельеф поверхности участка «Полуостров Кони». Желтые линии — профили, для которых на рис. 5, 6 представлены «разрезы».

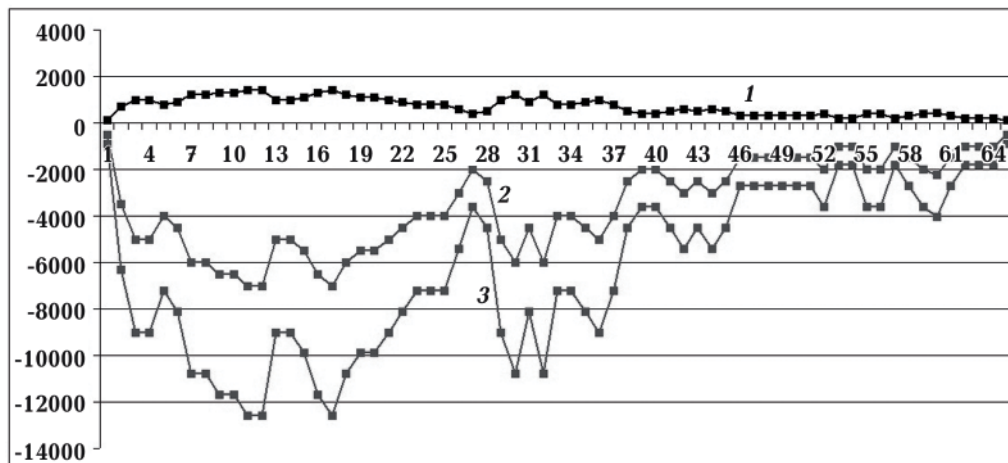


Рис. 5. Оценки положения нижней кромки горного сооружения. «Разрез» по горизонтали: 1 — земная поверхность, 2 — основание сооружения при средней его плотности 2,5 т/м<sup>3</sup>, 3 — при плотности 2,7 т/м<sup>3</sup>.

ские классы  $K \geq 10$ . Поверхность участка оцифрована с шагом 1 км, модель участка представлена на рис. 4. Горное сооружение представляет собой сложную систему геологических тел, дневная поверхность которых изрезана, вершины гор возвышаются на 1200 м над уровнем моря (максимальная высота 1313 м над уровнем моря).

торы попытались определить положение нижней кромки горного сооружения, задавая возможные значения средней плотности пород сооружения и вмещающего субстрата. На рис. 5 приведен «разрез» горного сооружения. Линия 1 иллюстрирует положение нижней границы участка в предположении, что средняя плотность

пород сооружения составляет  $2,5 \text{ т/м}^3$ , а плотность субстрата —  $3 \text{ т/м}^3$ . Линия 3 построена в предположении, что средняя плотность сооружения  $2,7 \text{ т/м}^3$ , а плотность субстрата —  $3 \text{ т/м}^3$ .

Рис. 6 иллюстрирует возможное положение нижней границы горного сооружения вдоль разреза по вертикальному

профилю (см. рис. 4), где располагаются возвышенности более 1200 м над уровнем моря.

На участке «Кулу» в 1972 г. произошло сильное землетрясение, которое ощущалось населением на большой территории (в частности, в г. Магадане). Землетрясение сопровождалось серией афтершоков

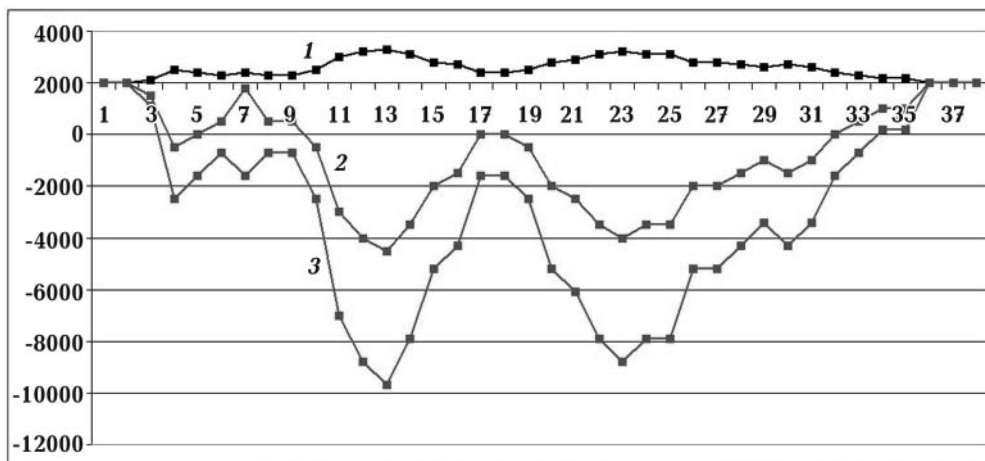


Рис. 6. «Разрез» по вертикальному профилю (см. рис. 4). Условные обозначения приведены на рис. 5.

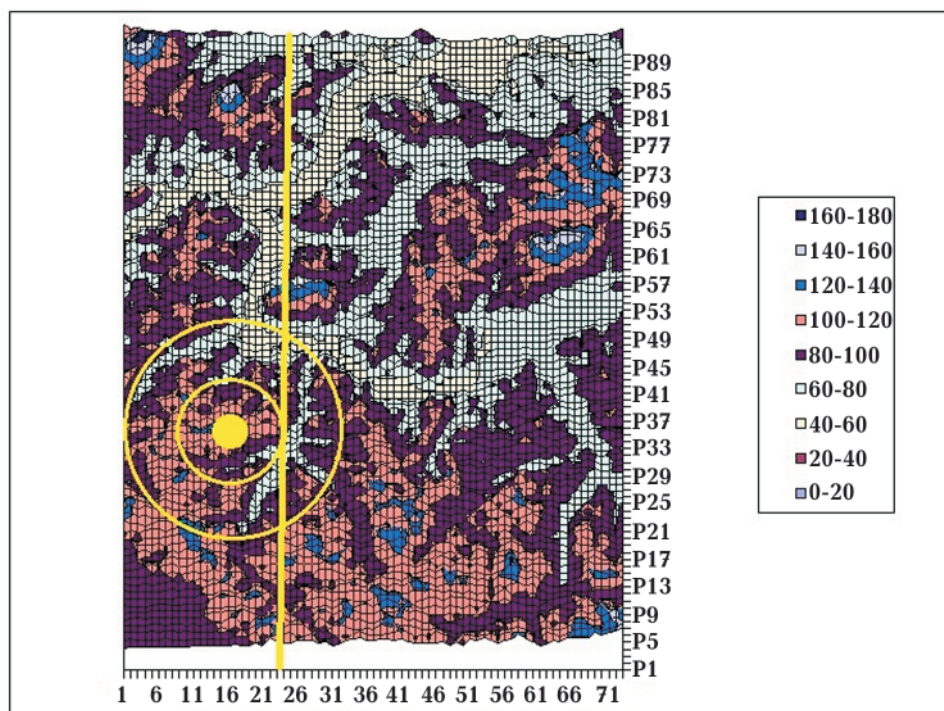


Рис. 7. Модель рельефа поверхности участка «Кулу». Желтым кружком отмечен эпицентр землетрясения 1972 г. Вертикальная прямая — профиль, по которому представлен «разрез» на рис. 8.

до октября 1972 г. За 40 лет на участке зарегистрировано 18 землетрясений энергетическими классами  $K > 8$ , из них 6 превысили  $K=10$ .

Поверхность участка оцифрована с шагом 1 км, модель участка представлена на рис. 7. Поверхность изрезана долинами рек, максимальная высота горных вершин достигает 1579 м. На рис. 8 представлен разрез горного сооружения по горизон-

тах Тихого океана, где землетрясения не регистрируются. Самую грубую модель можно формулировать так: в «океане истинного субстрата» плавают облегченные за счет пустот и трещин массивы, в которых подобно бассейнам на кораблях плавают другие тела. Скорости процессов восстановления изостатического равновесия, по-видимому, различаются для тел и субстратов разного состава.

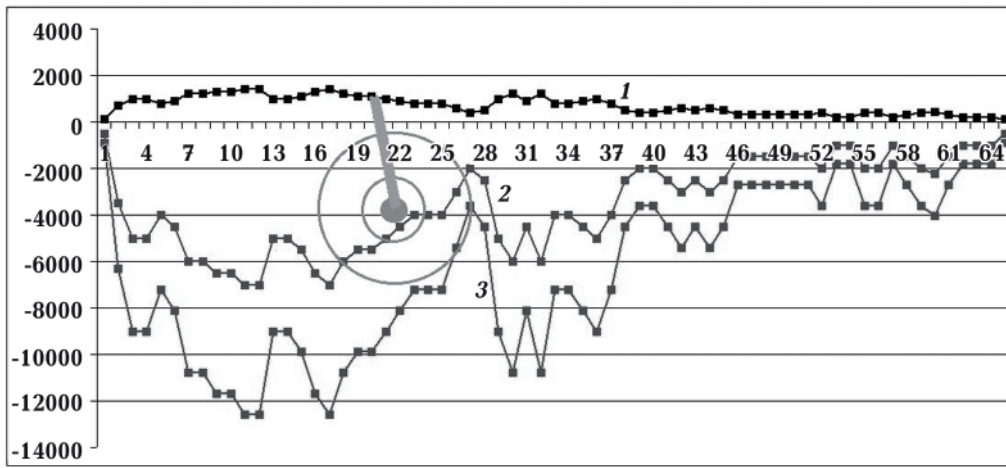


Рис. 8. «Разрез» горного сооружения «Кулу»: 1 — земная поверхность, 2 — нижняя кромка сооружения при средней плотности  $2,5 \text{ т/м}^3$ , 3 — при плотности  $2,7 \text{ т/м}^3$ .

тальному профилю. Линия 1 иллюстрирует положение нижней границы участка в предположении, что средняя плотность пород сооружения составляет  $2,5 \text{ т/м}^3$ , а плотность субстрата —  $3 \text{ т/м}^3$ . Линия 3 построена в предположении, что средняя плотность сооружения  $2,7 \text{ т/м}^3$ , а плотность субстрата —  $3 \text{ т/м}^3$ .

**Анализ модели.** Важнейший вопрос при рассмотрении нашей модели — что такое субстрат, в котором «плавают» горные сооружения. Просадки возникают при возведении здания на осадочных грунтах — здесь «субстрат» не вызывает сомнений. Горное сооружение покоится на «кристаллическом фундаменте», состав которого может оказаться разнообразным. Можно предположить, что континенты «плавают» в «истинном» субстрате, в котором нет пустот и трещин. Например, это — вещество, подстилающее осадки в центральных зо-

нах Тихого океана, где землетрясения не регистрируются. Самую грубую модель можно формулировать так: в «океане истинного субстрата» плавают облегченные за счет пустот и трещин массивы, в которых подобно бассейнам на кораблях плавают другие тела. Скорости процессов восстановления изостатического равновесия, по-видимому, различаются для тел и субстратов разного состава.

Проведем мысленный эксперимент, следуя Х. Рамбергу [Рамберг, 1985], который моделировал тяготение с помощью центрифуги. Поместим в центрифугу тела разной плотности и формы и зададим достаточную скорость вращения. Центробежная сила, имитирующая тяготение, распределит массы подобно тяготению Земли. Внешний слой вещества окажется плотным, часть тел будет раздавлена, на внутренней поверхности, аналогичной дневной поверхности, будут «плавать» легкие компоненты. В «разрезе» возможны инверсии плотности, т. е. существование тел меньшей плотности под более тяжелыми структурами, но существование крупных инверсионных тел, маловероятно.

Второй серьезный вопрос — как происходит перемещение блока горных пород. Вещество на глубинах 3—5 км от дневной поверхности находится под давлением



100—300 МПа с высокой температурой. В соответствии с положениями кинетической теории прочности [Журков, 1986] твердое тело под нагрузкой будет разрушено рано или поздно в зависимости от состава и величины давления. Прочность горных пород в условиях высокого давления и высокой температуры падает, особенно при попадании в полость воды [Дмитриев, Кузьяев и др., 1969]. При разрушении опоры мощного блока сжатием силами, мешающими движению блока, имеющими

сдвиговой характер, можно пренебречь.

**Заключение.** Изостатическое равновесие является нормальным состоянием земных недр, которое изменяется при перемещении горных масс. Средняя плотность горных сооружений меньше плотности вмещающих пород за счет трещин и полостей, разделяющих геологические тела. Перемещения крупных блоков сопровождаются мощными пакетами сейсмического излучения, которые регистрируются как землетрясения.

### Список литературы

- Дмитриев А. П., Кузьяев Л. С., Протасов Ю. И., Ямщиков В. С. Физические свойства горных пород при высоких температурах. Москва: Недра, 1969. 160 с.
- Журков С. Н. Дилатонный механизм прочности твердых тел. В кн.: *Физика прочности и пластичности*. Ленинград: Наука, 1986. С. 5—11.
- Короновский Н. В. Изостазия. *Соросовский образовательный журнал*. 2001. № 11. С. 73—78.
- Мишин С. В. Модель обвального землетрясения. *Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности»*. 2013. № 6. <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2013-6/27-06-13.ttb.pdf>.
- Мишин С. В., Хасанов И. М. О физике сейсмических процес сов. *Геофизика*. 2015. № 4. С. 73—80.
- Мушкетов И. В., Орлов А. П. Каталог землетрясений Российской империи. *Записки Русского географического общества*. Т. 26. Санкт-Петербург, 1883.
- Мюллер Л. Инженерная геология. Механика скальных массивов. Москва: Мир, 1971. 256 с.
- Рамберг Х. Сила тяжести и деформации в земной коре. Москва: Недра, 1985, 399 с.
- Сальников А. С., Старосельцев В. С., Соболев П. Н. и др. Отчет о результатах работ по объекту «Создание опорного геолого-геофизического профиля 3 ДВ (Северо-Восточный участок)» Росгеолфонд ТФГИ по Дальневосточному федеральному округу, 2014.

## Isostasy and seismicity

© S. V. Mishin, A. A. Panfilov, I. M. Khasanov, 2018

A model of the Earth crust structure formed by gravitation of the planet has been considered. An important role in this structure is given to isostasy processes. Analysis of results of seismic exploration by reflected waves method allows to suggest that reflecting areas in the interior correspond to fissures and chambers in the material of rocks, which form the structures of the Earth crust. A suggestion has been made that weight loadings created by the planet gravitation are carried by the framing — bearing areas where geological bodies of different composition and form are contacting. The weight of equal volumes of crust materials varies due to differences in the density of matter, presence of fissures and chambers. Mountain structures are formed exactly due to such variations which determine the store of potential energy of masses of rocks. The presence of uplands near

the valleys determines the gradients of potential energy and additional weight loadings in zones bordering mountain structures. As a result of lasting action of weight loadings bearing areas may be destroyed that leads to displacement of rock blocks; in this case potential energy is partly transformed into packets of mechanical impulse — seismic radiation characterizing the process of an earthquake.

As a model of seismic processes a shock with displacement of large blocks of rocks is considered. An earthquake is represented as a result of partial destruction of mountain structures. Results of model calculations of lower edges of mountain structures for two areas of the territory of Magadan region have been presented in the paper.

**Key words:** geological bodies, isostatic equilibrium, earthquake, density, impulse.

### References

- Dmitriev A. P., Kuzyaev L. S., Protasov Yu. I., Yamshchikov V. S.*, 1969. Physical properties of rocks at high temperatures. Moscow: Nedra, 160 p. (in Russian).
- Zhurkov S. N.*, 1986. The dilatonic mechanism of strength of solids. In: *Physics of Strength and Plasticity*. Leningrad: Nauka, P. 5—11 (in Russian).
- Koronovskiy N. V.*, 2001. Isostasy. *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal* (11), 73—78 (in Russian).
- Mishin S. V.*, 2013. The model of a landslide earthquake. *Internet-journal «Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti»* (6). <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2013-6/27-06-13.ttb.pdf>. (in Russian).
- Mishin S. V., Khasanov I. M.*, 2015. On the physics of seismic processes. *Geofizika* (4), 73—80 (in Russian).
- Mushketov I. V., Orlov A. P.*, 1883. Catalog of earthquakes of the Russian Empire. *Notes of the Russian Geographical Society* 26. St. Petersburg. (in Russian)
- Mueller L.*, 1971. Engineering geology. Mechanics of rock massifs. Moscow: Mir, 256 p. (in Russian).
- Ramberg H.*, 1985. Gravity and deformation in the earth's crust. Moscow: Nedra, 399 p. (in Russian).
- Salnikov A. S., Staroseltsev V. S., Sobolev P. N. et al.*, 2014. Report on the results of work on the project «Creation of a geological and geophysical geological profile 3 DV (North-Eastern site)» Rosgeolfond TFGI for the Far Eastern Federal District.