

О НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ САХАЛИНА ПО ДАННЫМ БУРЕНИЯ ГЛУБОКИХ СКВАЖИН

П.А. Каменев, Л.М. Богомолов, А.С. Закупин

ФГБУН Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, ул. Науки 1Б, г. Южно-Сахалинск, 693022;

e-mail: p.kamenev@imgg.ru

Поступила в редакцию 4 апреля 2016 г.

Работа посвящена расчету и анализу напряженного состояния осадочных пород нефтегазовых месторождений Сахалина, а также данных с исследовательских скважин восточной окраины Пацифики (зона разлома Сан-Андреас). Рассчитаны вертикальные и предельные горизонтальные напряжения для различных глубин. Как на севере, так и на юге Сахалина максимальное субширотное сжатие может превышать вертикальное напряжение в среднем в 1.2–4 раза. Показано, что предельное горизонтальное напряжение и максимальное напряжение сдвига увеличиваются с ростом глубины.

Ключевые слова: напряжения, скважина, бурение, Сахалин.

ВВЕДЕНИЕ

По данным экспериментальных определений в породах кристаллического и складчатого фундамента горизонтальные напряжения превышают вертикальные в 60 % случаев [15]. В осадочных породах горизонтальные напряжения превышают вертикальные в 15–20 % случаев, причем это превышение может достигать до 5–10 раз [14]. Вместе с тем известны случаи, когда тектонические напряжения отсутствуют, например, в неплотных, пористых или пластичных породах осадочного чехла платформ. Учет особенностей напряженного состояния породных массивов этих напряжений необходим, в частности, при бурении и эксплуатации наклонно направленных и горизонтальных скважин [11, 29]. Соотношения между горизонтальными и вертикальными напряжениями известны в большинстве случаев для глубин до 1 км, преимущественно по данным метода разгрузки, глубин более 5 км – по данным о механизмах очагов землетрясений [15, 17, 24, 33]. Однако диапазон глубин от 1 км до 5 км является малоизученным. Уточнение значений предельных девиаторных напряжений в этом диапазоне, которые определяют тот или иной критерий разрушения, представляется актуальным в связи с проблемой интерпретации землетрясений с гипоцентром в осадочных породах, попадающим как раз в этот диапазон глубин. Распространено мнение, что тектонические землетрясения на таких глубинах

не могут происходить, а случаи регистрации событий с глубиной гипоцентра до 5 км формально объясняются либо погрешностью расчетов, либо приповерхностными факторами (обвалы, техногенные воздействия). Альтернативная точка зрения опирается на возможность значительного разупрочнения породных массивов в сейсмоактивных регионах, в частности, в разломных зонах. В этих условиях даже умеренные по величине сдвиговые напряжения (порядка литостатического давления на глубинах до 5 км) приводят к сейсмическим подвижкам.

Непосредственные измерения напряжений в горных породах Сахалина не проводились, и их исследование вынужденно основано на геолого-геофизических данных. Прежде всего, обращают на себя внимание кинематические проявления (движения поверхности Земли по данным GPS/ГЛОНАСС), отражающие современное напряженное состояние коры Сахалина. В работах [2, 3] показано, что на всей территории о. Сахалин преобладают деформации субширотного сжатия, сопровождаемые правосторонним сдвигом. Деформации выделены на фоне перемещения Сахалина в западном направлении относительно Евразии [2]. Однако данные GPS/ГЛОНАСС позволяют оценивать не абсолютные значения деформаций поверхности, а лишь их приращения (среднегодовые скорости). Структурно-геологические [4, 5, 13] и сейсмологические данные (в частности, по параме-

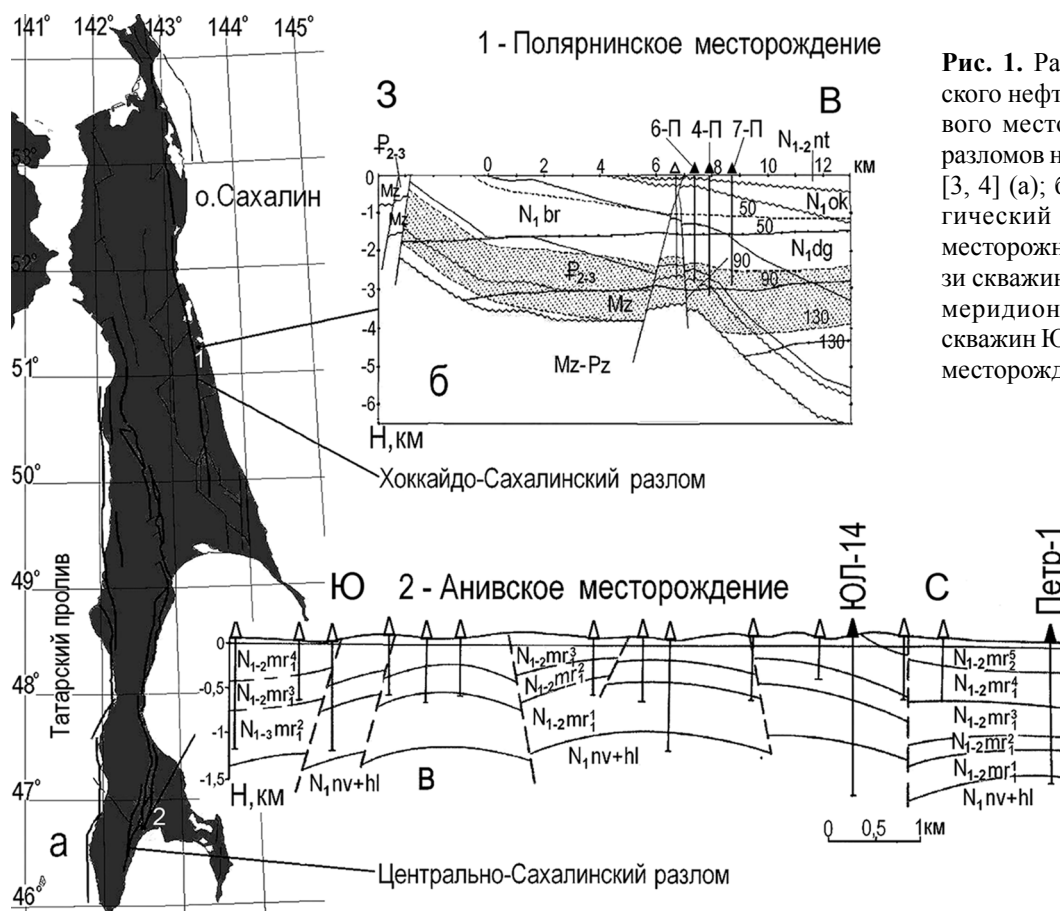


Рис. 1. Расположение Полярнинского нефтяного и Анивского газового месторождений и основных разломов на территории о. Сахалин [3, 4] (а); б – субширотный геологический разрез Полярнинского месторождения, проходящий вблизи скважин 4-П, 6-П и 7-П; в – субмеридиональный разрез вблизи скважин ЮЛ-14, Петр-1 Анивского месторождения.

грам механизмов очагов [21]) также не дают полной информации о действующих напряжениях в силу своих методических особенностей [8, 17]. Тем не менее, стоит отметить, что в проекте The World Stress Map, WSM, [33], направленном на систематизацию данных о глобальном и локальном распределении напряжений в земной коре, Сахалин (как и весь северо-запад Тихоокеанского подвижного пояса) представлен благодаря сейсмологическим данным. Обращение к проекту WSM может также свидетельствовать о низкой плотности данных для коры Сахалина, так что актуально дополнение и уточнение таких данных. С учетом изложенного представляют интерес измерения «in situ», которые получены при бурении глубоких (параметрических) скважин для разведки нефтегазовых месторождений в северной и южной частях о. Сахалин и содержат информацию о параметрах осадочных массивов и их напряженном состоянии. В наших предшествующих работах, на основе данных комплексного каротажа, были проведены оценки таких параметров осадочных массивов о. Сахалин, как модуль Юнга, модуль сдвига, коэффициент Пуассона [10], а также коэффициент трения и сцепления [9]. Задачей настоящей работы является детализация оценок вертикальных и горизонтальных напря-

жений в осадочных массивах Сахалина на глубинах напряжений 0.5–3.5 км (на примере Полярнинского и Анивского месторождений углеводородов (рис. 1), где пробурены глубокие скважины) и сопоставление этих оценок с результатами, полученными в проектах глубокого бурения на восточном фланге Тихоокеанского подвижного пояса [19, 26, 30, 34].

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценки распределения вертикального напряжения (литостатического давления) основаны на данных об изменении с глубиной плотности пород. При выборе исходных данных для расчета плотностей предпочтение отдавалось разведочным скважинам, на которых проводился наиболее полный комплекс геологических и геофизических методов исследования скважин. Таким образом, были отобраны Полярнинское нефтяное месторождение (рис. 1 б), расположенное на севере о. Сахалин, и Анивское газовое месторождение, расположенное в южной части о. Сахалин (рис. 1 в). Полярнинское нефтяное месторождение приурочено к отложениям нижнего миоцена. На этом месторождении имеется сеть вертикальных скважин с глубиной более 3000 м. В данной работе использу-

ются данные скважин 4-П с глубиной 3126 м, 6-П с глубиной 2806 м и 7-П с глубиной 2938 м. Анивское газовое месторождение приурочено к верхнемиоцено-плиоценовым отложениям. В работе использованы материалы скважины Южно-Луговская-14 (ЮЛ-14) с глубиной 1539 м и Петропавловская-1 (Петр-1) с глубиной 1485 м. Каротажные измерения были проведены Сахалинской геофизической экспедицией, ОАО «Востокгеология» в конце 90-х – начале 2000-х годов.

Для оценок предельных горизонтальных напряжений были использованы результаты наших предшествующих работ [9, 10], где по каротажным данным были определены геомеханические параметры осадочных массивов севера и юга Сахалина. Значения угла внутреннего трения φ и сцепления C_0 на различных глубинах h , вычислялись с применением следующих феноменологических (эмпирических) соотношений, предложенных в [27] для глинистых сланцев:

$$\sin \varphi = (V_p - 1)/(V_p + 1), \quad V_p \text{ [км/с]}. \quad (1)$$

$$C_0 = 5(V_p - 1) \times (V_p)^{-1/2}, \quad C_0 \text{ [МПа]}. \quad (2)$$

Как и в случае оценок упругих модулей [10], эмпирические соотношения (1) и (2) опираются на экспериментальные данные, полученные при лабораторных испытаниях на прочность кернов глинистых сланцев совместно с акустическими измерениями [28]. Для контроля полученных значений угла внутреннего трения и сцепления также использованы выражения, предложенные в работе [27]. Согласно [27], угол внутреннего трения, выраженный в градусах, описывается выражением:

$$\varphi = 11 V_p - 10.2, \quad V_p \text{ [км/с]}, \quad (3)$$

а для сцепления C_0 имеет место следующее соотношение:

$$C_0 = 0.77 (V_p)^{2.9} (1 - \sin \varphi)/2 \cos \varphi, \quad C_0 \text{ [МПа]}. \quad (4)$$

Результаты распределения сцепления и коэффициента внутреннего трения для Полярнинского и Анивского месторождений с ростом глубины представлены в работе [9].

С помощью этих данных можно рассчитать предельное горизонтальное напряжение, используя критерий Мора-Кулона в форме:

$$\tau = f \sigma_n + C_0, \quad (5)$$

где τ – максимальное напряжение сдвига вдоль плоскости разрыва, σ_n – эффективное напряжение (напряжение в скелете породы), действующее нормально к плоскости разрыва, C_0 – сцепление, f – коэффициент внутреннего трения. Будем считать, что литостатическое давление соответствует наименьшему из главных напряжений, определяющих нормальную и сдвиговую компоненты в (5). Такое предположение

основано на геодинамических условиях, определяющих преобладание субширотного сжатия в результате взаимодействия Охотоморской и Амурской плит. В работах по проекту The World Stress Map [33] на карте напряжений для региона северо-востока Евразии отмечено преобладание режима горизонтального сжатия, что проявляется в преимущественно взбросовых подвижках в очагах землетрясений, определяемых по решениям для фокальных механизмов. Данные кавернометрии скважин Пильтун-Астохского месторождения [1], расположенного на севере Сахалина, также демонстрируют преобладание горизонтального напряжения (субширотного сжатия) над вертикальным в интервале глубин 1800–2000 м. Согласно [1], стенки исследуемой скважины имели выраженные обрушения в двух диаметрально противоположных угловых секторах, указывающих направление действия максимального сжатия–растяжения. Это может рассматриваться как подтверждение: ось одного из главных напряжений субгоризонтальна. Вышеупомянутые результаты [33] также свидетельствуют, что для большей части территории Сахалина выполняется следующее соотношение между главными напряжениями: $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, где σ_1 – наибольшее горизонтальное напряжение (сжатие), σ_2 – меньшая из двух компонент горизонтального напряжения, σ_3 – вертикальное напряжение.

Из теории разломообразования [20] следует, что предельно возможное значение горизонтального сжатия определяется законом Кулона-Мора (5), записанным для сдвигового напряжения τ на плоскости, наклоненной к горизонту на угол β : $\text{tg } 2\beta = \pm 1/f$. При этом известно, что ориентация этой плоскости выделяется среди других тем, что для нее критерий (5) достигается при наименьшем различии между σ_1 и σ_3 (т.е. тектонической составляющей горизонтального напряжения). Однако в теории разломообразования Андерсона для массивов пород с хрупким типом разрушения не учитывалось сцепление [20]. В нашем случае фактор сцепления не является пренебрежимо малым. Для вывода общего выражения для предельного горизонтального напряжения (σ_1)_{max} можно воспользоваться формулами пересчета напряжений при повороте системы координат на угол β . В случае, когда рассматриваемая плоскость разрушения наклонена («повернута») на угол β относительно горизонтальной плоскости, т.е. направления действия σ_1 , выражения для нормального, σ_n , и касательного, τ_n , напряжений на этой плоскости принимают форму:

$$\begin{aligned} |\tau_n| &= \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta, \quad \sigma_n = \\ &= \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta. \end{aligned} \quad (6)$$

При оценках предельного напряжения $(\sigma_1)_{\max}$ величину $|\tau_n|$ можно приравнять к максимальному касательному напряжению τ из выражения (5). Таким образом, после подстановки (6) в (5) и преобразований, учитывающих взаимосвязь между коэффициентом внутреннего трения f и наклоном плоскости наиболее легкого разрушения в случае пологих надвигов (взбросов) $\operatorname{tg} 2\beta = 1/f$, получается следующее выражение:

$$(\sigma)_{\max} = \sigma_3 \frac{(1+f^2)^{1/2} + f}{(1+f^2)^{1/2} - f} + \frac{2C_0}{(1+f^2)^{1/2} - f}. \quad (7)$$

Для получения зависимости предельного горизонтального напряжения $\sigma_1(h)$ от глубины, h , с помощью (7) в эту формулу подставлялись значения вертикального (литостатического) давления $\sigma_3(h)$, представленные в работе [9]. Литостатическое давление оценивалось с использованием эмпирической формулы Белла, основанной на зависимости литостатики от глубины [22]:

$$\sigma_3 [\text{МПа}] = 0.018 h - 0.9, h [\text{м}]. \quad (8)$$

К недостаткам методик расчета зависимостей $\sigma_3(h)$, подобных (8), можно отнести их невысокую точность. Преимуществами методики являются независимость от наличия каротажных данных, возможность оценок литостатического давления от поверхности до забоя. График полученной зависимости предельного горизонтального напряжения представлен на рис. 2 вместе с графиком вертикального (литостатического) давления. Для всех скважин графики вертикального напряжения $\sigma_3(h)$ описываются линейной регрессией со среднеквадратичным отклонением менее 1 МПа. Выражения для регрессии вида $\sigma_3 = \alpha \cdot h$ приведены в таблице. Для Анивского месторождения угловые коэффициенты α оказались меньше, чем для Полярнинского, что отражает меньшее значение средней плотности пород в интервале глубин до 1.4 км (скважины ЮЛ-14 и Петр-1) по сравнению с интервалом $0 < h \leq 3$ км (скважины 4-П, 6-П, 7-П).

Для зависимостей $\sigma_{1\max}$ от глубины также проявляется линейно растущий тренд, но среднеквадратичное отклонение от него значительно больше, в особенности для скважин 6-П и Петр-1. На рис. 3 показаны максимальные сдвиговые напряжения, $\tau_{\max} = \frac{1}{2} [(\sigma_1)_{\max} - \sigma_3]$ в зависимости от глубины. Согласно рис. 2, 3 (графики 4-П, 6-П, 7-П), в осадочных массивах Полярнинского месторождения на глубине около 3 км предельные горизонтальные напряжения могут достигать $(\sigma_1)_{\max} \sim 180$ МПа, вертикальные напряжения – $\sigma_3 \sim 60$ МПа, а максимальное сдвиговое напряжение на этой глубине (у среза скважин) оценивается величиной $\tau_{\max} \sim 60$ МПа. Для Анивского месторо-

ждения аналогичные оценки получены для глубин до 1.4 км (рис. 2, 3, графики ЮЛ-14, Петр-1). На этой глубине значения напряжений «in situ» составляют $(\sigma_1)_{\max} \sim 70$ МПа; $\sigma_3 \sim 25$ МПа; $\tau_{\max} \sim 23$ МПа.

На рис. 4 показаны значения отношения предельного горизонтального напряжения $(\sigma_1)_{\max}$ к вертикальному напряжению σ_3 на разных глубинах по данным для скважин 7-П и ЮЛ-14. Результат расчетов для других скважин Полярнинского месторождения оказался сходным со случаем скважины 7-П рис. 4 а. Зависимость отношения $K_\sigma = (\sigma_1)_{\max}/\sigma_3$ по данным со скважины Петр-1 близка к показанной на рис. 4. Таким образом, графики на рис. 4 отражают сходное поведение параметра $(\sigma_1)_{\max}/\sigma_3$ на севере и юге Сахалина. Графики на рис. 2 и 4 свидетельствуют, что в диапазоне глубин 1000–2800 м Полярнинского месторождения предельное горизонтальное напряжение больше вертикального в среднем в 3 раза, что соответствует региональной геодинамической обстановке [8, 13]. На глубинах около 3 км, где отмечено резкое возрастание угла внутреннего трения [9, 11], график демонстрирует большее отношение напряжений (т.е. значительное возрастание предельных горизонтальных напряжений до уровня в 3.5–4 раза больше вертикальных). На Анивском месторождении также наблюдается подобная картина. Значения горизонтальных напряжений превышают вертикальные в среднем в 2–3 раза аналогично тому же интервалу глубин Полярнинского месторождения. Нужно отметить, что предельное горизонтальное напряжение на Полярнинском месторождении несколько выше, чем на Анивском месторождении в интервале сходных глубин 1200–1400 м. Это может быть связано с различием во флюидогазонасыщении месторождений на этих глубинах. На Анивском месторождении этому интервалу соответствует продуктивный горизонт, а на Полярнинском месторождении это интервал покрывающей. Можно применить также и другой способ сравнения результатов для севера и юга Сахалина, при котором расчеты для скважин Анивского месторождения, полученные для глубин до 1.4 км (рис. 2, 3), экстраполируются до глубины 3 км. При этом используется линейная регрессия для зависимости вер-

Таблица. Линейная регрессия показанных на рис. 2 зависимостей вертикального напряжения.

Источник данных	Регрессия $\sigma_3(h)$, σ_3 [МПа], h [м]
4-П	$\sigma_3 = 0.017 h$
6-П	$\sigma_3 = 0.021 h$
7-П	$\sigma_3 = 0.021 h$
ЮЛ-14	$\sigma_3 = 0.016 h$
Петр-1	$\sigma_3 = 0.016 h$

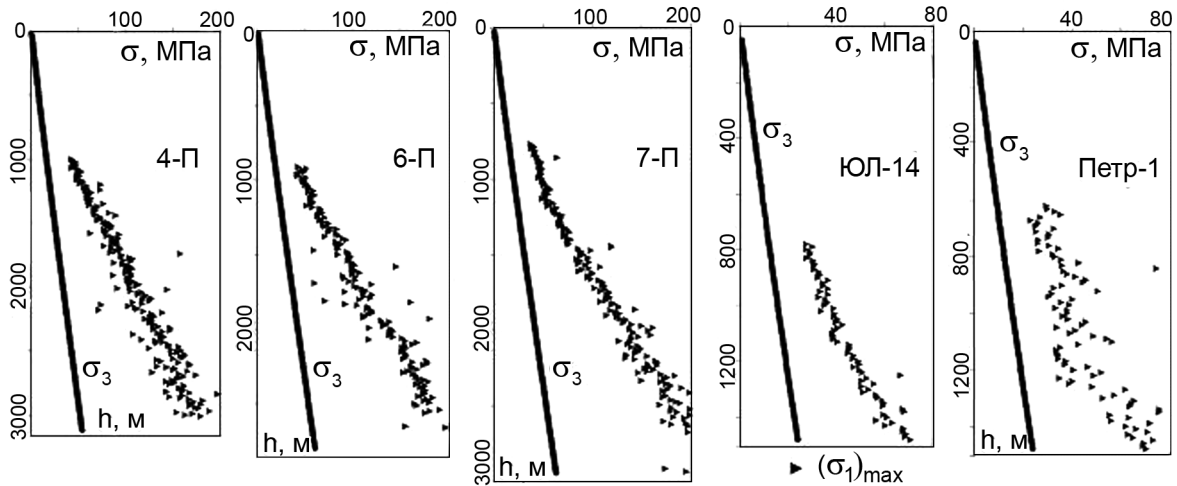


Рис. 2. Зависимость от глубины вертикального и предельного горизонтального напряжений в коре по месту расположения скважин 4-П, 6-П, 7-П Полярнинского месторождения и скважин ЮЛ-14 и Петр-1 Анивского месторождения о. Сахалин.

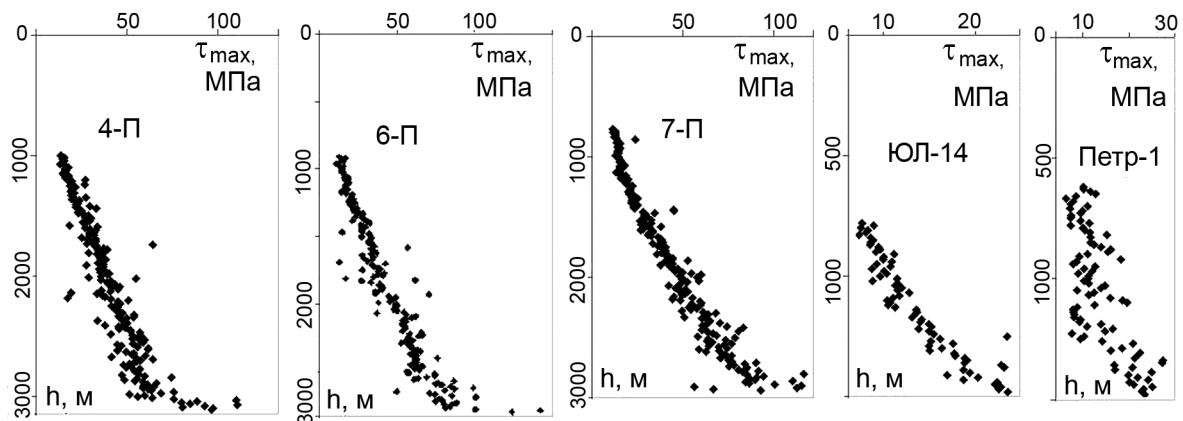


Рис. 3. Зависимость от глубины максимального сдвигового напряжения по данным каротажа тех же скважин, что и на рис. 2.

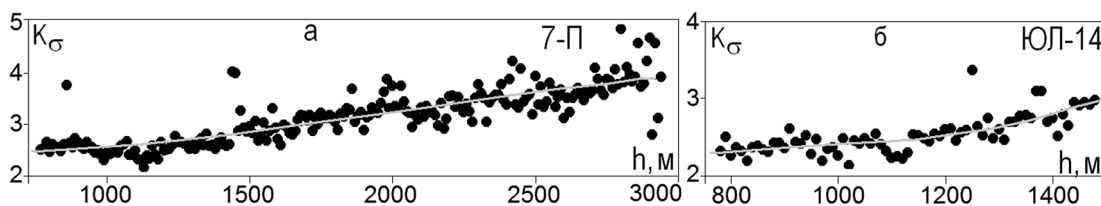


Рис. 4. Отношение напряжений $K_{\sigma} = (\sigma_{1 \max})/\sigma_3$ на разных глубинах, на примере скважин 7-П (график а) и ЮЛ-14 (график б).

тикального напряжения от глубины (рис. 2, табл.) и характерное значение отношения $K_{\sigma} \approx 2.9$ на глубине $h \geq 1.4$ км (рис. 4). Такая экстраполяция дает значения вертикального напряжения $\sigma_3 \sim 55$ МПа, предельного горизонтального напряжения $(\sigma_1)_{\max} \sim 160$ МПа. Следовательно, максимальное сдвиговое напряжение на глубине 3 км (Анивское месторождение) можно оценить как $\tau_{\max} \sim 53$ МПа, т.е. численно значение τ_{\max}

близко к σ_3 . Как видно, и на глубине 3 км значения $(\sigma_1)_{\max}, \tau_{\max}$ для Полярнинского месторождения (см. выше) превышают соответствующие значения для Анивского месторождения.

Для проверки того, что оценки величин предельных напряжений $(\sigma_1)_{\max}, \tau_{\max}$ отражают реальное напряженное состояние осадочных пород на рассматриваемых глубинах (и поэтому могут использоваться

в моделях состояния среды), были проанализированы данные о локальной сейсмичности вокруг Анивского месторождения. Для анализа использовался каталог землетрясений южной части о. Сахалин за 2003–2010 гг., составленный Сахалинским филиалом ГС РАН и ИМГиГ ДВО РАН. Каталог включает более 5 тысяч событий, диапазон представительных магнитуд $2.0 \leq M \leq 6.0$ [12]. По каталогу с помощью сейсмологического программного комплекса Seis-ASZ, разработанного в ИМГиГ ДВО РАН, были выделены события, у которых гипоцентры расположены на малых глубинах (до 3 км) на расстоянии не более 20 км от каждой из скважин Анивского месторождения. Для скважины ЮЛ-14 таких событий оказалось 13, а для Петр-1 – 14 (примерно 10 % от всех событий, попавших в круг радиусом 20 км с центром по месту одной или другой скважины). Магнитуды событий составляют от 2.1 до 3.2. Среди этих двух выборок событий имеются 4 наиболее мелкофокусных, с гипоцентрами на глубинах менее 1.5 км. Также имеется 5 событий, гипоцентры которых удалены от скважины ЮЛ-14 или Петр-1 не более, чем на 10 км. Аналогичным образом анализировались данные о локальной сейсмичности вокруг Полярнинского месторождения. По каталогу землетрясений северной части Сахалина за 2010–2014 гг., составленному в ИМГиГ ДВО РАН [31], было выделено 2 события, у которых гипоцентры расположены на глубине до 3 км и на расстоянии не более 20 км от скважины 7-П (около 9 % от общего числа событий в этой круговой зоне). Для каждого из выделенных событий время между его датой и временем геофизических исследований на ближайшей скважине (привязка «in situ» оценок по времени) не более 5–10 лет. За такой интервал времени горизонтальное (тектоническое) напряжение не могло значительно измениться, даже с учетом спада напряжений в очагах землетрясений [17, 20, 21]. Таким образом, наблюдения крайне мелкофокусных землетрясений в окрестностях Анивского и Полярнинского месторождений свидетельствуют, что напряженное состояние осадочных пород Сахалина характеризуется горизонтальными напряжениями, которые близки к оценкам предельных значений по критерию Кулона-Мора. Другими словами, модель субкритического напряженного состояния породных массивов позволяет количественно оценивать напряжение главного сжатия на основе данных комплексного каротажа скважин.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Традиционно обсуждение вопросов напряженного состояния земной коры начинается с модели А.Н. Динника [7], по которой в верхней части земной

коры наибольшее сжатие создается за счет веса пород, а горизонтальные напряжения определяются упругим деформированием массивов в стесненных условиях. Отсюда вытекает, что величина горизонтальных напряжений должна быть меньше, чем вертикальных (литостатического давления). Однако экспериментальные измерения напряжений методами разгрузки, проведенные в различных регионах мира, показали, что в большинстве случаев верхние слои земной коры находятся в напряженном состоянии с горизонтальным сжатием, превосходящим вертикальное (литостатическое давление) [24, 25, 32]. Исследования, основанные на структурно-геологических методах [14, 15, 33], также свидетельствуют, что в земной коре наиболее распространено состояние с преобладанием горизонтального сжатия. Для учета этого обстоятельства при описании горизонтальных напряжений феноменологически вводятся поправочные коэффициенты к формулам Динника [7], названные коэффициентами бокового отпора [16]. Пониманию причин разнообразия соотношений между горизонтальными и вертикальными напряжениями в значительной степени способствовала работа [18], в которой обосновано, что такое разнообразие может быть следствием геодинамической эволюции (перемещений массивов по вертикали) и переходом к пластичности на некоторых глубинах (хотя, по мнению автора [17, 18], преобладание вертикальных напряжений естественно ожидать в регионах без заметных горизонтальных движений, в частности – платформах).

Распространенность состояния с преобладанием горизонтальных напряжений нашла свое отражение в модели Хаста [25], предложившего следующую формулу, описывающую зависимость от глубины суммы главных горизонтальных напряжений, σ_x и σ_y (т.е. среднее горизонтальное напряжение):

$$\sigma_x + \sigma_y = 0.098 h + 18. \quad (9)$$

В формуле (9) напряжения выражены в МПа, а глубина h измеряется в метрах. Сравнение суммы горизонтальных напряжений, определяемых (9), и удвоенного литостатического давления, описываемого упрощенным выражением: $p = \alpha_{cp} h$, $\alpha_{cp} = 0.027$, [15], свидетельствует, что на глубинах 1–3 км значения суммы ($\sigma_x + \sigma_y$) примерно вдвое больше $2p$ на той же глубине. Из выражений (9) следует, что зависимость отношения ($\sigma_x + \sigma_y$) к удвоенному литостатическому давлению, $2p$, описывается убывающей функцией:

$$K = (\sigma_x + \sigma_y) / 2p \approx 0.33 / h + 1.8. \quad (10)$$

Подтверждение этого результата можно найти также в работе [24], в большей степени основанной на измерениях в шахтах и глубоких карьерах. На рис. 5 представлена информация об отношениях го-

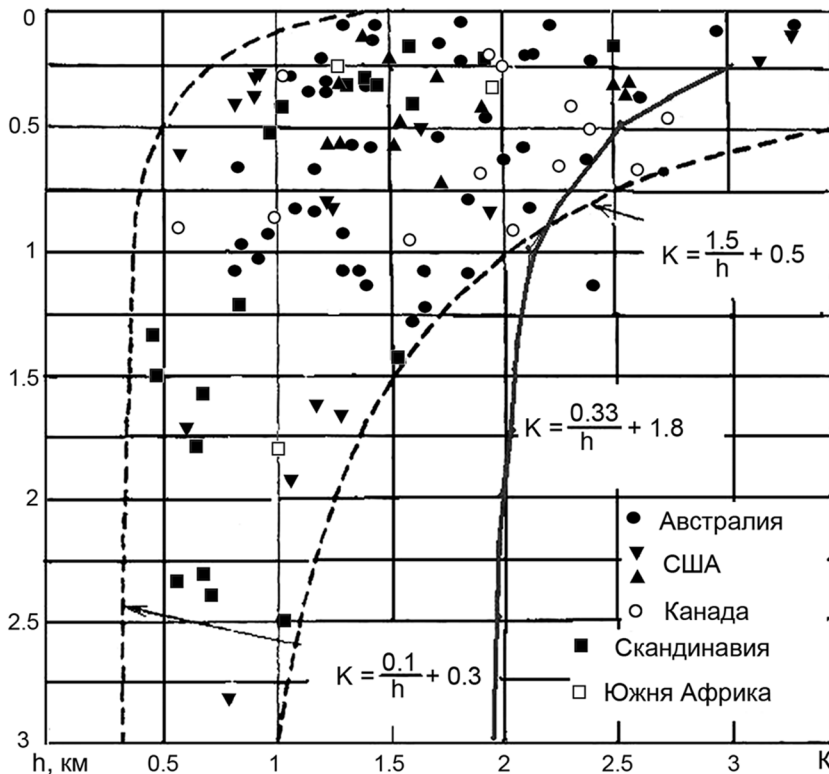


Рис. 5. Данные об отношении среднего горизонтального напряжения к вертикальному (K) для разных регионов, по материалам [14]. Для сравнения сплошной линией показана зависимость K , определяемая (10).

ризонтовых и вертикальной компонент усредненного тензора напряжений по глобальным данным (мировая статистика). При интерпретации этих результатов распространено мнение, что с ростом глубины превышение горизонтального напряжения над вертикальным уменьшается. Это отражено в спадающих трендах $K = 1.5/h + 0.5$, или $K = 0.1/h + 0.3$, [24]. Однако такая интерпретация вызывает сомнения. Действительно, значительная часть результатов, показанных на рис. 5, была получена в шахтах методом разгрузки и относится к глубинам до 1 км. Если же рассматривать на рис. 5 диапазон глубин более 1 км, в него попадет лишь небольшое количество измерений, для которых линейная регрессия дает скорее константу $K = 0.8 \pm 0.3$, чем спадающую зависимость. Такие значения K можно считать характерными для платформенных регионов (Австралия, США, Канада), [15].

Восполнить недостаток исследований на более глубоких горизонтах были призваны различные проекты научного бурения. В этих проектах значительное внимание было уделено распределению вертикальных и горизонтальных напряжений и, в частности, их зависимости от глубины [6, 23]. Один из наиболее информативных проектов научного бурения был осуществлен вблизи разлома Сан-Андреас (США), где была пробурена целая серия исследовательских сква-

жин. Основной целью проекта было вертикальное бурение вдоль и вкрест простираения разлома, а также наклонно-направленное бурение в активную область разлома Сан-Андреас с отбором кернов. Скважины расположены как вдоль разлома, так и на удалении от него. В рамках этого проекта была сооружена скважина SAFOD (San Andreas Fault Observatory at Depth), с которой был получен материал с глубин 2.6–2.7 км непосредственно из разломной зоны [19, 30]. Вертикальная компонента напряжений оценивалась по распределению плотности, определяемому методом плотностного гамма-гамма каротажа, ГГК. Горизонтальные компоненты определялись по данным гидроразрыва, анализу обрушений стенок скважины и по трещинным образованиям. Было обнаружено более чем двукратное превышение максимального горизонтального напряжения над вертикальным (по материалам [26, 30]). Однако по месту пересечения скважины с зоной разлома наблюдались отклонения от этого соотношения: отмечено приблизительное равенство компонент напряжений, что проявилось в характере трещиноватости.

Другая скважина, Cajon Pass, была пробурена в рамках научного проекта вблизи разлома Сан-Андреас. По проекту Cajon Pass измерения напряжений проводились в несколько этапов. Предварительно была проведена интерпретация данных гидроразры-

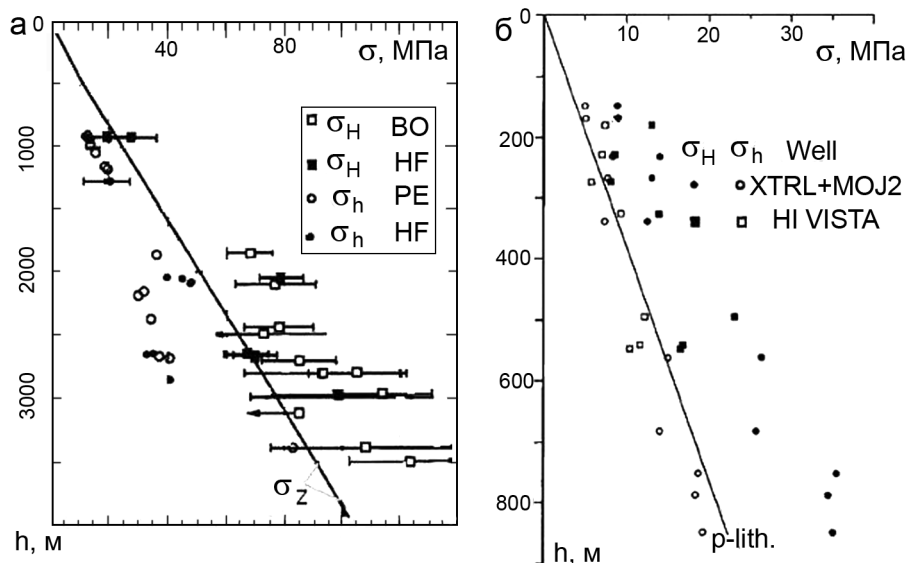


Рис. 6. Зависимости напряжений от глубины по сводным данным со скважин Cajon Pass (а) Hi Vista, XTLR и Mojave Desert-2 (MOJ2) (б), по материалам [26, 33].

Обозначения методов определения напряжений: BO – на основе обрушений стенок скважин (break-out), HF – метод гидроразрыва (hydrofracture), PE – ранее существовавших трещин (pre-exist); p-lith – вертикальная компонента напряжения.

ва в близлежащих скважинах. Основные оценки минимального горизонтального напряжения были получены в результате 23 испытаний на гидроразрыв в скважине Cajon Pass, а максимального горизонтального напряжения – по данным 6 испытаний [34]. Затем было проведено 12 оценок максимального горизонтального напряжения на основе анализа обрушений стенок скважины. Сводная информация представлена на рис. 6а. Как и в случае проекта SAFOD, исследование напряжения в скважине выявило сдвиговый режим напряженного состояния: $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$; $\sigma_1 = \sigma_H$, $\sigma_2 = \sigma_z$, $\sigma_3 = \sigma_h$. Однако в случае проекта Cajon Pass горизонтальная компонента напряжения σ_1 лишь ненамного превышает вертикальную σ_z , различие с наименьшим из горизонтальных напряжений σ_h более существенно. В интервале глубин 2500–3200 м значения максимального горизонтального напряжения практически соответствуют σ_z с учетом погрешности измерения [34]. Значительный разброс измеренных величин горизонтальных напряжений авторы [34] пояснили пересечением скважиной активных разломов и трещин на глубинах 2500–3200 м.

Кроме упомянутых скважин, в рамках научно-го бурения вблизи разлома Сан-Андреас также были пробурены скважины Hi Vista, XTLR и MOJ2 [26]. Эти скважины не такие глубокие, как SAFOD и Cajon Pass. Однако они находятся на разных расстояниях от разлома Сан-Андреас, что позволяет выделять изменения напряженно-деформированного состояния горных пород в зависимости от удаления от разлома. Как и в других работах, вертикальная компонента была рассчитана на основе данных о плотностях горных пород, горизонтальные компоненты рассчитывались на основе данных гидроразрыва [26]. Сводные данные о распределении напряжений вокруг скважин

Hi Vista и XTLR представлены на рис. 6 б. Графики вертикального напряжения на рис. 6 хорошо согласуются с усредненной зависимостью $\sigma_3 = 0.027 h$, предложенной в [15] для коренных пород. Стоит отметить, что угловой коэффициент 0.027 несколько больше по сравнению с приведенными в табл. 1 значениями для осадочных массивов Сахалина. Показанные на рис. 6 результаты свидетельствуют о преобладании горизонтального сжатия над вертикальным в районе разлома Сан-Андреас (что соответствует геодинамическому режиму взбросов или сдвигов [20]). Совместный анализ напряжений в скважинах Hi Vista и XTLR показывает, что величина горизонтальных напряжений либо остается постоянной, либо уменьшается по мере удаления от разлома Сан-Андреас. При сопоставлении данных на рис. 6 и рис. 2 можно отметить сходство распределений по глубине горизонтальных напряжений на восточном фланге Тихоокеанского подвижного пояса (зона разлома Сан-Андреас, [19, 26, 30]) и распределений предельных горизонтальных напряжений в осадочных массивах Сахалина (северо-запад Тихоокеанского региона).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проектов научного бурения существенно дополнили и уточнили информацию о напряжениях на глубинах 1-5 км, полученную сейсмологическими методами (по механизмам очагов землетрясений). Подтверждено, что на этих глубинах в ряде районов земной коры реализуются режимы горизонтального сжатия и горизонтального сдвига, т.е. направление действия главного напряжения – субгоризонтально. Такие результаты являются своего рода связующим звеном между приповерхностными геоме-

ханическими и геофизическими измерениями напряжения и данными глубинных сейсмологических методов. Однако количество исследовательских (научных) скважин невелико, и поэтому представляет интерес расширение объема информации, полученной при бурении других глубоких скважин. Такой подход и был реализован нами на основе данных бурения разведочных и эксплуатационных скважин о. Сахалин. Как на севере, так и на юге Сахалина максимальное субширотное сжатие может превышать вертикальное напряжение, в среднем, в 1.2–4 раза. Наблюдается увеличение отношения предельного горизонтального напряжения к вертикальному в диапазоне глубин 1–3.5 км. Прикладное значение полученных результатов определяется тем, что современная технология бурения горизонтальных и сверхпротяженных скважин для освоения новых нефтегазовых месторождений о. Сахалин и прилегающего морского шельфа использует априорную информацию о распределении вертикальной и горизонтальных компонент тензора напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Али А.Х., Марти Ш., Еса Р. и др. Передовой метод гидравлического разрыва пласта с использованием геомеханического моделирования и механики пород – технически интегрированный подход // Нефтегазовое обозрение. Осень 2002. С. 75–83.
- Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Сапрыгин С.М. Горизонтальные движения и генерация сильных землетрясений в недрах Северного Сахалина // Тихоокеан. геология. 2011. Т. 30, № 3. С. 76–80.
- Василенко Н.Ф., Прытков А.С. Моделирование взаимодействия литосферных плит на о. Сахалин по данным GPS наблюдений // Тихоокеан. геология. 2012. Т. 31, № 1. С. 42–48.
- Воейкова О.А., Несмеянов С.А., Серебрякова Л.И. Неотектоника и активные разломы Сахалина. М.: Наука, 2007. 187 с.
- Голозубов В.В., Касаткин С.А., Гранник В.М., Нечаюк А.Е. Деформации позднемиоценовых и кайнозойских комплексов Западно-Сахалинского террейна // Геотектоника. 2012. № 5. С. 22–43.
- Горбачевич Ф.Ф., Савченко С.Н. Современные напряжения в северной части Балтийского щита по данным исследований Печенегского геоблока и разреза Кольской сверхглубокой скважины // Геофиз. журн. 2009. Т. 31, № 6. С. 41–54.
- Динник А.Н. О давлении горных пород и расчете крепи круглой шахты // Инж. работник. 1926. № 3. С. 1–12.
- Злобин Т.К., Ершов В.В., Полец А.Ю. Строение земной коры, поле тектонических напряжений и грязевой вулканизм Сахалино-Курильского. Южно-Сахалинск: Изд-во СахГУ, 2012. 176 с.
- Каменев П.А., Богомолов Л.М., Валетов С.А. Об оценках геомеханических параметров осадочных породных массивов по данным комплексного каротажа скважин (на примере Сахалина) // Труды Всерос. конф. «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли». Новосибирск, 2011. С. 133–139.
- Каменев П.А., Богомолов Л.М., Валетов С.А. О методах оценок геомеханических параметров массивов осадочных пород «in situ» по данным каротажа // Тихоокеан. геология. 2012. Т. 31, № 6. С. 109–114.
- Каменев П.А., Богомолов Л.М. Комплексное исследование напряжений на основе данных каротажа и бурения на примере Сахалина // НТВ Каротажник. 2013. № 228. С. 13–23.
- Каталог землетрясений юга Сахалина за период с 2000 по 2010 г. (по данным автономных цифровых сейсмических станций) / Ч.У. Ким, Е.П. Семенова, О.А. Жердева и др. Владивосток: Дальнаука, 2011. 357 с.
- Кожурин А.И. Активная геодинамика северо-западного сектора Тихоокеанского тектонического пояса (по данным изучения активных разломов): Автореф. дис... д-ра геол.-минер. наук. М., 2013. 46 с.
- Козырев А.А., Савченко С.Н. Закономерности распределения тектонических напряжений в верхней части земной коры // Физика Земли. 2009. № 11. С. 34 М.43.
- Кропоткин П.Н., Ефремов В.Н., Макеев В.М. Напряженное состояние земной коры и геодинамика // Геотектоника. 1987. № 1. С. 3 М.24.
- Марков Г.А. Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. Л.: Наука, 1977. 211 с.
- Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных массивов. М.: ИЦК «Академкнига», 2007. 406 с.
- Ребецкий Ю.Л. Механизм генерации тектонических напряжений в областях больших вертикальных движений // Физ. мезомеханика. 2008. Т. 1, № 11. С. 66–73.
- Романюк Т.В., Власов А.Н., Мнушкин М.Г. и др. Реологическая модель и особенности напряженно-деформированного состояния региона активной сдвиговой разломной зоны на примере разлома Сан-Андреас (Калифорния). Тектонофизическая модель литосферы // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2013. Т. 88. Вып. 1. С. 3–17.
- Теркотт Д., Шуберт Дж. Геодинамика: геологические приложения физики сплошных сред. Ч. 2. М.: Мир, 1985. 360 с.
- Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмоструктурных деформаций. М.: Наука, 1990. 191 с.
- Bell L.N. Pressures and fracture gradient. New York: Scientific Publ. Company, 1969. 319 p.
- Brudy M., Zoback M.D., Fuchs K., et al. Estimation of the complete stress tensor to 8 km depth in the KTB scientific drill holes: Implication for crustal strength granites // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 18453–18475.
- Cunha A.P. Scale effect in rock mechanics // Proc. of First Int. Workshop on scale effect in rock masses. Rotterdam. Balkema, 1990.
- Hast N. The state of stress in the upper part of the Earth's crust // Tectonophysics. 1969. V. 8, N 3. P. 169–211.
- Hickman S., Zoback M. D., Healy J.H. Continuation of a deep borehole stress measurement profile near the San Andreas fault. Hydraulic fracturing stress measurements at Hi Vista, Mojave Desert, California // J. Geophys. Res. 1988. V. 93. P. 15183–15195.
- Horsrud P. Estimating mechanical properties of shale from empirical correlations // SPE Drilling & Completion. 2001. N 6. P. 68–73. SPE 56017.

28. Lal M. Shale stability: Drilling fluid interaction and shale strength // Paper SPE 54356 presented at the 1999 SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference held in Caracas, Venezuela. 21–23 April 1999.
29. Nguyen V.X., Abousleiman Y.N. Real-time wellbore-drilling instability in naturally fractured rock formations with field applications // Paper IADC/SPE 135904 presented at the IADC/SPE Drilling Technology Conference and Exhibition held in Ho Chi Minh City, Vietnam. 1–3 November 2010.
30. Pijush P., Zoback M. Wellbore-stability study for the SAFOD borehole through the San Andreas fault // SPE Drilling & Completion. 2008. N 12. P. 394–408.
31. Stepnov A.A., Gavrilov A.V., Konovalov A.V., Ottmoller L. New Architecture of an automated system for acquisition, storage, and processing of seismic data // Seismic Instruments. 2014. V. 50, N. 1. P. 67–74.
32. Voight B., St Pierre B.H.P. Stress history and rock stress // Third Rock Mechanics Congress ISRM. 1974. V. 2. P. 580–582.
33. Zoback M.L. First and second order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P. 11703–11728.
34. Zoback M.D., Healy J. In Situ Stress Measurements to 3.5 km Depth in the Cajon Pass Scientific Research Borehole Implications for the Mechanics of Crustal Faulting // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P. 5039–5057.

Рекомендована к печати Б.В. Левиным

P.A. Kamenev, L.M. Bogomolov, A.S. Zakupin

On the stressed state of the Sakhalin crust from data of deep wells drilling

The paper is concerned with the calculations and analysis of the stressed state of the sedimentary rocks at oil and gas fields of Sakhalin as well as with the data obtained from the research boreholes in the eastern Pacific (San Andreas fault zone). The values of vertical and limiting horizontal stress have been calculated for various depths. Both in the north and south of Sakhalin the maximal sublateral stress may exceed the vertical stress by 1.2–4 times in average. It is shown that the limiting horizontal stress and the maximal shear stress grow with the depth increase.

***Key words:* stress, borehole, drilling, Sakhalin.**