

О ВОЗМОЖНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОРОДАХ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМ

ON THE POSSIBLE STRESS-STRAIN DISTRIBUTION PATTERN WITHIN THE HYDROTHERMALLY ALTERED ROCKS

ПАНАСЬЯН Л. Л.

Старший научный сотрудник кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.г.-м.н., г. Москва, liyli@zmail.ru

ФРОЛОВА Ю. В.

Доцент кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.г.-м.н., г. Москва, ju_frolova@mail.ru

ШАНИНА В. В.

Научный сотрудник лаборатории исследования влияния геологических факторов на физико-химическое закрепление грунтов геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.г.-м.н., г. Москва, viosha@mail.ru

Ключевые слова:

массивы пород; гидротермальная система; распределение напряжений; моделирование НДС; условия водонасыщения и тектоническое воздействие; появление особых зон.

PANASYAN L. L.

Senior Researcher of the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, liyli@zmail.ru

FROLOVA Yu. V.

Associate Professor of the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, ju_frolova@mail.ru

SHANINA V. V.

Research Scientist of the Laboratory of Research into the Influence of Geological Factors on Physical and Chemical Consolidation Grouting, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, viosha@mail.ru

Keywords:

rock massifs; hydrothermal system; stress-strain distribution pattern; stress-strain state modeling; conditions of water saturation and tectonic effects; appearance of special zones.

Аннотация

В работе с помощью численного моделирования анализируется напряженное состояние неоднородной толщи по физико-механическим свойствам пород Паужетской гидротермальной системы на юге Камчатки. В условиях гравитации оценивается перераспределение напряжений при полном водонасыщении пород и дополнительно при совместном действии гравитационных и тектонических сил. Изучаемый массив сложен толщей гидротермально изменённых вулканогенно-обломочных пород, осложненной вертикальными разломами. Локальными и региональными факторами, которые приводят к существенному перераспределению основных гравитационных напряжений в таких системах, кроме неоднородностей геолого-литологического строения и свойств пород, являются: разломы, подземные воды, тектонические силы и сейсмичность территории, которая может вызвать знакопеременное изменение напряжений. Приводятся эпюры, обнаруженные особые зоны и схемы распределения напряжений по всему разрезу, а также в пределах отдельных его частей для различных условий.

Abstract

With the help of numerical simulation in the article the physical and mechanical properties of the Pauzhetskaya hydrothermal system rocks (southern Kamchatka peninsula) stress-strain state of heterogeneous strata are analyzed. The redistribution of stresses in completely water saturated rocks with account of gravity is estimated. Additionally, it is analyzed the combined influence of gravitational and tectonic forces. The massif under investigation is composed of the strata of hydrothermally altered volcanogenic-sedimentary rocks complicated by vertical faults. Local and regional factors controlling a significant redistribution of the main gravitational stresses in such systems as well as geological and lithological heterogeneities of the rocks structure and properties are as follows: faults, underground waters, tectonic forces and seismicity of the territory that may produce the alternating stresses. The article is provided with distribution diagrams, detected special zone and stress distribution patterns throughout the whole cross-section of the massif as well as within its separate parts for different conditions.

Введение

Задача представленной работы состоит в изложении материалов по результатам исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) неоднородного массива пород гидротермальной системы, но с обобщенным геологическим разрезом Паужетского района и изученными свойствами пород по нему. Необходимо было промоделировать несколько вариантов состояния массива пород, для того чтобы оценить влияние на напряжение: осушения, водонасыщения, тектонического воздействия, а также влияния изменения свойств пород в приразломных зонах.

Решаемые в исследовании задачи:

Проанализировать напряженное состояние слоистой неоднородной по деформационным свойствам толщи пород в условиях гравитации с помощью математического моделирования;

Проследить перераспределение напряжений в условиях полного водонасыщения пород;

Найти расположение зон равнокомпонентных напряжений при совместном действии гравитационных и тектонических сил;

Оценить влияние на напряжения каждого из учетных факторов и их совместное действие.

Геологическое строение, тектонические и гидрогеологические условия

Паужетское гидротермальное месторождение расположено на юге полуострова Камчатки и сложено вулканогенной толщей миоцен-среднеплейстоценового возраста (N_1-Q_2) [1–3, 12], осложненной разломами (рис. 1) и в значительной степени измененной в результате гидротермальной деятельности. Породы залегают субгоризонтально в придолинной части и шлейфообразно на склоне хребта с переменной крутизной от 10 до 35°.

В основании разреза залегают породы анавгайской серии ($N_1^{1-2} an$), представленные вулканомиктовыми песчаниками с прослоями и линзами алевролитов и гравелитов. Толща изменена процессами региональной низкотемпературной пропилитизации. Мощность до 110 м. Выше с размывом залегают псефитовые туфы алнейской серии (N_1-N_2al), мощностью до 200 м. Голыгинский горизонт ($N_2 gol$) занимает обширные площади на рассматриваемой территории. Он сложен кремнекислыми кристалло-витрокластическими туфами псефитовой размерности. Породы залегают горизонтально, либо слабо наклонно на склоновых частях массива, их мощность варьирует от 40 до 120 м. Голыгинский горизонт перекрыт отложениями паужетской свиты ($N_2-Q_1 pa$). Эта свита не имеет аналогов в других районах Южной Камчатки и подразделяется на три подсвиты: нижнюю (pa_1), среднюю (pa_2) и верхнюю (pa_3). Нижняя подсвита сложена крупнопсефитовыми туфами с прослоями псаммитовых. В моделируемой северо-западной части разреза нижняя подсвита, вскрытая скв.6, имеет мощность около 100 м, затем в зоне Верхне-Паужетского термального поля мощность

увеличивается до 160–180 м, далее к юго-востоку в районе скв. 21 достигает 200 м и далее по направлению от долины р. Паужетки к хр. Камбальному уменьшается до 40 м. Средняя подсвита представлена андезидацитовыми псефитовыми туфами с туфопесчаниками и туфогравелитами в основании. Толща обводнена и является основным эксплуатируемым водоносным горизонтом [10,11]. Мощность подсвиты в рассматриваемой части разреза вблизи скв.6 около 140 м; в приразломных зонах (скв. 13, 20) и юго-восточнее (скв. 21) по приведенному в работе [22] разрезу снижается до 50–70 м, увеличиваясь далее до 110 м. Верхняя подсвита, сложенная алевритовыми туфами дацитового состава, является перекрывающим водупором для водоносного горизонта средней подсвиты. Мощность пород достигает 110 м. В юго-восточной части моделируемого разреза на породах паужетской свиты залегают потоки плотных андезибазальтов и дацитов мощностью 20–50 м.

Водоносными горизонтами являются псефитовые туфы среднепаужетской подсвиты и песчаники анавгайской свиты. Верхний водоносный горизонт эксплуатируется Паужетской ГеотЭС. Общий, учетный при моделировании в качестве взвешивающего, пьезометрический уровень по данным работы [17] устанавливается несколько выше дневной поверхности в долине р. Паужетки.

Разрывные нарушения в пределах Паужетской системы многочисленны и относятся к различным кинематическим видам. Полностью характер трещиноватости пород в разрезе не изучен. Серия активных разломов, определяющих движение термальных вод, создает сложную блоковую структуру, из которых основными являются Паужетский грабен, неотектоническое поднятие Верхнего термального поля и многоступенчатое поднятие хребта Камбальное, осложненное разрывными нарушениями взбросового типа с амплитудой до десятков метров. Для рассматриваемой территории, где расположен вулкан Камбальный, тектонические силы (Т) оцениваются в 3–6 МПа. Считается, что действующие тектонические силы региона юго-востока Камчатки являются горизонтальными [2, 3, 21, 22].

Моделирование и методика построения расчетных схем

Математическое моделирование НДС для Паужетской системы пород выполнено численным методом, который ранее использовался на многих объектах [7–9, 14–16, 19, 25]. Массив пород при моделировании представлен упругой, неоднородной по плотности, пористости, водонасыщению и деформационным свойствам слоистой толщей (табл. 1), слагающей склон хр. Камбального. В исследованиях было рассмотрено два варианта объектов: I) для массива всего склона с геоморфологическими особенностями, но при значительной схематизации разреза, II) для нижней части склона (рис. 1), рассмотренной при второй серии моделирования, но с учетом более детального изменения свойств пород по глубине и вблизи разломов. В данной статье изложен первый вариант

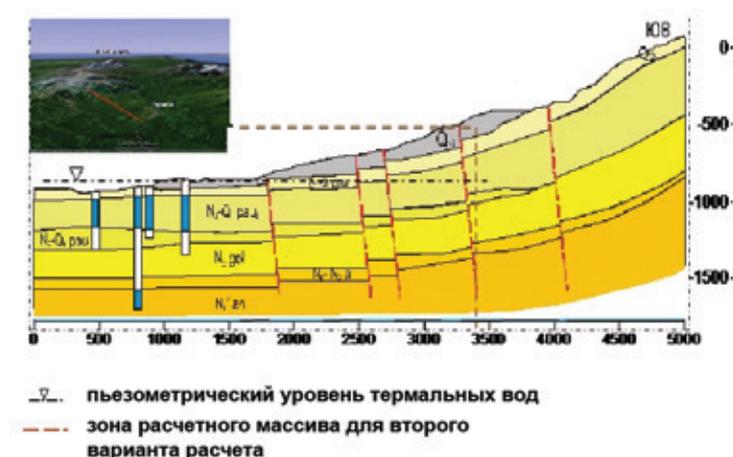


Рис. 1. Схематический геологический разрез СЗ-ЮВ части склона хребта Камбального (синим цветом в скважинах показано положение водоносных горизонтов)

расчетов с несколькими добавочными к гравитации расчетными условиями. Он выполнен для упрощенной геологической схемы с осредненными свойствами слоистой среды склона хр. Камбального, без их изменения в зоне разломов. Сеточная модель первого варианта включала 1435 и 2870 узлов, граничные условия задавались в соответствии с гравитационными и действующими тектоническими силами (Т), размер массива 5000×1700 м.

Серия расчетов проводилась с величиной Т, установленной для данной территории по литературным

источникам [21], от 4 до 6 МПа и пьезометрическим уровнем, который в соответствии с данными работы [17] устанавливался несколько выше поверхности земли в долине р. Паужетки.

Для этих целей:

а) строится обобщенный геологический разрез и проводится поэтапная схематизация инженерно-геологического разреза.

б) на основании изучения свойств и состояния пород, учитывающих полученные петрофизические свойства для их отдельных литологических типов, создается модель разреза вкрест простирания основной структуры вдоль склона. Осредненные свойства пород в каждой ячейке заданы в соответствии с их литолого-стратиграфической принадлежностью (табл. 1). Так как разбиение исследуемой области выполняется с помощью сетки, то показатель любого свойства характеризует свойство массива на участке, равном площади ячеек разбиения. Если точка находилась на границе раздела слоев или вблизи нее, то свойство в необходимой точке сетки определялось как средневзвешенное;

в) составляется расчетная геомеханическая схема. Решается плоская задача в упругой постановке для неоднородной среды, результаты которой могут быть использованы при строительстве [20]. В качестве гипотезы распределения напряжений в массиве пород принята модель А.Н. Динника, хотя напряжения в верхних горизонтах земной коры определяются действием системы сил не только гравитационных [14];

г) при математическом моделировании применялась модификация вариационно-разностного метода с

Таблица 1

Осредненные значения показателей свойств пород, использованные в моделировании обобщенного геологического разреза

№ п.п.	Порода, индекс	Плотность ρ , г/см ³			Динамический модуль упругости, ед.*10 ³ , МПа		Пористость n , %	Коэф. Пуассона μ , д.ед.
		твердой фазы	сухие	при взвешивании	сухие	водонасыщенные		
1	Дацинты Q ₂₋₃	2,75	2,60		48,7		4,3	0,18
2	Туфы алевритовые дацитовые N ₂ -Q ₁ рау ₃	2,68	1,62	1,24	7,4	8,1	30,4	0,29
3	Туфы псефитовые андезидацитовые N ₂ -Q ₁ рау ₂	2,69	1,8	1,34	5,7	8,1	24,9	0,24
4	Туфы крупнопсефитовые андезитовые N ₂ -Q ₁ рау ₁	2,81	2,17	1,60	17,9	20,2	16,2	0,21
5	Туфы псефитовые риолитовые N ₂ gol	2,69	2,12	1,49	14,8	12,8	16,8	0,21
6	Туфы агломератовые андезибазальтовые N ₁ -N ₂ al	2,79	2,43	1,74	41,4	44,9	7,8	0,20
7	Вулканомиктовые песчаники N ₁ ¹⁻² an	2,65	1,84	1,38	3,8	5,4	2,1	0,24

использованием Чебышевских итерационных параметров и введением «законтурных точек» для снижения ошибок вычисления [4, 9, 16, 18]. Минимальный размер ячейки соответствовал минимально возможному размеру объема породы, для которого исследования позволяют количественно охарактеризовать свойства пород;

д) выполнена серия расчетов с разными величинами тектонических сил (T), установленными для данной территории по литературным источникам, причем они приняты в моделях равномерно распределенными на боковых границах расчетного массива. В статье приведены результаты по расчету, когда величина $T=4$ МПа. Кроме того, моделирование напряженного состояния водонасыщенных пород проводилось для условий гидростатического взвешивания.

Исследования свойств пород [26] показали, что инженерно - геологической спецификой данного района является отсутствие закономерного увеличения плотностных и прочностных показателей с глубиной.

Следует заметить, что на рассматриваемом этапе моделирования литологическая неоднородность учитывается только в соответствии с геологическими границами (например, см. рис. 2 по скв. 20).

Результаты и их обсуждение

В первом варианте по результатам осреднения свойств и объединения близких по свойствам использовано 7 типов пород, например, на рис. 3 отражена схематическая модель по модулю упругости.

Проведенная серия расчетов предусматривала: характеристику напряженного состояния (НДС) слоистой неоднородной по деформационным свойствам толщи пород центральной части Паужетского геотермального месторождения в условиях гравитации (1); определение перераспределения напряжений в том же массиве при действии тектонических сил (2); анализ изменения напряжений в условиях полного водонасыщения пород (3); оценку влияния каждого из этих факторов и их совместного действия на

поле напряжений (4). Анализ результатов моделирования свидетельствует, что в перераспределение напряжений вносят вклад как свойства разных литолого-петрографических типов пород, так и условия их залегания. Детальность изучения их характеристик по разрезу помогает выявить неоднородности поля напряжений на разных масштабных уровнях. Поскольку преимущественное залегание пород в рассматриваемом сечении является субгоризонтальным, в дальнейшем анализируются вертикальные и горизонтальные компоненты напряжений, которые в данном случае практически являются главными напряжениями. Также важную роль в перераспределении напряжений имеют морфологические особенности строения территории, определяющие характер поля напряжений в массиве под долиной и под хребтом.

Распределение напряжений в условиях гравитации

Анализ результатов моделирования позволяет утверждать, что наиболее существенный вклад в перераспределение напряжений вносят физико-механические свойства различных литолого-петрографических типов пород. Детальность изучения их характеристик по всему разрезу помогает выявить положение неоднородностей поля напряжений. Также важную роль в перераспределении НДС имеют морфологические особенности строения территории, определяющие характер поля напряжений в массиве под долиной и под хребтом, а также условия залегания пород.

Гравитационное поле напряжений сухого массива, представленное на рис. 4 и 5а, свидетельствует о том, что в среднем значения напряжений равномерно увеличиваются согласно приращением глубины и плотности пород по разрезу. Концентрация (до 25 МПа) вертикальных напряжений происходит в слое, имеющем относительно небольшую мощность, в агломератовых андезибазальтовых крупнопсефитовых туфах $N_2-Q_{1рац.}$, увеличиваясь в сторону юго-восточной части разреза по направлению к склону. Здесь резкий



Рис. 2. Изменчивость свойств по разрезу Паужетской ГТС для одной из скважин А – зона аргиллизациии, Z I – зона интенсивной цеолитизации, Z II – зона слабой цеолитизации, P – зона пропилизации

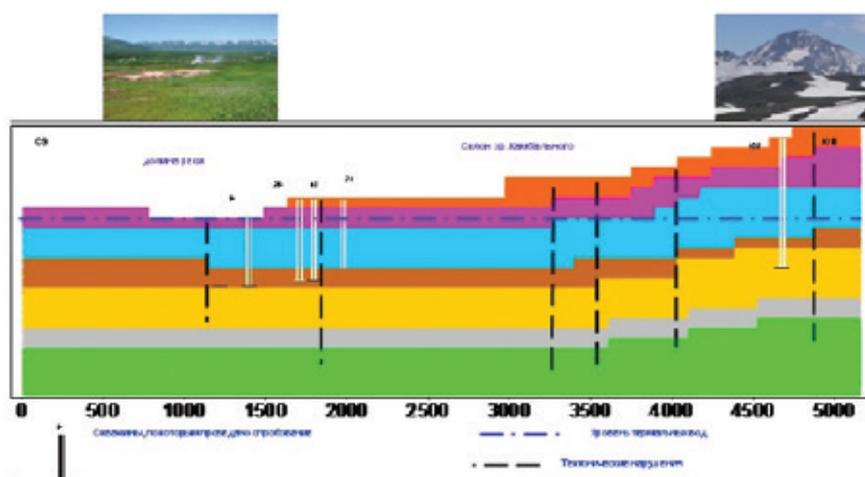


Рис. 3. Схема модели расчетного массива по модулю упругости

перепад напряжений происходит на границе этого слоя — туфы $N_2-Q_1ra_1$ подстилаются риолитовыми туфами голыгинского горизонта, которые перекрываются туфами (ra_2), в связи с тем, что деформационные свойства пород всех трех разновидностей сильно дифференцированы по величине. Так, по сравнению с андезибазальтами, риолитовые туфы имеют модуль упругости в 3 раза меньше, а песчаники — на порядок. Видно, что в формировании поля напряжений слоистого массива в пределах склона вулкана определенная роль принадлежит рельефу. А напряжения в одних и тех же слоях на одинаковой глубине в присклоновой части разреза примерно на 1/4 выше, чем под долиной. Горизонтальные напряжения в сухом массиве соответствуют распределению вертикальных. Но здесь следует обратить внимание на приповерхностную зону хр. Камбального, где залегают самые высокоупругие дацитовые лавы ($Q_{2,3}$), концентрирующие горизонтальные напряжения. Кроме того, в высокопористых наклонно залегающих псефитовых туфах на границе с подстилающими андезибазальтовыми агломератовыми туфами развивается зона относительной разгрузки, даже в той части массива под хребтом, которая находится на глубине около 900 м.

Андезитовые туфы являются водоупором для

гидротермальных вод, служат сильным концентратором напряжений при сжатии горизонтальными тектоническими силами. Деформационные показатели этих пород в 2–3 раза превышают модули упругости выше и ниже залегающих туфов. Интенсивность концентрации усиливается благодаря «контурному» эффекту слоя небольшой мощности. Зона минимальных напряжений на глубине под хребтом при тектоническом воздействии исчезает. Формируются участки равных (отклонение до 10%) вертикальных и горизонтальных напряжений внутри массива пород. Их положение, главным образом, обусловлено свойствами пород, глубиной их залегания, величиной дополнительных боковых сил. Непосредственно в придолинной части, где происходит разгрузка гидротермальных вод, такие участки моделированием не получены. Зона разгрузки на глубине под хребтом при тектоническом воздействии исчезает.

Известно, что большинство массивов пород гидротермальных систем расположено в активных сейсмических зонах. Как правило, их изучение ведется с целью оценки проницаемости, особенно если эти системы используются для теплового энергоснабжения. Однако фактор НДС в таких районах играет немаловажную роль при формировании структурной

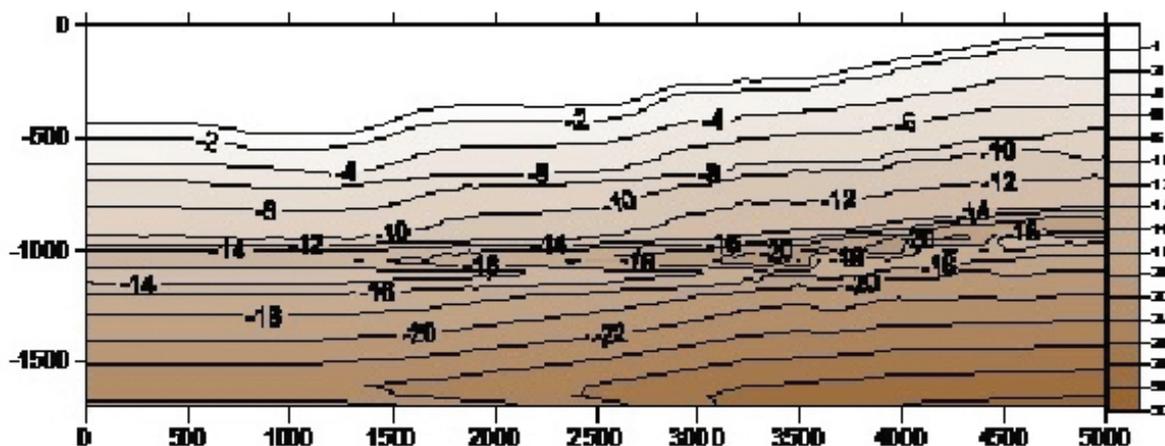


Рис. 4. Распределение вертикальных гравитационных напряжений (МПа) в «сухом» массиве

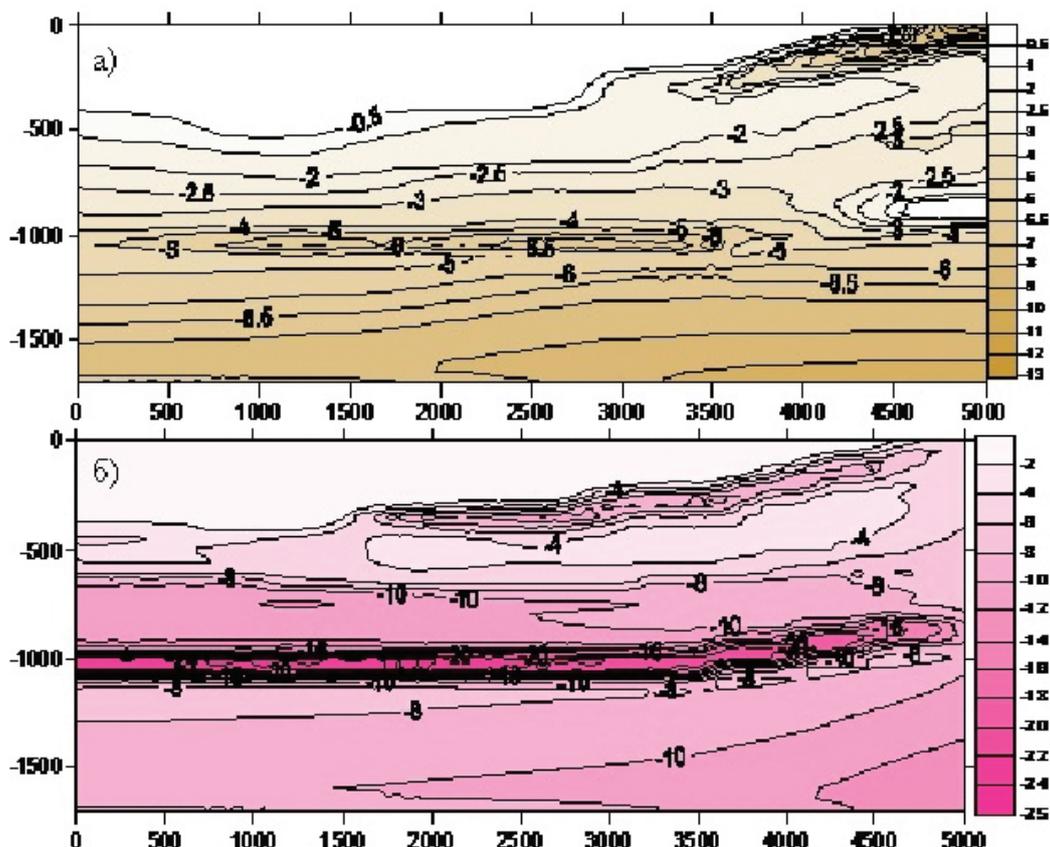


Рис. 5. Распределение горизонтальных напряжений (МПа) в условиях гравитации для сухих пород: а – исходного массива, б – под действием дополнительных тектонических сил

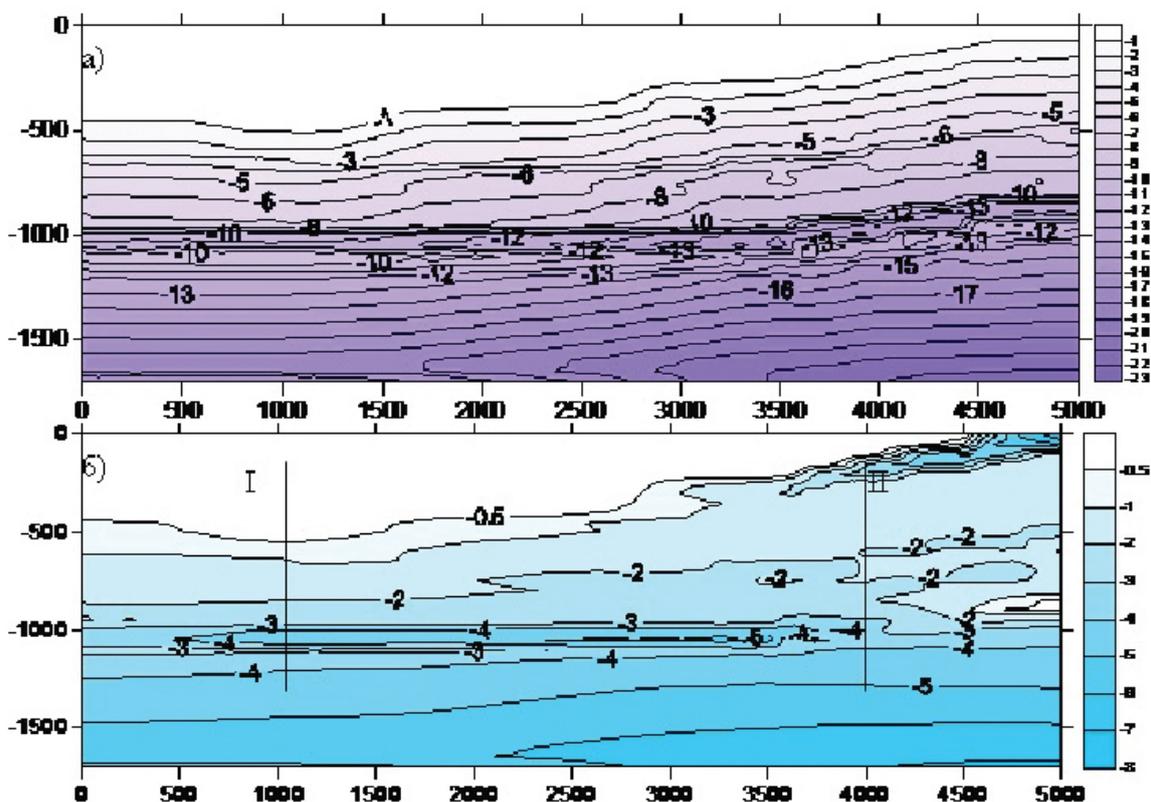


Рис. 6. Распределение напряжений при гравитации и одновременно при условном полном водонасыщении: а – вертикальные, б – распределение горизонтальных напряжений (σ_x-V) в водонасыщенной части массива. I и II – сечения, рассматриваемые в эпюрах

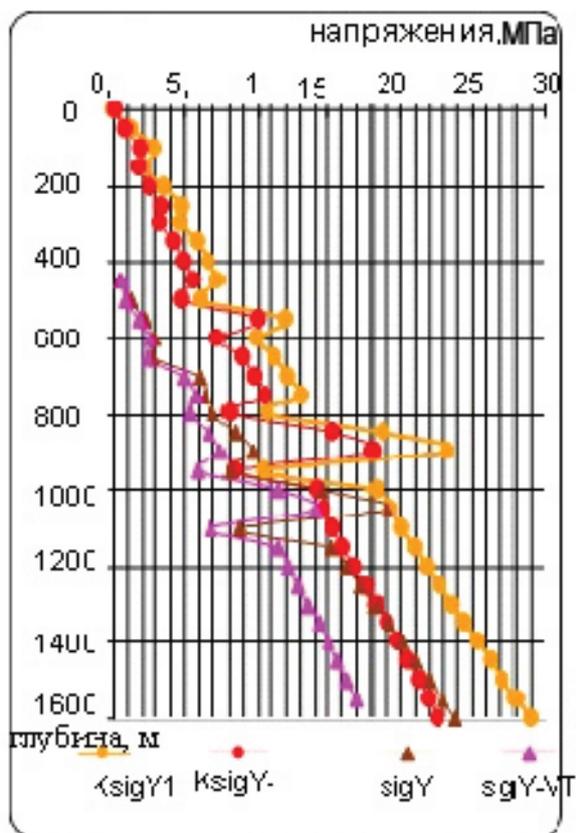


Рис. 7. Влияние трех факторов: гравитации, тектонических сил, равных 4 МПа, и водонасыщения на вертикальную компоненту (сечения I и II со знаком k – непосредственно под хр. Камбольным)

блочности массива пород и трещинно-поровой пустотности (особенно открытой). Это определяет условия проницаемости, связанные с изменением эффективного напряжения, повышение которого в случае откачки вод приводит к сокращению порового пространства. Дополнительное горизонтальное сжатие практически не меняет величин вертикальной компоненты напряжений. Действие горизонтальных сил сжатия приводит к инверсии напряжений вблизи поверхности, которые концентрируются в неизменных дацитовых лавах. Под ними располагается обширная зона относительной разгрузки (рис.5,а). Здесь даже в пригруженной породами склона части разреза горизонтальные напряжения в 2–2,5 раза меньше, чем в вышележащих лавах, что соответствует напряжениям долинного «приповерхностного» С-3 крыла разреза.

Расчет напряжений для условно полностью водонасыщенной толщи

Большое влияние на распределение напряжений в массиве оказывает обводненность слагающих их пород. Водонасыщение приводит к снижению эффективных напряжений примерно в 1,5 раза. Следовательно, при эксплуатации месторождения эффективные напряжения должны повыситься по сравнению с природными, а производительность скважин – уменьшиться, что часто наблюдается на

гидротермальных месторождениях [24]. Нижний водоупор по-прежнему является концентратором напряжений (рис. 6). Дополнительное горизонтальное сжатие практически не меняет величин вертикальной компоненты напряжений.

Взвешивание вызывает снижение горизонтальных напряжений в среднем на 1/3, относительная разгрузка происходит в риолитовых туфах, а под хребтом зона с такими условиями сохраняется. Наибольшая неоднородность поля σ_x и σ_y (рис. 5, 6) наблюдается в средней части разреза, где сокращается мощность риолитовых слоев, залегающих между высокомолекулярными агломератовыми и крупнопесчистыми туфами. Высокая пористость толщи пород верхнего неогена приводит, при полном водонасыщении пород ниже уровня горизонта термальных вод, к созданию под хр. Камбольным в интервале глубин 200-800 м области в массиве, где приращение напряжений с глубиной невелико, а величины горизонтальных напряжений здесь не превышают 2–3,5 МПа.

На рис. 7 можно наблюдать эпюры, отражающие влияние трех факторов: гравитации, тектонических сил и водонасыщения на вертикальную компоненту напряжений. Здесь отражены изменения напряжений с глубиной под долиной и на склоне хребта, что свидетельствует о наибольших перепадах в напряжениях в подошве и кровле водоносных горизонтов псефитовых туфов и вулканомиктовых песчаников. Тектоническая составляющая слабо влияет на величину вертикальных напряжений. Однако эффективные напряжения при дополнительном взвешивающем действии воды уменьшаются по сравнению с «сухим» массивом.

Влияние общего совместного силового воздействия на распределение напряжений

Поле напряжений при участии гравитации, тектонических сил и водонасыщения имеет свои особенности (рис. 7, 8). Общие признаки следующие: во-первых, в приповерхностной зоне массива дополнительно под долиной возникает инверсия горизонтальных напряжений; во-вторых, перемещается зона относительной разгрузки напряжений, которая теперь располагается в водоносном горизонте и под нижним водоупором; в-третьих, отсутствуют участки растяжения напряжений; в-четвертых, выходы «слабых» пород в присклоновых частях разреза создают условия для возникновения зон знакопеременных напряжений при совместном действии различных сил.

Вблизи поверхности долины и склона хребта вертикальные напряжения несколько снижаются в указанных условиях по сравнению с только гравитационными напряжениями в сухом массиве. Эпюры отражают изменение вертикальных напряжений с глубиной под долиной и на склоне хр. Камбольного и свидетельствуют о наибольших перепадах (почти в 5 раз) напряжений в подошве и кровле водоносных горизонтов псефитовых туфов и вулканомиктовых песчаников. Чем выше деформационные характеристики, тем больше концентрация напряжений наблюдается в этих породах и значительнее перепад на их

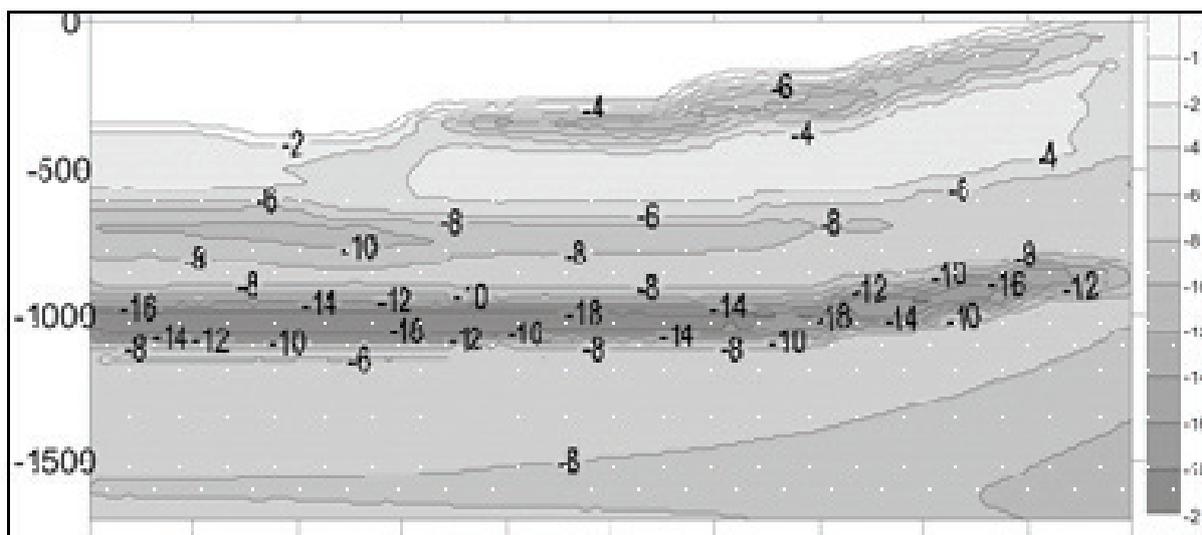


Рис. 8. Распределение горизонтальных напряжений в веселом водонасыщенном массиве при действии тектонических сил, равных 4 МПа

границе. Это происходит до тех пор, пока вертикальная составляющая напряжений не станет примерно равной горизонтальной, которая увеличивается за счет тектонического воздействия, как это происходит в водонасыщенном массиве ниже глубины 1100 м. Фактор НДС массивов пород в сейсмически активных районах играет немаловажную роль при формировании структурной блочности массива пород и трещинно-поровой пустотности (особенно открытой). Это определяет условия проницаемости, связанной с изменением эффективного напряжения, повышение

которого в случае откачки вод приводит к сокращению порового пространства.

Горизонтальные напряжения на тех же глубинах резко повышаются от воздействия тектонических сил в сухих породах. Дополнительно к тектоническому воздействию водонасыщение усиливает изменение величин напряжений от 5 до 25 МПа в наиболее неоднородной части разреза на глубинах от 600 до 1100 м. Причем под долиной напряжения σ_x -VT на 15–20% превышают σ_x -T (в сухих породах при тектонических силах), а на склоне под хребтом объединенное

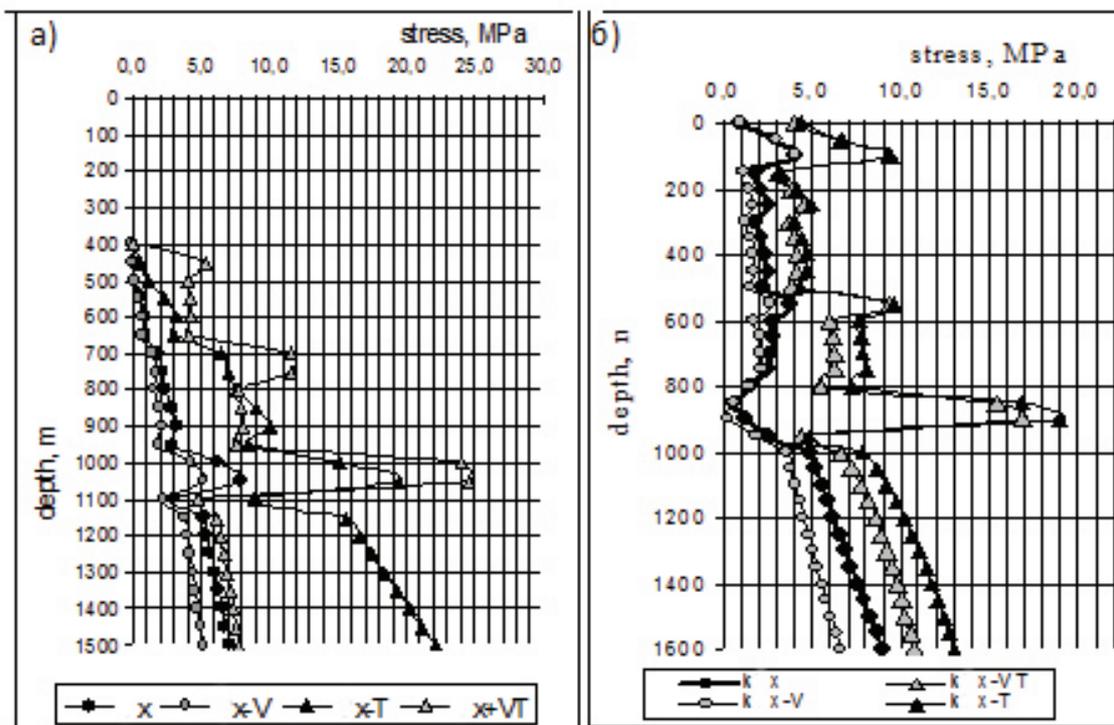


Рис. 9. Распределение горизонтальных напряжений в условиях гравитации: а – под долиной р. Паужетки, б – под склоном хр. Камбального. Сухой массив: σ_x ; -T – с тектоническими силами; V – водонасыщенные породы, а +VT – с тектоническими силами

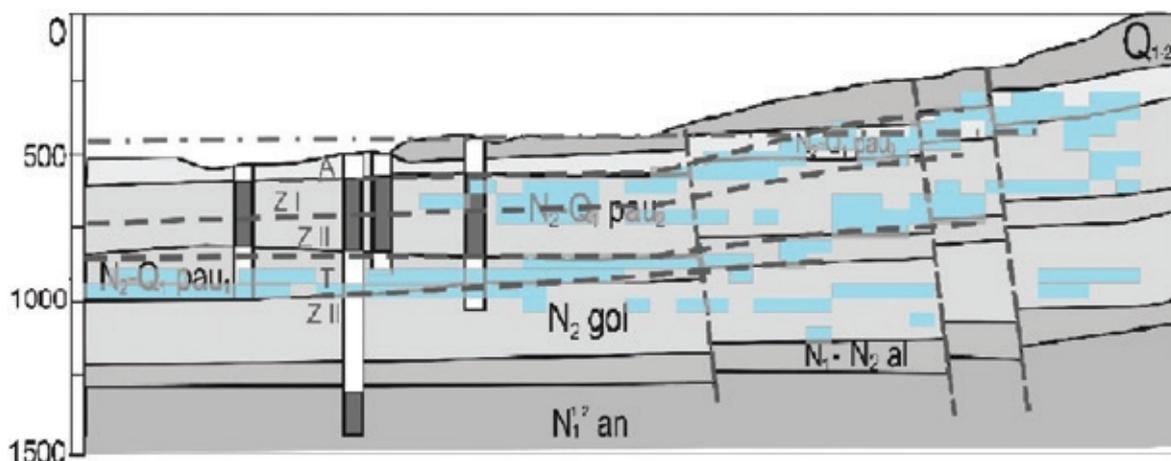


Рис. 10. Положение в нижней С-З части склона участков равнокомпонентных напряжений (голубой цвет) и различных зон гидротермальной переработки пород. Границы гидротермальных зон показаны пунктиром

поле (VT) создает менее контрастную картину горизонтальных напряжений по сравнению с действием тектонических сил в сухом массиве.

При совместном действии гравитационных и тектонических сил в водонасыщенном массиве пород возникают особые зоны равнокомпонентных напряжений и появляются участки и слои с относительной разгрузкой напряжений (рис. 9, 10). Если в той или иной точке породы находятся в предельном состоянии и обладают низкими значениями упруго-плотностных свойств, условия равнокомпонентных напряжений могут способствовать условиям вскипания, - т.е. при вскрытии снимается давление, и, следовательно, происходит вскипание, а температура флюидов 150–200 °С.

Водонасыщение и тектонические силы приводят к перераспределению, главным образом, горизонтальных напряжений в различных частях массива. В результате действия всех трех силовых факторов происходит расширение, частичное перемещение и локализация новых участков с равнокомпонентными, повышенными или пониженными по сравнению с гравитационными напряжениями. Дальнейшая детализация строения геологического разреза и тщательное изучение свойств пород по разрезу приведут к обнаружению дополнительных участков переработки пород, где определяющим фактором может быть поле напряжений, которое всегда способствует ускорению или замедлению процессов внутри массива. Нами для пород рассматриваемого разреза получены первые экспериментальные данные по определению напряжений с помощью акустической эмиссии (АЭ), которые свидетельствуют о том, что, например, в зонах гидротермальной переработки, в частности в зоне аргиллизации, не зависимо от глубины залегания пород, напряжения ниже гравитационных.

Заключение

Выходы «слабых» пород в присклоновых частях разреза создают условия для возникновения

зон растяжения при совместном действии различных сил. Наибольшие перепады напряжений выявляются в подошве и кровле водоносных горизонтов. Водонасыщение приводит к снижению эффективных напряжений примерно в 1,5 раза. Следовательно, при эксплуатации месторождения эффективные напряжения должны повыситься по сравнению с природными, а производительность скважин – уменьшиться, что часто наблюдается на гидротермальных месторождениях. Действие тектонических сил вызывает инверсию горизонтальных напряжений, а участки, которые могут соответствовать условиям вскипания при вскрытии скважинами гидротерм, исчезают.

Кроме того, внутри массива пород при совместном действии гравитационных и тектонических сил найдены зоны равнокомпонентных напряжений, сопоставимые по координатам с зонами гидротермальной переработки. Моделирование НДС показывает сложный характер распределения напряжений в гидротермальной системе. Дальнейшее изучение свойств пород позволит более детально охарактеризовать поле напряжений при воздействии различных факторов. Это, в свою очередь, даст возможность прогнозировать локализацию разнонаправленных напряжений и зон гидротермальной переработки пород.

Авторы понимают всю сложность и неоднозначность проблемы изучения НДС в гидротермальных системах, которое зависит не только от рассмотренных факторов, но и в значительной степени от температуры, давления, прохождения сейсмических волн, наличия разломов, характера трещиноватости и др. Но, очевидно, решение таких проблем требует комплексного подхода путем постепенного введения в анализ НДС воздействия часто взаимно уничтожающих факторов, что частично выполнено во вторых вариантах моделирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 13-05-00530.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверьев В.В., Белоусов В.И.* Геологический очерк района // Паужетские горячие воды на Камчатке. М.: Наука, 1965. С. 8-23.
2. *Авдейко Г.П., Попруженко С.В., Палуева А.А.* Современная тектоническая структура Курило-Камчатского региона и условия магмообразования // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. ИВГиГ ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 2001г., 428 с.
3. *Белоусов В.И.* Геология геотермальных полей в областях современного вулканизма – М.: Наука, 1978. 176 с.
4. *Голодковская Г.А., Панасьян Л.Л.* Исследование структуры поля напряжений с помощью расчётных методов. // М.: Труды Гидропроекта. 1979. С. 45-56.
5. Динник А.Н. О давлении горных пород и расчет крепи круглой шахты. М.: Инженерный работник. 1925. № 7.
6. Долгоживущий центр эндогенной активности Южной Камчатки. М.: Наука, 1980. 172 с.
7. *Калинин Э.В., Ковалко В.В., Могилевцев В.А., Панасьян Л.Л., Сим Л.А., Широков В.Н.* Комплексное изучение напряженного состояния массивов горных пород при разведке месторождений полезных ископаемых. //Вестник МГУ. Серия Геология. 1995, № 2, С. 15-18.
8. *Калинин Э.В., Панасьян Л.Л., Широков В.Н., Артамонова Н.Б., Фоменко И.К.* Моделирование полей напряжений в инженерно-геологических массивах – М.: Изд-во МГУ. 2003. 262 с.
9. *Калинин Э.В., Панасьян Л.Л., Гаджиев М.Г.* Напряженно-деформированное состояние массива пород при сдвиге в подстилающих отложениях // Инженерная геология. 1987. № 3. С. 64–68.
10. *Кирюхин А.В., Кирюхин В.А., Манухин Ю.Ф.* Гидрогеология вулканогенов. - Санкт-Петербург: Наука, 2010. 395 с.
11. *Кирюхин А.В., Федотов С.А., Кирюхин П.А.* Геомеханическая интерпретация локальной сейсмичности, связанной с извержениями и активизацией вулканов Толбачик, Коряжский и Авачинский, Камчатка, 2008–2012 гг. Вулканология и сейсмология, 2016, № 5, С. 1–18.
12. *Литасов Н.Е.* Вулканогенные и вулканогенно-осадочные отложения Паужетской депрессии // Долгоживущий центр эндогенной активности Южной Камчатки. М.: Наука, 1980. С. 87-95.
13. Напряженное состояние земной коры (по измерениям в массивах горных пород). / Под ред. академика П.Н. Кропоткина. М.: Наука, 1973. 288 с.
14. *Панасьян Л.Л.* О возможных изменениях структуры поля напряжений при совместном действии гравитационных и тектонических сил. //М.: ОНТИ ВНИИЯГГ. Сб. «Вопросы нелинейной геофизики». 1981. С. 147-155
15. *Панасьян Л.Л.* Распределение напряжений в неоднородных массивах горных пород. /Сб. «Вопросы инженерной геологии и грунтоведения». Вып. VI. //М.: Изд. МГУ. 1983. с. 277-286.
16. *Панасьян Л.Л.* Аналитические расчеты напряженного состояния пород в массиве. /В сб. «Методические рекомендации по изучению напряженно-деформированного состояния горных пород на различных стадиях геолого-разведочного процесса.» /Научный редактор академик Е.И.Шемякин. М.: Министерство геологии СССР. МНТК «ГЕОС», 1987. с. 95-109.
17. Паужетские горячие воды на Камчатке. М.: Наука. 1965. С. 208.
18. *Самарский А.А.* Теория разностных схем. М.: Наука. 1977.656с.
19. Сертификат соответствия: РОСС RU.АГ75.Н06499 № 1493826. ПРОДУКЦИЯ Программный комплекс «PLL».
20. СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах. - М.: Минстрой России. ГП ЦПП, 1996.
21. Современные напряжения. Северо-западная часть Тихоокеанской сейсмоактивной области. Виртуальная лаборатория по тектонофизическому анализу современных и палеонапряжений. Руководитель доктор физ.-мат. наук Ю.Л. Ребецкий. <http://hera.wdcb.ru/tols/tecton>.
22. Структура гидротермальной системы / С.Н. Рычагов, Н.С. Жатнуев, А.Д. Коробов и др. М.: Наука, 1993. 298 с.
23. *Хаин В.Е.* Тектоника континентов и океанов (год 2000). М.: Научный мир, 2001, 606 с.
24. *Чернев И.И.* Мутновское геотермальное месторождение: результаты эксплуатации, мониторинг основных параметров, оценка влияния реинъекции на добычные скважины // Геотермальные и минеральные ресурсы областей современного вулканизма (материалы Международного полевого Курило-Камчатского семинара, 16 июля – 6 августа 2005 г.). Петропавловск-Камчатский: ОТТИСК, 2005. С. 106-116.
25. *Golodkovskaya G.A., Shaumyan L.V., Panasiyan L.L.* Heterogeneity of natural stress fields and engineering geological appraisal of rock. //III International Congress A.I.E.G. 1978. Sec IV, vol. 2, pp.113-120.
26. *Frolova J.V., Ladygin V.M. & Rychagov S.N.* Geothermal Reservoir Study through petrophysical Data // GRC Transactions, Vol. 25. 2001. PP.401-403.