

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ. ПЕРВЫЕ ОЦЕНКИ ВЕЛИЧИН НАПРЯЖЕНИЙ ПО ГЕОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Изучение тектонических напряжений всегда являлось важнейшей задачей тектонофизических исследований. Можно говорить, что тектонофизика началась с создания алгоритмов оценки напряжений в природных массивах по геологическим данным о разрывных смещениях. В настоящее время результаты тектонофизических исследований, использующие в том числе и методы реконструкции напряжений по данным о механизмах очагов землетрясений, показали, что для платформ, щитов и внутриплитных горно-складчатых орогенов большой вклад в формирование тектонических напряжений вносят остаточные напряжения гравитационного напряженного состояния.

Ключевые слова: гравитационное напряженное состояние; течение; денудация; вертикальные движения; амплитуды сноса; остаточные напряжения.

Введение

Упругие деформации, ответственные за формирование этих напряжений, возникают на стадии гравитационного уплотнения горных пород, вызванного достижением предельного состояния хрупкого разрушения только из-за действия собственного веса. В ходе такого уплотнения, происходящего в стесненных боковых условиях, в массивах на разных глубинах (зависит от уровня флюидного давления) идет процесс разномасштабного катакластического (трещинного) течения, приводящий к увеличению напряжений бокового сжатия. Процесс гравитационного уплотнения приводит к переводу избыточной энергии упругих деформаций в энергию изменения объема, что связано с увеличением напряжений горизонтального сжатия и соответственно всестороннего сжатия при стабилизации на определенном уровне девиаторных напряжений. Геосреда в результате такой трансформации механической энергии переходит в более устойчивое состояние. Достигнутое равновесие между условиями нагружения и способностью массивов выдерживать высокий уровень девиаторных напряжений вновь может быть нарушено, когда в силу изменения внешних условий (движение в мантии) породы коры начинают испытывать подъем, сопровождающийся появлением рельефа и его эрозией. В этом случае в вертикальном направлении происходит упругая разгрузка горных пород ровно на величину эрозионного сноса. Также частично снимаются напряжения, действовавшие в горизонтальном направлении, но напряжения сжатия, запасенные на стадии гравитационного уплотнения, остаются. Это и есть те остаточные напряжения, о которых ранее говорилось в других работах (Айтматов, Пономарев). Появление остаточных напряжений способно вновь вывести геосреду из состояния равновесия, т.к. в процессе подъема пород вновь происходит трансформация механической энергии. Но в этом случае идет обратный процесс, энергия изменения объема переходит в энергию изменения формы, т.е. идет

увеличение уровня девиаторных напряжений за счет увеличения напряжений горизонтального сжатия. Подобное увеличение способно при определенных амплитудах вертикальных перемещений привести к переиндексации главных напряжений, т.е. переходу от режима горизонтального растяжения к режиму горизонтального сжатия.

Остаточные напряжения гравитационного напряженного состояния

Представленная выше краткая теория формирования гравитационных остаточных напряжений хорошо увязывается с результатами измерений напряжений in-situ в горном деле, где к настоящему времени имеется большое число данных [Марков, 1977; Козырев, Савченко, 2009], показывающих, что режим горизонтального растяжения, в основном, отвечает осадочным бассейнам и областям опускания, в то время как в областях поднятия в большом числе замеров (более 70 %) имеет место режим горизонтального сжатия. Заметим, что обычно области, в которых имел место режим горизонтального сжатия, связывали с действием далекодействующих тектонических напряжений, возникающих в зонах конвергенции литосферных плит или со стороны океанических рифтов. Существует также концепция планетарного сжатия (Кропоткин). Развиваемый нами подход дает альтернативную теорию формирования режима горизонтального сжатия для горно-складчатых орогенов, а также платформ и щитов, испытывающих медленное поднятие.

Напряжения Кольского полуострова

Идея о взаимосвязи остаточных напряжений с амплитудами вертикальных поднятий и эрозией поверхности подтолкнула нас к созданию новых методов оценки природных напряжений при использовании геологических данных о мощностях сноса. В этом году нам удалось на примере Кольского полуострова, где получены хорошие данные о природных напряжениях, замеренных in-situ методами, выполнить исследования по

оценке напряжений на основе гипотезы гравитационных остаточных напряжений. Измерения напряжений методом разгрузки в разных точках карьеров показало присутствие значимой тектонической компоненты напряжений с уровнем горизонтального сжатия [Управление горным давлением... 1996] от 5-50 МПа. Для расчета величин остаточных гравитационных горизонтальных напряжений в соответствии с идеей об их существенной роли необходимо оценить величину эрозионного среза, т.е. определить, с какой глубины и за какое время массив выведен на дневную поверхность. В современной срезе Фенноскандии фанерозойские породы практически не сохранились, за исключением разрозненных остатков в отдельных депрессиях и зонах разломов. Существующие представления о величине эрозионного размыва пород Фенноскандии противоречивы: по А.В. Сидоренко с Кольского п-ова были эродированы толщи пород мощностью до 10-15 км; по данным Л.В. Арзамасцева и др. мощность смытых пород в южной части Кольского п-ова может достигать 8-11 км. Согласно Г.М. Вировлянскому общая эродированность Хибинского района составляет 3700-5700 м, при этом разница отметок кровли между Хибинским и Ловозерским массивами – 3300-3900 м, а между Ловозерским и Контозерским – 1200-1600 м. Подобная разность в величине сноса пород Фенноскандии вызвана как единичными данными о наличии фанерозойских пород, так и неравномерными блоковыми движениями, существенно затрудняющими обобщенную оценку размера эрозионного размыва по всему щиту.

Нами предпринята попытка оценки возможной величины сноса с Фенноскандии на основе анализа мощностей осадков в акваториях, окружающих район [Ребецкий и др., 2011]. Исходным материалом послужил атлас литолого-палеогеографических карт мира, в котором представлены карты континентов и океанов по всем эпохам мезозоя и кайнозоя. Для подсчета величины снесенного материала за определенную эпоху суммировалась максимальная мощность осадков соответствующего возраста в акватории Баренцева, Норвежского и Северного морей. Принималось, что максимальная суммарная мощность осадков определенного возраста соответствует мощности максимального сноса. В расчетах не учтены мощности мезозойско-кайнозойских осадков Русской плиты (отсутствие данных), мощности четвертичных осадков как из-за отсутствия данных, так и из-за специфики осадконакопления в эту эпоху, связанную с оледенениями, а также мощности вулканогенного материала мезо-кайнозойского возраста в перечисленных морях. В результате произведенных расчетов получилось, что порядок величины размыва Фенноскандии за время с раннего триаса до плиоцена включительно превышает 10 км (табл. 1). Опираясь на данные таблицы, будем считать, что за последние 150 млн

лет эрозия поверхности могла составить 5 км, т.е. породы, в которых на руднике “Железный” (массив Ковдор) выполнялись замеры зеркал скольжения для оценки напряжений, находились на глубине 5 км от поверхности. Используя данные о плотности и механических свойствах горных пород, а также предполагая флюидное давление в период гравитационного ктакластического уплотнения близким к закону гидростатики на данной глубине (5 км – 500 бар), нами были оценены остаточные напряжения. Получено, что на глубине замеров *ин-ситу* (100 м) напряжения вертикального сжатия будут составлять около -3 МПа, в то время как напряжения горизонтального сжатия будут около 27 МПа. Эти напряжения могут испытывать частичную релаксацию, которая обусловлена вязким механизмом текучести. Однако для кристаллических горных пород, при уровне девиаторных напряжений много ниже предела истинной пластичности, вязкость определяется диффузионным механизмом текучести и, следовательно, ничтожна (коэффициент вязкости $>10^{30}$ Па*с).

Таблица 1

Скорости сноса с Фенноскандии за кумулятивные интервалы времени

Эпохи	Время, млн. лет	Мощность, м	Скорость, мм/год
T ₁ - N ₂	250.0	10928	0.044
T ₃ - N ₂	227.4	8593	0.038
J ₁ - N ₂	205.1	6468	0.031
K ₁ - N ₂	142.0	4818	0.034
Pg ₁ - N ₂	65.5	2468	0.038
Pg ₂ - N ₂	55.0	1688	0.031
Pg ₃ - N ₂	33.7	1213	0.035
N ₁ - N ₂	23.8	688	0.029

Заключение

Разработанные теоретические положения, определяющие взаимосвязь амплитуд эксгумации горных пород с уровнем остаточных напряжений [Ребецкий, 2008, а, б, в], позволили предложить и впервые реализовать методику тектонофизической оценки уровня напряжений горизонтального сжатия на основе геологических данных о мощностях денудации поверхности. Рассмотренная нами теория формирования остаточных напряжений ГНС в массивах горных пород показывает, что:

1) в условиях действия только массовых сил в породах существуют области: а) *чисто упругого* деформирования, непосредственно примыкающие к кровле коры, б) *упруго-катакластического течения*, где из-за превышения предела трещинной текучести уровень горизонтального сжатия может приближаться к литостатическому давлению, оставаясь при этом ниже него; в) *упругой разгрузки*, вызванной эксгумацией горных пород из-за действия процессов воздымания поверхности и ее денудации;

2) глубина кровли области упруго-катаклас- тического деформирования зависит от типа слага- ющих пород (коэффициент Пуассона), прочно- стных параметров (коэффициент внутреннего тре- ния и сцепления) и флюидного давления;

3) в области катакласического течения, при вертикальной ориентации оси максимального сжа- тия (стандартное гравитационное напряженное состояние), происходит упругое уплотнение гор- ных пород, развиваются необратимые деформации удлинения в горизонтальном направлении и уко- рочения в вертикальном и, как следствие, форми- руются дополнительные напряжения горизонталь- ного сжатия (при этом вертикальные напряжения всюду остаются наибольшими сжимающими);

4) в процессе эксгумации горных пород, вызы- ваемой вертикальными восходящими движениями и денудацией кровли коры, происходит уменьше- ние общего уровня напряжений (как всесторон- него сжатия, так и девиаторных напряжений) в глубине массива, сопровождающееся изменением соотношения между вертикальными и горизон- тальными напряжениями;

5) при небольших амплитудах денудации, в процессе упругой разгрузки, порода упрочняется за счет увеличения отношения всестороннего сжатия к уровню максимальных касательных напряжений;

6) изменение соотношения между вертикаль- ными и горизонтальными напряжениями обуслов- лено появлением в горизонтальном направлении остаточных напряжений;

7) при определенных амплитудах денудации кровли коры уровень горизонтальных напряжений может превысить уровень напряжений вертикаль- ного сжатия, что характеризует изменение типа на-пряженного состояния – геодинамического режима;

8) при достаточно больших объемах денуда- ции в эксгумированных породах вновь достига- ется предел трещинной текучести, но уже в усло- виях геодинамического режима, отвечающего горизонтальному сжатию.

Если посмотреть на предлагаемую концепцию генезиса аномально высокого уровня напряжений горизонтального сжатия несколько шире, то можно заметить, что горные массивы коры за последние сотни миллионов лет практически пов- семестно имели периоды подъема, сопровождаю- щегося эрозией склонов (горные орогены) и денудацией больших площадей относительно пологого рельефа (платформы и щиты). Скорости подъема поверхности и скорости эрозионно- денудационных процессов по порядку величин не сильно отличаются друг от друга и оцениваются как 0,001-1 мм/год на временах в первые миллионы – десятки миллионов лет [Оллиер, 1984] и зависит от тектонического режима и климатических условий [Кукал, 1987]. Таким образом, скорость эксгумации пород с больших

глубин для щитов и платформ может составлять 0,01-0,1 мм/год, что на временах их существо- вания (первые сотни млн. лет) определяет возможный уровень остаточных напряжений в 10-100 МПа. Поскольку платформы и щиты занимают большую площадь континентальных плит, то именно остаточные напряжения грави- тационного напряженного состояния *могут* ока- заться тем источником, из которого идет под- питка общепланетарных коровых напряжений горизонтального сжатия.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 13-05-00892 и программы № 6 ОНЗ РАН.

Литература

- Гзовский М.В. Тектонические поля напряжений // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. – 1954. – № 3. – С. 390–410.
- Козырев А.А., Савченко С.Н. Закономерности рас- пределения тектонических напряжений в верх- ней части коры // Физика Земли. – 2009. – № 11. – С. 34-43.
- Кукал З. Скорости геологических процессов. – М.: Мир. – 1987. – 246 с.
- Марков Г.А. Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. – Л.: Наука, Ленинград. отд. – 1977. – 211 с.
- Оллиер К. Тектоника и рельеф. – М.: Недра. – 1984. – 456 с.
- Ребецкий Ю.Л. Механизм генерации остаточных напряжений и больших горизонтальных сжи- мающих напряжений в земной коре внутри- плитовых орогенов // Проблемы тектонофи- зики. К 40-летию создания М.В. Гзовским лабо- ратории тектонофизики в ИФЗ РАН. 2008с. – М.: Изд. ИФЗ РАН. – С. 431-466.
- Ребецкий Ю.Л. Механизм генерации тектоничес- ких напряжений в областях больших верти- кальных движений // Физическая мезомеха- ника. – 2008а. – Т. 11, № 1. – С. 66-73.
- Ребецкий Ю.Л. О возможном механизме генерации в земной коре горизонтальных сжимающих напряжений // Доклады РАН. – 2008б. – Т 423, № 4. – С. 538-542.
- Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Козырев А.А., Ры- бин В.В., Жиров Д.В. Первые оценки величин напряжений по геологическим данным // Меж- дународная конференция, посвященная памяти В.Е. Хаина. “Современное состояние наук о Земле”, 1-4 февраля 2011 г, Москва. – Москва. – 2011. – С. 1553-1559.
- Управление горным давлением в тектонически напряженных массивах // Козырев А.А., Панин В.И., Иванов В.И., Савченко С.Н. и др. Апатиты. – 1996. – Ч. 1. 159 с, Ч. 2. 162 с.
- Anderson E.M. The dynamics of faulting. Trans. Edinburgh, Geol., Sec (8). – 1951. – P. 387-402.

**ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ ГРАВІТАЦІЙНОГО НАПРУЖЕНОГО СТАНУ.
ПЕРШІ ОЦІНКИ ВЕЛИЧИН НАПРУЖЕНЬ ЗА ГЕОЛОГІЧНИМИ ДАНИМИ**

Ю.Л. Ребецький, Л.О. Сім, А.А. Козирєв

Вивчення тектонічних напружень завжди було важливою задачею тектонофізичних досліджень. Можна говорити, що тектонофізика розпочалась зі створення алгоритмів оцінки напружень в природних масивах за геологічними даними про розривні зміщення. Зараз результати тектонофізичних досліджень, які використовують в тому числі і методи реконструкції напружень за даними про механізми епіцентрів землетрусів, показали, що для платформ, щитів та міжплитових гірсько-складчастих орогенів великий вклад у формування тектонічних напружень вносять залишкові напруження гравітаційного напруженого стану.

Ключові слова: гравітаційний напружений стан; течія; денудація; вертикальні рухи; амплітуди зносу; залишкові напруження.

**RESIDUAL STRESSES FROM GRAVITATIONAL STRESS: PRELIMINARY ESTIMATIONS
OF THEIR RATES BASED ON GEOLOGICAL DATA**

Yu.L. Rebetskiy, L.O. Sim, A.A. Kozyrev

The study of tectonic stress has always been the most important task of tectonophysical investigations. Known, that the tectonophysics began with the creation of algorithms to estimate the stress of natural massifs on the basis of geological data of discontinuous shifts. Currently, the results of tectonophysical research based on the stress reconstruction techniques using the data of earthquakes mechanisms shows that the residual stresses of gravitational tension gives a huge contribution to the formation of the tectonic stresses for the platforms, shields and intraplate mountain-fold Orogens.

Key words: gravitational intense condition; current; denudation; vertical movements; demolition amplitudes; residual tension.

¹*Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва,*
²*Горный Институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия*

Надійшла 1.08.2013