



### 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 каротаж. 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 каротаж 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  $\sigma_1$  – наибольшее горизонтальное напряжение (сжатие),  $\sigma_2$  – меньшее горизонтальное напряжение,  $\sigma_3$  – 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 Лоде–Надаи  $\mu_\sigma$  – 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  $\mu_\sigma$  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  $\sigma_3$  в условиях взаимодействия Охотоморской и Амурской плит) и критерий Кулона–Мора:

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

где  $\tau$  – максимальное напряжение сдвига вдоль плоскости разрыва,  $\sigma_n$  – 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  $\beta$ . В случае, когда рассматриваемая плоскость разрушения наклонена («повернута») на угол  $\beta$  относительно горизонтальной плоскости (т.е. направления действия  $\sigma_1$ ), выражения для нормального,  $\sigma_n$ , и касательного,  $\tau_n$ , 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  $\tau$  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

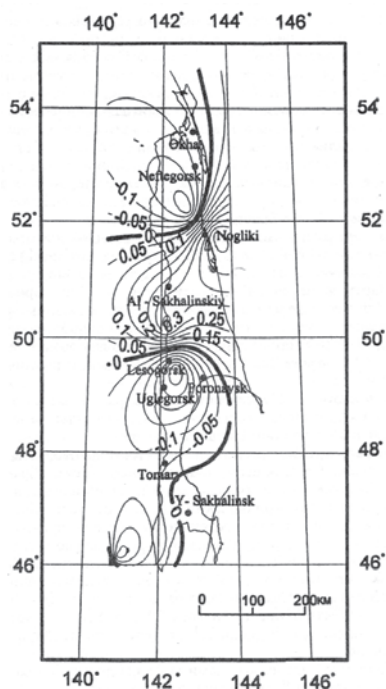


Рис. 2. Распределение коэффициента Лоде–Надаи в земной коре о-ва Сахалин по данным механизмов очагов землетрясений за 1940–1995 гг.

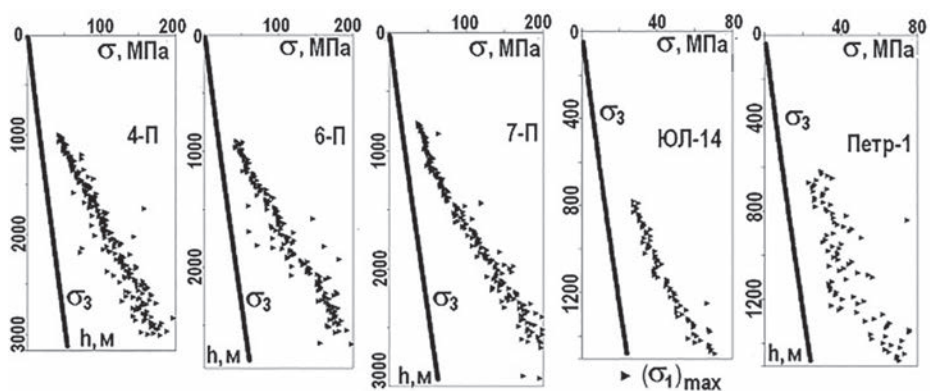


Рис. 3. Распределение по глубине вертикального и предельного горизонтального напряжений в земной коре для скважин Полярнинского и Анивского месторождений

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., Oroure 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.