



Воронина Татьяна Евгеньевна

В 2015 г. окончила Российский государственный гидрометеорологический университет по направлению «метеорология».

С 2016 г. инженер Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» и аспирантка Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Область научных интересов: закономерности тектонического развития Сахалина как зоны перехода от континента к океану, связь сейсмичности с атмосферными процессами.

Тема диссертационных исследований – «Сейсмические индикаторы изменения гедеформационного состояния земной коры». Имеются публикации в сборниках материалов российских конференций. Научный руководитель д.ф.-м.н. Леонид Михайлович Богомолов.

Личный вклад аспиранта в статью: участие в обсуждении результатов, обработка массива геофизической информации для графических построений.

УДК 550.82+571.642

П.А. КАМЕНЕВ, Т.Е. ВОРОНИНА

Исследование поля напряжений земной коры Сахалина в связи с проблемами освоения нефтегазовых месторождений

С учетом геомеханических параметров горных пород Полярнинского и Анивского месторождений о-ва Сахалин, рассчитанных на основе данных каротажа, произведена оценка предельного горизонтального и вертикального напряжений земной коры. Использование данных фокальных механизмов землетрясений позволяет дополнить результаты геофизических исследований скважин. Расчет распределения параметра Лодэ–Надаи подтвердил доминирование горизонтального сжатия на территории Сахалина.

Ключевые слова: напряжение, скважина, сейсмичность, Сахалин.

Study of the Earth crust stress field of the Sakhalin Island in the context of problems with development of oil and gas fields. P.A. KAMENEV, T.E. VORONINA (Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk).

We estimate horizontal and vertical breaking stress based on geomechanical parameters of rocks from Polyarninskoe and Anivskoe deposits derived from logging data. Seismology data usage able to append logging results. Lode-Nadai coefficient verified horizontal compression domination for Sakhalin Island territory.

Key words: stress, borehole, seismicity, Sakhalin.

*КАМЕНЕВ Павел Александрович – кандидат технических наук, научный сотрудник, ВОРОНИНА Татьяна Евгеньевна – аспирант (Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск). *E-mail: p.kamenev@imgg.ru

Разработка и эксплуатация нефтегазовых месторождений в сейсмоопасном регионе в субарктических условиях невозможна без применения современных технологий, использующих информацию о распределении напряжений в геологической среде, соотношении вертикально и горизонтально действующих напряжений. Учет особенностей напряженного состояния породных массивов необходим, в частности, при бурении наклонно направленных скважин, интерпретации данных геофизических исследований, проведении перфорации и гидроразрыва пласта, эксплуатации месторождения и в ряде других приложений [4, 11, 16]. Бурение горизонтальных скважин на нефтегазовых месторождениях Сахалина в условиях высокой тектонической активности сопряжено со значительными трудностями обеспечения стабильности стенок скважины. Из практики известно, что на месторождениях с подобными геологическими условиями происходят обрушения стенок скважины, которые осложняют процесс ее строительства на этапах бурения и спуска обсадной колонны. Во время эксплуатации скважин такие условия создают проблемы, связанные с повышенным выносом песка [11, 15, 16]. На таких месторождениях до начала бурения необходимо иметь четкое представление о распределении локальных напряжений, разломов, рассчитать удельный вес бурового раствора, который будет компенсировать воздействие внешних факторов. Соотношения горизонтального и вертикального напряжений известны, как правило, в диапазоне глубин от 0 до 1 км преимущественно по данным метода разгрузки и в интервале 5–30 км по данным сейсмологии [8, 17]. Диапазон глубин от 1 км до 5 км мало изучен. Уточнение значений геомеханических параметров и предельных девиаторных напряжений в этом диапазоне, которые определяют тот или иной критерий разрушения, представляется актуальным также в связи с проблемой интерпретации землетрясений с гипоцентром в осадочных породах, попадающим как раз в этот диапазон глубин. Распространено мнение, что землетрясения на таких глубинах не могут происходить, а случаи регистрации событий с глубиной гипоцентра до 5 км объясняются либо погрешностью расчетов, либо приповерхностными явлениями (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 напряжения на глубинах до 5 км) приводят к сейсмическим подвижкам. В настоящей работе предпринята попытка оценки локальных напряжений на основе данных комплексного каротажного исследования (каротажа сопротивлений, акустического, естественной гамма-активности) совместно с данными фокальных механизмов землетрясений.

При выборе района исследования предпочтение отдавалось глубоким скважинам, на которых проводился комплексный картаж. В полной мере этим требованиям удовлетворяют материалы изучения скважин на Полярнинском нефтяном месторождении, расположенном на северо-востоке Сахалина, и Анивском газовом месторождении, находящемся в южной части острова (рис. 1). Полярнинское месторождение приурочено к отложениям нижнего миоцена. Здесь имеется сеть вертикальных скважин с глубиной более 3000 м. В работе использованы данные скважин 4-П, 6-П и 7-П. Анивское месторождение приурочено к верхнемиоцен-плиоценовым отложениям. Используется картаж двух скважин этого месторождения: Южно-Луговской (ЮЛ-14) и Петропавловской (Петр-1).

Можно считать, что литостатическое давление соответствует наименьшему из главных напряжений: $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, где σ_1 – наибольшее горизонтальное напряжение (сжатие), σ_2 – меньшее горизонтальное напряжение, σ_3 – вертикальное напряжение. О такой геодинамической обстановке свидетельствуют данные кавернометрии скважин Пильтун-Астохского месторождения, расположенного на севере Сахалина. Они продемонстрировали 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, эти обрушения указывают направление действия максимального сжатия.



Рис. 1. Расположение Полярнинского и Анивского месторождений о-ва Сахалин

В проекте The world stress map (WSM) на карте напряжений для региона северо-востока Евразии отмечено преобладание режима горизонтального сжатия, что проявляется преимущественно в виде взбросов, определяемых по решениям для фокальных механизмов [17]. В зарубежной практике освоения нефтегазовых месторождений данные проекта WSM широко используются для уточнения локальной геодинамической обстановки, определения типа режима напряженно-деформированного состояния и направления действия главных напряжений [15]. Этот проект был создан на основе объединения данных по фокальным механизмам очагов землетрясений, гидроразрыву пласта, измерениям горизонтальных напряжений в шахтах методом разгрузки, анализу структурно-геологических признаков, материалов каротажа скважин и других данных из различных источников и отраслей экономики (нефтегазовой, горнорудной). Такое объединение способствует систематизации сведений о глобальном и локальном распределении напряжений. Из карты данного проекта следует, что Сахалин (как и значительная часть России) остается белым пятном в отношении измерения тектонических напряжений. Представляются актуальными и другие попытки обобщения показателей локального и глобального напряженно-деформированного состояния земной коры [2, 9, 12].

Для систематизации представлений о напряженном состоянии (типе геодинамических режимов) при наличии разноориентированных механизмов очагов удобно использовать распределения параметра Лодэ–Надаи μ_σ – инварианта напряженного состояния. Проведенный нами в работе [5] расчет распределения этого параметра продемонстрировал преобладание сжатия на всей территории Сахалина (рис. 2).

На рис. 2 также видно, что эпицентры сильнейших землетрясений, произошедших в период с 1940 по 1995 г.: Ногликского (2.10.1964, $M_w = 5,8$), Монеронского (5.09.1971, $M_w = 7,5$), Нефтегорского (27.05.1995, $M_w = 7,1$) – попадают в зоны сдвига (значения $-0,2 < \mu_\sigma < 0,2$). Сходный результат по распределению значений μ_σ для Сахалина был получен в работе [14] по данным об очагах землетрясений в период 1956–2010 гг. Стоит отметить, что аргументы в пользу субширотного сжатия коры Сахалина также приводились при анализе структурно-геологических данных и карт распределений скоростей сейсмических волн [10, 13].

Для оценок параметров напряженно-деформированного состояния среды на основе каротажных данных с использованием эмпирических соотношений нами были рассчитаны основные геомеханические параметры горных пород: угол внутреннего трения, сцепление и литостатическое напряжение [6]. Феноменологические оценки литостатического напряжения, коэффициента внутреннего трения и сцепления позволяют определить диапазон

возможных значений горизонтального (тектонического) напряжения. В основу этих оценок заложены представление о режиме новейшей геодинамики Сахалина (субширотное сжатие превышает уровень σ_3 в условиях взаимодействия Охотоморской и Амурской плит) и критерий Кулона–Мора:

$$\tau = f\sigma_n + C_0, \quad (1)$$

где τ – максимальное напряжение сдвига вдоль плоскости разрыва, σ_n – эффективное напряжение (напряжение в скелете породы), действующее нормально к плоскости разрыва, f – коэффициент внутреннего трения (часто выражается через угол внутреннего трения, $f = \text{tg } \varphi$), C_0 – сцепление.

Для вывода общего выражения для предельного горизонтального напряжения $(\sigma_1)_{\max}$ 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:

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

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

$$(\sigma_1)_{\max} = \sigma_3 \frac{(1 + f^2)^{1/2} + f}{(1 + f^2)^{1/2} - f} + \frac{2C_0}{(1 + f^2)^{1/2} - f}. \quad (3)$$

Для получения зависимости предельного горизонтального напряжения $\sigma_1(h)$ в формулу (3) подставляли значения вертикального (литостатического) напряжения $\sigma_3(h)$ из работы [7]. Также использовали результаты вычислений значений угла внутреннего трения $\varphi(h)$ и сцепления $C_0(h)$. График полученной зависимости предельного горизонтального напряжения приведен на рис. 3 вместе с графиком вертикального (литостатического) напряжения.

Анализ представленных на рис. 3 зависимостей напряжений от глубины позволяет заключить, что в диапазоне глубин 1000–2800 м Полярнинского месторождения предельное горизонтальное напряжение больше вертикального примерно в 1,5 раза, что соответствует региональному характеру напряжений [3, 8, 9]. На глубинах около 3 км график демонстрирует значительное возрастание предельных горизонтальных напряжений – до уровня в 3,5–4 раза больше вертикальных. На Анивском месторождении наблюдается подобная картина: в аналогичном интервале глубин значения горизонтальных напряжений превышают вертикальные в среднем в 2–3 раза.

Полученные зависимости напряжений от глубины, представленные на рис. 2 и 3, важны для понимания локальной геодинамики, могут использоваться для построения геомеханической модели месторождения. Такой подход позволяет существенно снизить риски при бурении в сложных геологических условиях. Совместное использование данных каротажа и сейсмологических данных позволяет вырабатывать комплекс мер, направленных

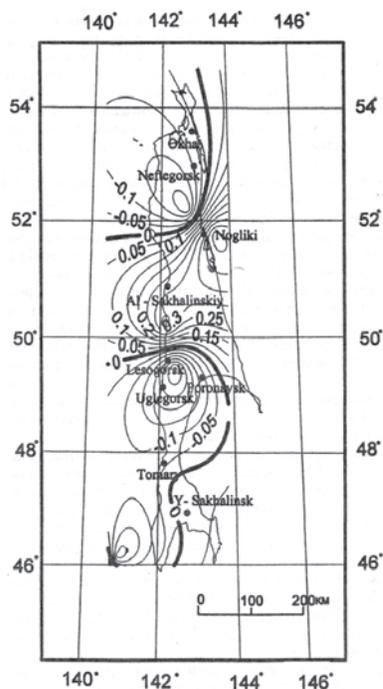


Рис. 2. Распределение коэффициента Лоде–Надаи в земной коре о-ва Сахалин по данным механизмов очагов землетрясений за 1940–1995 гг.

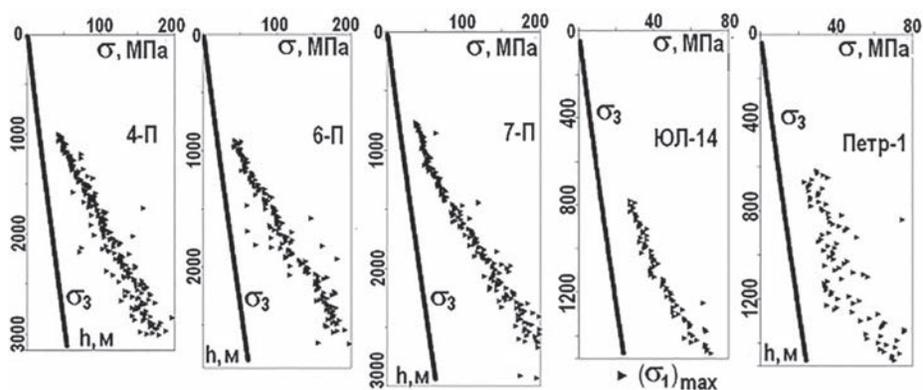


Рис. 3. Распределение по глубине вертикального и предельного горизонтального напряжений в земной коре для скважин Полярнинского и Анивского месторождений

на предотвращение нестабильности скважины. Результаты исследования могут быть полезны при разработке нефтегазовых месторождений севера и юга Сахалина как на этапах строительства скважин, так и при их эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. 2002. С. 75–83.
2. Ахмедов М.Б., Шлюнкин А.В., Лукьянов И.В., Ребецкий Ю.Л. Поле современных напряжений земной коры на сайте ИФЗ РАН «Global Stress Map» // Современная тектонофизика. Методы и результаты: материалы четвертой молодеж. тектонофиз. школы-семинара (5–9 окт. 2015 г., Москва). М.: ИФЗ РАН, 2015. Т. 1. С. 16–21.
3. Барышников В.Д., Курленя М.В., Леонтьев А.В. О напряженно-деформированном состоянии Николаевского месторождения // Физ.-техн. проблемы разработки полез. ископаемых. 1982. № 2. С. 3–12.
4. Ельцов И.Н., Назаров Л.А., Назарова Л.А., Эпов М.И. Эволюция полей деформаций и фильтрационных параметров породных массивов в зонах возможных разрушений в окрестности глубоких скважин // Физическая мезомеханика. 2010. Т. 13, № 6. С. 18–22.
5. Злобин Т.К., Каменев П.А. Особенности поля упругих напряжений в литосфере Сахалина // Тектоника и геодинамика континентальной литосферы: Материалы XXXVI Тектон. совещ. М.: ГЕОС, 2003. Т. 1. С. 223–228.
6. Каменев П.А., Богомоллов 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.
7. Каменев П.А., Валетов С.А. Оценка пластовых давлений по данным электрического каротажа на примере Полярнинского месторождения о. Сахалин // НТВ Каротажник. Тверь: АИС, 2011. № 207. С. 17–28.
8. Козырев А.А., Савченко С.Н. Закономерности распределения тектонических напряжений в верхней части земной коры // Физика Земли. 2009. № 11. С. 34–43.
9. Леонтьев А.В. Анализ естественных напряжений по результатам измерений в рудниках на территории северной Евразии // Физ.-техн. проблемы разработки полез. ископаемых. 2001. № 1. С. 31–40.
10. Мельников О.А. Структура и геодинамика Хоккайдо-Сахалинской складчатой области. М.: Наука, 1987. 95 с.
11. Николаевский В.Н., Капустянский С.М., Жиленков А.Г. Геомеханика скважины и два режима выноса песка // Нефтяное хоз-во. 2010. № 1. С. 43–51.
12. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных массивов. М.: Академкнига, 2007. 406 с.
13. Сапрыгин С.М. Тектоническая флюидодинамика. Южно-Сахалинск: Сах. кн. изд-во, 1997. 80 с.
14. Татаурова А.А. Поля напряжений и деформаций по данным механизмов коровых землетрясений о. Сахалин // Вестн. КРАУНЦ, Науки о Земле. 2015. № 3, вып. 27. С. 92–101.
15. Ascock A., Orourek T., Shirmboh D. Practical approaches to sand management // Oilfield review. 2004. Vol. 16, N 1. P. 10–27.
16. Aldred W., Plumb D., Bradford I. Managing drilling risk // Oilfield review. 1999. Vol. 11, N 1. P. 2–19.
17. Zoback M.L. First and second order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project // J. Geophys. Res. 1992. Vol. 97. P. 11703–11728.