

УДК 550.822.7

DOI 10.21285/0301-108X-2016-55-2-74-87

## ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ БУРЕНИЯ РАПОПРОЯВЛЯЮЩИХ ЗОН С АНОМАЛЬНО ВЫСОКИМ ПЛАСТОВЫМ ДАВЛЕНИЕМ В ПРИРОДНЫХ РЕЗЕРВУАРАХ КЕМБРИЯ НА КОВЫКТИНСКОМ ГАЗОКОНДЕНСАТНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

© А.Г. Вахромеев<sup>1</sup>, С.А. Сверкунов<sup>2</sup>, А.И. Ильин<sup>3</sup>, А.В. Поспеев<sup>4</sup>, И.В. Горлов<sup>5</sup>

<sup>1-3</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

<sup>2,4</sup>Институт земной коры СО РАН, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

<sup>5</sup>ООО «Газпромгеологоразведка», 625000, Россия, г. Тюмень, ул. Герцена, 70.

Условия бурения глубоких скважин на территории юга Сибирской платформы оцениваются как «сложные» ввиду присутствия в средней части разреза осадочного чехла в карбонатно-галогенной толще кембрия пластов коллекторов, которые могут характеризоваться либо поглощениями бурового раствора, либо аномально-высокими пластовыми давлениями (АВПД) флюидов. При проходке бурением зоны АВПД высока вероятность возникновения аварийной ситуации: от повреждения буровой колонны, буровой установки до потери скважины.

Высоконапорные пласты (зоны) юга Сибирской платформы содержат предельно насыщенные рассолы с концентрацией солей более 600 г/л и плотностью до 1,45 г/см<sup>3</sup>, нередко с газом, что существенно осложняет процесс их вскрытия. Задokumentированы дебиты нефти до 1000 м<sup>3</sup>/сут., газа – до 1 млн м<sup>3</sup>/сут., слабых рассолов – до 30000 м<sup>3</sup>/сут., концентрированных рассолов-рапы – до 7,5 тыс. м<sup>3</sup>/сут. При поступлении рассола из пласта в ствол скважины полное замещение бурового раствора на рапу происходит в первые 30–40 минут; двухвалентные катионы (Ca, Mg) провоцируют коагуляцию бурового раствора; начинается процесс обвального выпадения солей. Заращение внутреннего сечения скважины может привести к полной потере подвижности бурового инструмента, а в дальнейшем – к потере скважины. Устьевые давления при закрытом противовыбросовом оборудовании (ПВО) достигают 16,5–18,5 Мпа. Ковыктинское газоконденсатное месторождение – один из ярких объектов такого типа. Большое количество скважин, вскрывших высоконапорные рапопроявляющие пласты (зоны), не добурено до целевых газоносных отложений терригенного венда вследствие недоучета горно-геологических условий. Основными причинами ликвидации скважин являются открытые высокодебитные фонтаны, прихваты бурового инструмента, смятие обсадных колонн в процессе испытания и т.д. Поэтому оценка горно-геологических условий бурения глубоких скважин является чрезвычайно важной задачей.

По данным бурения разведочных скважин установлено, что рапопроявляющие зоны локализованы в межсолевых карбонатных пластах-коллекторах, субгоризонтальные и характеризуются трещинным, трещинно-жильным и карстово-жильным типами аномально-гидропроводных коллекторов (АК).

Значения АВПД в флюидной системе карбонатов кембрия – до 2,35–2,65. Использование данных комплексных геофизических методов, а также опыта бурения предыдущих скважин позволяет во многих случаях значительно снизить риски возникновения аварийных ситуаций. Учет горно-геологических условий должен лежать в основе как проектных решений, так и рабочих регламентов по безаварийному ведению буровых работ.

*Ключевые слова:* бурение, газонефтеводопроявление, АК-АВПД, флюидная система, рапа-рассолы.

<sup>1</sup>Вахромеев Андрей Гелиевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры нефтегазового дела, e-mail: andrey\_igr@mail.ru

Vakhromeev Andrey, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Professor of the Department of Oil and Gas Business, e-mail: andrey\_igr@mail.ru

<sup>2</sup>Сверкунов Сергей Александрович, аспирант кафедры нефтегазового дела ИРНТУ, инженер лаборатории геологии нефти и газа ИЭК СО РАН, e-mail: dobro\_75@mail.ru

Sverkunov Sergey, Postgraduate of the Department of Oil and Gas Business of INRTU, Engineer of the Laboratory of Oil and Gas Geology of IEC SB RAS, e-mail: dobro\_75@mail.ru

<sup>3</sup>Ильин Антон Игоревич, аспирант кафедры нефтегазового дела, e-mail: iai@ierp.ru

Ilyin Anton, Postgraduate of the Department of Oil and Gas Business, e-mail: iai@ierp.ru

<sup>4</sup>Поспеев Александр Валентинович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории геологии нефти и газа, e-mail: avp@ierp.ru

Pospееv Alexander, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Professor, Leading Researcher of the Laboratory of Oil and Gas Geology of IEC SB RAS, e-mail: avp@ierp.ru

<sup>5</sup>Горлов Иван Владимирович, начальник отдела, e-mail: i.gorlov@ggr.gazprom.ru;

Gorlov Ivan, Head of Department, e-mail: i.gorlov@ggr.gazprom.ru

**Формат цитирования:** Вахромеев А.Г., Сверкунов С.А., Ильин А.И., Поспеев А.В., Горлов И.В. Горно-геологические условия бурения рапопроявляющих зон с аномально высоким пластовым давлением в природных резервуарах кембрия на Ковыктинском газоконденсатном месторождении // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 2 (55). С. 74–87. DOI 10.21285/0301-108X-2016-55-2-74-87.

## **MINING AND GEOLOGICAL CONDITIONS OF DRILLING BRINE PRODUCTIVE ZONES WITH ABNORMALLY HIGH RESERVOIR PRESSURE IN NATURAL CAMBRIAN RESERVOIRS OF THE KOVYKTA GAS CONDENSATE FIELD**

**A.G. Vakhromeev, S.A. Sverkunov, A.I. Ilyin, A.V. Pospeev, I.V. Gorlov**

Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia.

Institute of the Earth Crust SB RAS, 128 Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia.

“Gazpromgeologorazvedka” Ltd, 70 Gertsena St., Tyumen, 625000, Russia.

Drilling conditions of deep wells are estimated as “complicated” in the South of the Siberian platform due to the presence of reservoir layers which can be characterized by either absorption of drilling muds, or abnormally high reservoir pressures (AHRP) of fluids in the central part of the sedimentary cover section in Cambrian carbonate and halogen strata. When drilling the AHRP zone there is a high probability of emergency: from the damage of a drill string and drilling rig to the loss of a well.

High-pressure strata (zones) of the south of the Siberian platform contain extremely saturated brines with the concentration of salts over 600g/l and density up to 1,45 g/cm<sup>3</sup>, often accompanied with gas that significantly complicates their penetration. The following production rates are documented: oil up to 1000 m<sup>3</sup> per day, gas up to 1 million m<sup>3</sup> per day, weak brines up to 30,000 m<sup>3</sup> per day, concentrated brines up to 7,5 thousand m<sup>3</sup> per day. When a brine leaves the stratum and enters a borehole a drilling mud is completely replaced with a brine within the first 30–40 minutes; bivalent cations (Ca, Mg) provoke coagulation of the drilling mud; the process of avalanche salting-up begins. Encrustation of the well inner dimension can lead to the full loss of drill stem mobility, and to the loss of the well. Wellhead pressure at the closed blowout prevention equipment reaches 16,5–18,5 MPa. The Kovykta gas-condensate field is one of the bright objects of this kind. A large number of the wells, which have penetrated high-pressure brine productive layers (zones), are not drilled to the target gas-bearing deposits of terrigenous Vendian period as a result of underestimation of mining and geological conditions. Opened high-output fountains, drill tool stickings, collapse of casing strings under testing are the main reasons for well abandonment. Therefore, the assessment of mining and geological conditions of deep well drilling is an extremely important task.

The drilling data of prospecting wells allowed to find out that brine productive zones are localized in the intersalt carbonate reservoir layer. They are subhorizontal and feature fractured, fracture-vein and karst-vein types of the abnormally hydroconductive reservoir (AHR).

The AHRP values in the fluid system of Cambrian carbonates is up to 2,35–2,65. Application of the data of integrated geophysical methods, as well as the drilling experience of previous wells in many cases will considerably reduce the risks of emergencies. Consideration of mining and geological conditions should underlie both design concepts and operation procedure on failure-free drilling.

*Keywords: drilling, gas, oil, water ingress, abnormally hydroconductive reservoir-abnormally high reservoir pressure; fluid system; brines*

**For citation:** Vakhromeev A.G., Sverkunov S.A., Ilyin A.I., Pospeev A.V., Gorlov I.V. Mining and geological conditions of drilling brine productive zones with abnormally high reservoir pressure in natural Cambrian reservoirs of the Kovykta gas condensate field // Proceedings of Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits. 2016. No. 2 (55). Pp. 74–87. DOI 10.21285/0301-108X-2016-55-2-74-87.

### **Введение**

Вскрытие бурением высокодебитных зон с аномально гидропроводными карбонатными коллекторами в южных районах Сибирской платформы многие десятилетия остается серьезной технологической проблемой. Осложнения бурового цикла и даже аварийные ситуации, обусловленные вскрытием скважинами

аномальных коллекторов (АК) и аномальными пластовыми давлениями флюидов (АВПД), возникали на скважинах № 3, 18, 52, 72, 60, 61, 64 Ковыктинских, № 3, 5, 6 Южно-Ковыктинских, № 13 Омолойской, № 2, 3 Балаганкинских, № 131, 100 Верхоленинских, № 176 Рудовской, № 2 Карахунской, № 1 Тутурской, № 3, 3А Знаменских и др. [1–5].

Фонтан сероводородного рассола с дебитом  $700 \text{ м}^3/\text{сут.}$  получен с глубины 2086 м в скважине 131 Верхоленской в 1983 г., причем полностью вся колонна бурильных труб была выдавлена из скважины. Недалеко от пос. Жигалово из скважины 176 Рудовской из средней части усольской свиты получен аварийный фонтан рассола дебитом  $3000 \text{ м}^3/\text{сут.}$ , концентрация сероводорода в рапе составила 6–10 ПДК (1989 г.). Фонтан оперативно ликвидирован силами специализированной противofонтанной части Госгортехнадзора.

На скважине 13 Омолойской в процессе бурения усольской свиты кембрия зафиксирован аварийный выброс рапы из балыхтинского горизонта, дебит фонтанирования составил  $7600 \text{ м}^3/\text{сут.}$  (1969 г.). На двух глубоких скважинах (№ 2, 3) Балаганкинской площади получены фонтанные притоки сероводородных рассолов с дебитами 360 и  $1080 \text{ м}^3/\text{сут.}$ , замерено пластовое давление  $P_{пл}$  36 МПа (1984 г.). Авария на скважине № 3 была ликвидирована через месяц, а скважина № 2 фонтанировала более года. На Знаменской площади в скважине 3Р в средней части усольской свиты (глубина – 1818 м) был неожиданно вскрыт рапопроявляющий пласт с АВПД,  $P_{пл}$  составило около 43 Мпа (1986 г.). Дебит фонтанирования достигал  $7000 \text{ м}^3/\text{сут.}$ , затем после нескольких цементажей «в лоб» снизился до  $1500 \text{ м}^3/\text{сут.}$  Рапопроявление ликвидировано только через два месяца спуском обсадной колонны, однако смятие колонны на глубине около 1630 м осложнило испытание боханского

пласта песчаников (2930 м) с газовым насыщением.

Наибольшее количество осложнений и аварий подобного рода задокументировано на скважинах разведочного бурения Ковыктинского газоконденсатного месторождения (ГКМ) № 3, 18, 52, 60, 61, 64, 72, Чиканского ГКМ № 3, 5, 22 [1, 3, 4, 6]. На скважине 3 Ковыктинской с глубины 1308 м из ангарской свиты получен фонтанный приток рассола с удельным весом  $1,30 \text{ г/см}^3$ . В первом случае зафиксирован дебит до  $110 \text{ м}^3/\text{сут.}$ , коэффициент аномальности  $K_{ан}$  для бильчирского горизонта составил 1,89; на глубине 1308 м  $P_{пл}$  расчетное составило 25,2 Мпа. Рапопроявляющий интервал перекрыт обсадной колонной, неоднократно цементными заливками зона затампонирована. В процессе дальнейшего углубления скважины притоки рапы с АВПД были получены из балыхтинского и осинского горизонтов. В последующем зафиксировано смятие обсадной колонны. Ниже, в парфеновском горизонте, при опробовании в процессе бурения был получен промышленный приток природного газа. Скважина 3 так и осталась аварийной, неоднократные ремонты колонны положительного успеха не дали.

Самое интенсивное рапопроявление на Ковыктинском ГКМ с дебитом около  $5000 \text{ м}^3/\text{сут.}$  (рис. 1) началось на скважине 18 с глубины 2076 м (балыхтинский горизонт с  $P_{пл} = 46 \text{ Мпа}$ ), хотя начало проявления рапы отмечалось с христофоровского горизонта, интервал – 1960–1971 м (1994 г.).



Рис. 1. При аварийном фонтанировании скважины ПВО закрыто, рапа с дебитом  $5300 \text{ м}^3/\text{сут.}$  по выкидным линиям перепускается в аварийный амбар.  
Фото А.Г. Вахромеева, скважина 18 Ковыктинская, 1994 г.

Вскрытие высокодебитной зоны аномального коллектора жильного типа с АВПД, близким по значению к горному давлению, в процессе бурения разведочной скважины № 72 Ковыктинской в 2015 г. стало неожиданным для бурового предприятия. Благодаря высокому профессиональному уровню инженеров и буровой бригады скважина была поставлена под контроль. Однако продолжить бурение в условиях АВПД и аномального дебита рапы не представлялось возможным [6].

Все аномальные по дебиту и пластовому давлению скважины с притоками рапы разделяются на две группы по дебитам рапопроявлений, расчетным параметрам пласта, по характеру восстановления давления [3, 4]. В скважинах одной группы величина пластового давления превышает расчетную гидростатическую в 1,3–2,3 раза. Параметр водопроницаемость  $kt$  достигает 1–10 м<sup>2</sup>/сут. Восстановление давления флюида на устье скважины при закрытии задвижки противовыбросового оборудования (ПВО) происходит в первые минуты, реже – за 1–2 часа. Скачок мгновенной механической скорости бурения, проседание компоновки низа бурильной колонны (КНБК) до 1–2 метров свидетельствует о слабых физико-механических свойствах скелета карбонатных пород. Перекрытие проявляющего интервала обсадной колонной осложнено притоком рапы, поэтому качественно зацементировать заколонное пространство не удастся. В дальнейшем это не позволяет полноценно испытать целевые интервалы с УВ-насыщением.

#### **Прогнозирование горно-геологических условий с использованием геофизических методов**

С 1986 г. авторы работают над обоснованием прогнозно-поискового комплекса методов полевой геофизики, позволяющих картировать зоны повышенной водопроницаемости в галогенно-карбонатной толще нижнего кембрия. Такой прогноз является основой проектных решений [1, 3, 6–9].

В осадочном чехле юга Сибирской платформы выделяют под-, над-, и соленосный вещественный комплексы. В пределах Ковыктинского ГКМ и сопряженных территорий Байкало-Патомского надвигового пояса доказано двухъярусное строение разреза [3, 10–14]. Осадочные комплексы нижнего, подсоленосного яруса слагают незатронутый складчатостью автохтон [11, 14]. Соленосный и надсоленосный комплексы верхнего яруса слагают интенсивно дислоцированный аллохтон. Главный парагенезис структур представлен шарьяжами, взбросами, надвигами и линейными складками северо-восточного простирания – аллохтонными антиклиналями [8, 11–14 и др.].

Согласно проведенным исследованиям, переобработке и комплексной переинтерпретации сейсморазведочных, электроразведочных, гравимагнитных и геопромысловых данных рассолонасыщенные зоны АК-АВПД, вскрытые бурением на Ковыктинском ГКМ как целевые гидрогеологические объекты, располагаются в специфических геологических и тектонических условиях. Южной и восточной границами области проявлений АВПД являются Жигаловский и Хандинский валы, западная граница обусловлена затуханием складчатости, имеющей преимущественно меридиональное направление и выраженной в породах карбонатно-галогенного комплекса [3, 8]. На север и юго-запад область проявления АВПД, вероятно, простирается за пределы Ковыктинского месторождения. Локальные зоны АК-АВПД достаточно четко проявляются в геофизических полях. Им соответствуют [3, 8] аномалии проводимости ангарской свиты и бельско-булайского комплекса (соответственно  $S_{an} > 3$  См и  $S_{bb} > 3,5$  См), полимодальность распределения проводимости комплексов, повышенные значения коэффициента аномальности по данным анализа резонансного затухания сейсмических волн, локальные отрицательные аномалии поля силы тяжести интенсивностью до первых мГал.

### Геологическое строение зон АК-АВПД

В плане рассматриваемые АК-АВПД-зоны занимают значительные площади, некоторые из них вскрыты более чем одной глубокой скважиной (64-52-18-72 Ковыктинские, 3, 3А Знаменские) [3, 6].

Важной, определяющей особенностью геологического строения является структура переслаивания карбонатных и галитовых пород [2, 3, 15]. Способность солей «залечивать» трещины здесь играет роль гидродинамического «изолятора», локализуя (ограничивая) по вертикали развитие активной трещиноватости карбонатными прослоями. Этим обусловлен «псевдопластовый» характер распределения АК в геологическом теле – в соленосной толще осадочных пород нижнего кембрия. Формирование зон АК-АВПД в верхнем ярусе – аллохтоне обусловлено соляным тектогенезом во внутреннем поле Жигаловского и Хандинского валов, как реакция на шарьяжно-надвиговую тектонику [3, 8, 10–12, 16, 17 и др.]. Наблюдаются субпластовые и реже наклонные проницаемые трещинные коллекторы в карбонатных пластах галогенно-карбонатного комплекса кембрия. Геофильтрационная модель трактуется как пологопадающая рассолонасыщенная зона активной трещиноватости, переходящая по простиранию в зону межпластового срыва, и подтверждена результатами бурения двух стволов на скважине 52 Ковыктинской [8].

Гидродинамическая закрытость коллекторских зон в этом случае приводит к близости давления порового флюида к литостатическому, то есть к формированию АВПД. По Е.В. Пиннекеру [18] высокодебитные рапопроявляющие объекты в глубоких скважинах юга Сибирской платформы отнесены нами к трещинно-порово-пластовому и трещинно-жильно-пластовому типам сложной гидрогеологической структуры. АВПД – явление, фиксируемое практически в каждом случае вскрытия «предельно насыщенных» рассолов, характе-

ризует гидродинамические особенности флюидных систем, залежей рапы, распределенные в фильтрационной структуре резервуаров [3, 6, 8, 12, 19].

### Геологическое описание зон срывов

Модель межпластовых срывов в процессе надвигообразования объясняет, почему в некоторых скважинах (3 Знаменской, 18 Ковыктинской) при вскрытии толщи пород усольской свиты нижнего кембрия, представленной относительно ритмичным чередованием тонких карбонатных прослоев с более мощными пачками каменной соли, возникает скачок пластового давления, наблюдается аномально проводящий высокодебитный коллектор. Например, анализ акустической кривой по скважине 3 Знаменской показывает, что над осинским горизонтом разрез представлен чередованием тонких (около 3 м) пластов солей и доломитов. Традиционно выделяемые рассолоносные горизонты – балыхтинский в верхах и осинский в основании свиты – здесь равноудалены от интервала АК-АВПД [7].

Общепринято, что поровое давление никогда не может превысить горное [20, 21], то есть значения  $K_{ан}$  могут изменяться от 0 до  $P_{горн}/P_{гидрост.}$ . Верхним пределом АВПД считают давление, создаваемое на данный пласт весом вышележащих пород. Если горное давление рассчитать через среднюю плотность пород [15], то для юга Сибирской платформы и Ковыктинского ГКМ получим 2,35–2,7 г/см<sup>3</sup>. Это соответствует значениям коэффициента аномальности пластового давления для интервалов АК-АВПД в разрезе галогенно-карбонатной формации (табл. 1).

Разрушение тонких пластов карбонатных пород при надвигообразовании и передача горного давления вышележащих пород на коллектор и флюидную систему – такая модель рассмотрена в работах [3, 8, 18]. Относительно небольшая (первые метры) мощность высокодебитных пластов или зон трещинно-жильного типа, вскрываемых глубокой скважиной, может рассматриваться как

Таблица 1

## Оценка коэффициента аномальности пластового давления, КГКМ

Номер скважины	Горизонт	Глубина кровли рапопроявления $H$ , м	Плотность рапы, г/см <sup>3</sup>	Давление, атм	Коэффициент аномальности
3	Бильчирский	1330	1,28	249,75	1,88
18	Христофоровский	1961	1,41	460	2,35
	Балыхтинский	2000	1,42	470	2,35
52	Христофоровский	1876	1,41	396	2,11
	Балыхтинский	1929	1,42	404	2,09
60	Христофоровский	1961	1,42	370	1,89
61	Бильчирский-Атовский	1220	>1,7 ПЖ	>207	>1,7
64	Балыхтинский	2100	1,25 ПЖ	472,5	2,25

доказательство дизъюнктивного генезиса зон АК-АВПД. Мощные, кратно превышающие по толщине отложения солей, локализуют развитие активной трещиноватости в карбонатном коллекторе. То есть карбонатный пласт мы рассматриваем как фильтрационно-емкостную систему, в пустотном пространстве которой распределена флюидная, флюидодинамическая система с двумя параметрами аномальности – аномальное (пластовое) давление флюида  $P_{an}$  и аномальный дебит  $Q_{an}$  [3].

Применительно к задачам глубокого бурения на УВ подчеркнем, что весьма крепкие и предельно насыщенные рассолы (рапа) содержатся практически во всех коллекторах соленосной и подсолевой гидрогеологических формаций [2, 3, 5]. На Ковыктинском ГКМ и сопредельных площадях (Омолойская, Знаменская, Рудовская и др.) при закрытом ПВО давление на устье скважины составляет 16–19 МПа [3, 8].

**Гипотезы геологической обусловленности возникновения осложнений при бурении скважин в карбонатно-галогенной формации**

Существует две гипотезы, связанные с геологическим строением карбонатно-галогенной формации в части осложнений в процессе бурения и испытания скважин:

1. Процессы смятия колонн происходят вследствие пластического течения солей. Таким образом, наружное

избыточное давление на стенки обсадной колонны достигает по значениям горного.

2. Все процессы в системе «пласт – скважина» [19], в том числе и рапопроявления, высокие пластовые давления и смятия колонн, возникают вследствие наличия в разрезе галогенно-карбонатной толщи, в природных трещинных резервуарах нижнего кембрия зон АВПД флюидов с давлениями, близкими к горному (рис. 2).

Авторы придерживаются второго предположения. Дело в том, что аномальные по проницаемости пласты-коллекторы могут обладать весьма различными величинами проницаемости (от 1 до 300000 мД и более) [19]. Это прямо влияет в процессе вскрытия на первичные признаки определения такого пласта при бурении. Пласт с высокой проницаемостью сразу после вскрытия флюидной системы с АВПД при недостатке гидростатического давления в скважине начнет проявлять крепкий рассол в скважину, начнется ГНВП. При низкой проницаемости в цикле бурения данный пласт себя никак не проявит, но в процессе испытания (после снижения уровня в эксплуатационной колонне) аномально высокое пластовое давление, возможно, приведет к смятию колонны вне зависимости от параметров проницаемости рапопроявляющего пласта.

На рис. 3 представлено сравнение прочностных характеристик обсадных

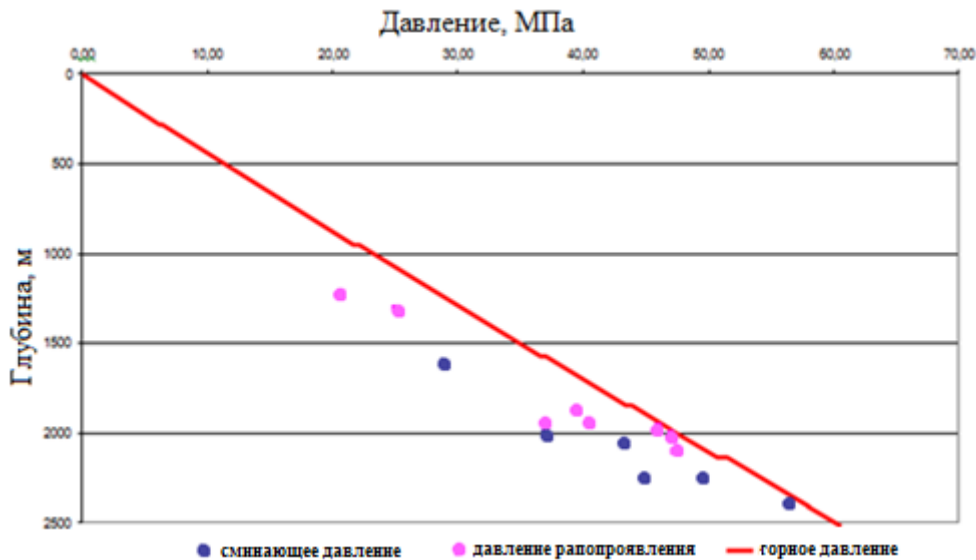


Рис. 2. Сопоставление давлений смятия колонн, рапопроявления и расчетного горного по плотности пород (Ковыктинское ГКМ)

колонн и наружного избыточного давления, рассчитанного по фактическим значениям на одной из пробуренных скважин, при испытании которой получили смятие колонны. Здесь наглядно видно, что смятие колонны произошло в интервале труб с минимальной прочностью при максимальных для данных труб нагрузках. Смятие колонны в данном интервале было вполне предсказуемо.

В целях уточнения геологического строения разреза любой проектной сква-

жины юга Сибирской платформы необходимо скоррелировать ее разрез с ранее пробуренными скважинами, а также сопоставить с прогнозными данными комплекса дистанционных геофизических методов по наличию проницаемых пластов. После выделения коллекторов в разрезе необходимо проанализировать барические условия в каждом из них – выполнить расчет коэффициент аномальности. Такой анализ позволит корректно обосновать и спроектировать

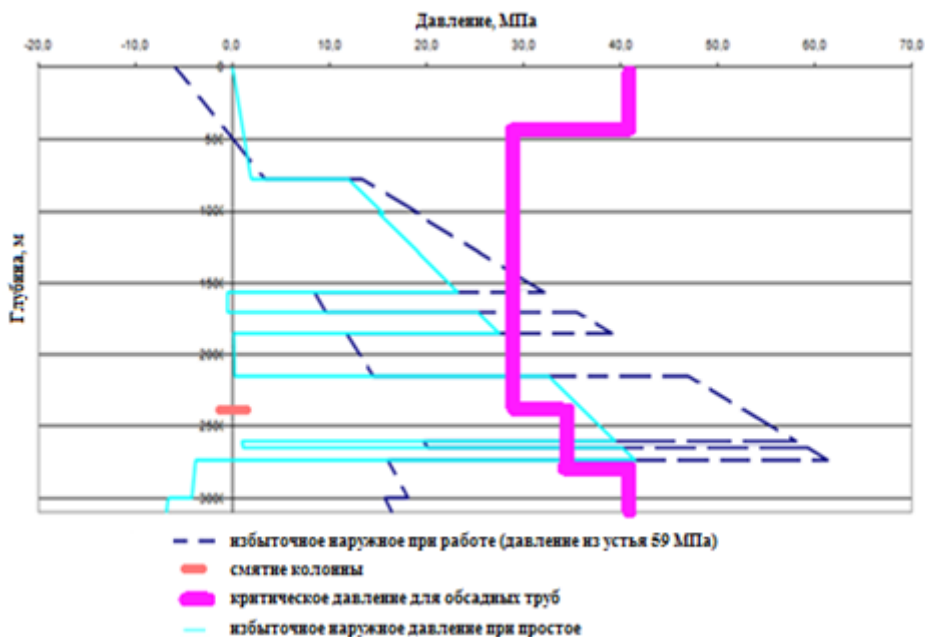


Рис. 3. Сравнение прочностных характеристик труб на смятие с наружным избыточным давлением (Ковыктинское ГКМ)

конструкцию скважины, а также плотность буровых растворов [1, 7, 9, 20, 22]. В данном случае наиболее сложными для бурения в разрезе являются зоны АК-АВПД [3, 6, 8].

Все зоны АВПД в связи с шарьяжно-надвиговой тектоникой приурочены к осложненному, верхнему структурному ярусу галогенно-карбонатной толщи нижнего кембрия, горизонтам соленосной формации, а наиболее мощные по дебиту и пластовому давлению – к дачменту в интервале низов бельской и кровельной части усольской свит (христофоровский, балыхтинский резервуары). Однако в скважинах они начинали проявляться значительно раньше и с углублением только усиливались. В скважинах 3, 18, 52 и 61 рапо- и газопрооявления начались в нижнеангарской подсите (в бильчирском горизонте), а в скважине 60 – в келорском горизонте литвинцевской свиты.

#### Прогноз зон осложнений при бурении

В общем случае конструкция скважин включала направление, кондуктор, одну или две промежуточных колонны, эксплуатационную колонну и на ряде скважин – хвостовик или открытый

ствол в интервале продуктивного пласта. В ходе проведения работ по бурению поисковых и разведочных скважин на одном из месторождений юга Сибирской платформы применяемая конструкция скважин неоднократно пересматривалась.

На рис. 4 построен график совмещенных давлений по исходным данным. Из него видно, что условия бурения являются крайне сложными и предъявляют дополнительные требования к проектированию конструкции скважины. График требует наличия двух технических колонн в скважине. При этом глубина спуска кондуктора должна быть не менее 1000 м (по расчетам) для недопущения межпластовых перетоков в процессе ГНВП из нижележащих АВПД-горизонтов. Давление гидроразрыва также ограничивает максимальную плотность бурового раствора, которая в свою очередь не может быть меньше коэффициента аномальности. В таких практически равновесных условиях требуется пересмотр технологии вскрытия высоконапорных рапопроявляющих зон и уход от технологии бурения «на репрессии», что является также отдельной темой для исследования.

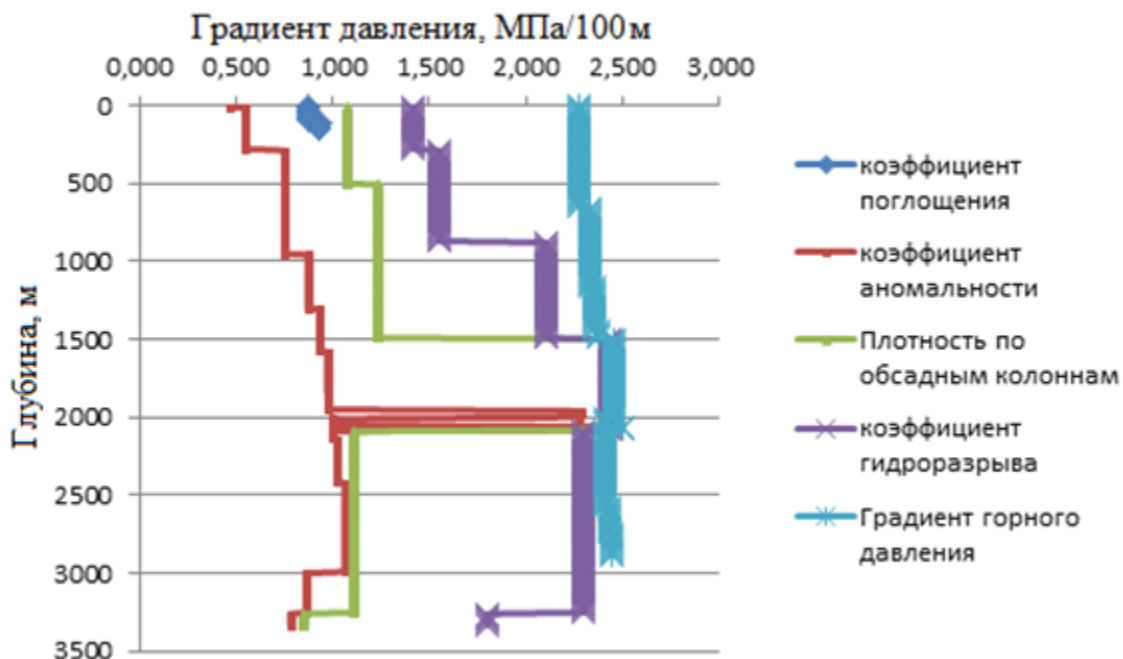


Рис. 4. График совмещенных давлений проектной скважины, КГКМ



Для удобства восприятия построен график совмещенных давлений, привязанный к стратиграфическому разрезу (рис. 5). Это позволит проанализировать возможные зоны осложнений при бурении скважин на заданном участке [9, 23], перевести данные в табличную форму (табл. 2) и интерпретировать полученные результаты.

### Заключение

1. Рапопроявляющие зоны с АВПД на Ковыктинском ГКМ и в сопредельных структурных зонах встречены скважинами в разрезе галогенно-карбонатной гидрогеологической формации нижнего кембрия от ангарской свиты (бильчирский горизонт) до подошвы усольской (осинский горизонт). По данным бурения разведочных скважин установлено, что рапопроявляющие зоны локализованы в межсолевых карбонатных пластах-коллекторах, субгоризонтальны и характеризуются трещинным, трещинно-жильным и карстово-жильным типами коллекторов [3].

2. Высоконапорные залежи в карбонатных трещинных пластах (зонах)

мега-резервуаров венда-кембрия юга Сибирской платформы содержат предельно насыщенные рассолы – рапу с концентрацией солей более 600 г/л и плотностью до 1,45 г/см<sup>3</sup>, нередко с газом, что существенно осложняет процесс их вскрытия бурением. Задokumentированы дебиты нефти до 1000 м<sup>3</sup>/сут., газа – до 1 млн м<sup>3</sup>/сут., слабых рассолов – до 30000 м<sup>3</sup>/сут., концентрированных рассолов – рапы – до 7,5 тыс. м<sup>3</sup>/сут., которые связаны с трещинно-жильным типом коллектора. Значения  $K_{ан}$  в флюидной зоне карбонатов кембрия – до 2,35–2,65. Использование данных комплексных геофизических методов, а также опыта бурения предыдущих скважин позволяет во многих случаях значительно снизить риски возникновения аварийных ситуаций.

3. Расчетные градиенты наружного давления в интервалах солей верхнебелой подсвиты и усольской свиты находятся в пределах 0,0188–0,0238 МПа/м. Эти значения близки к фактически замеренным градиентам пластовых давлений при проявлениях рапы из

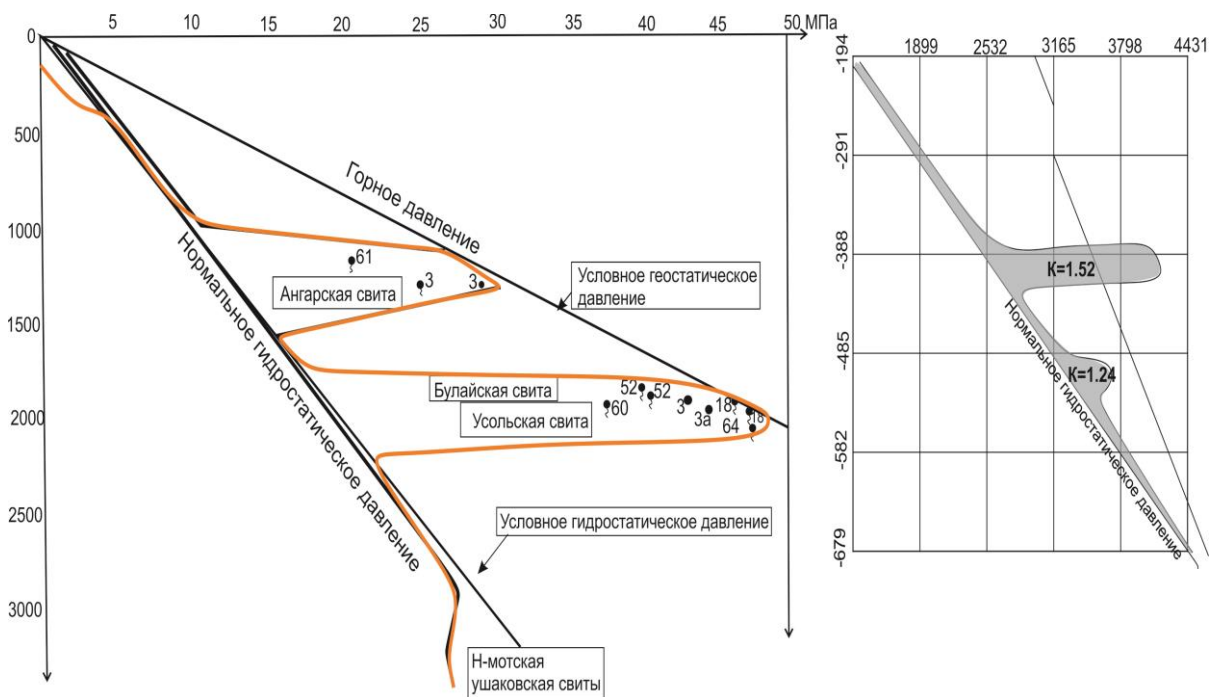


Рис. 5. Общий график совмещенных давлений: а – по данным бурения; б – по данным интерпретации сейсморазведки МОГТ по методике CSD (Ковыктинское ГКМ, галогенно-карбонатная толща нижнего кембрия. По [3] с дополнениями)

### Оценка осложнений по разрезу скважины на основе графика совмещенных давлений

Таблица 2

Номер	Интервалы глубин	Возраст	Осложнения		Причины, вызывающие осложнения
			вид осложнения	интервал	
1	0–50	Четвертичные отложения + усть-кутская свита	Обвалы стенок скважины	0–10	Неустойчивость стенок скважины
			Поглощения ПЖ	0–50	Повышенная проницаемость пород в гипергенной зоне
2	50–750	Илгинская + верхоленская свиты	Поглощение ПЖ	50–140	Трещиноватость, повышенная проницаемость пород в гипергенной зоне
				275–350	
				630–700	
3	750–920	Литвинцевская свита	Поглощение ПЖ	890–920	Трещиноватость, кавернозность
			Кавернообразование	750–840	
4	920–1380	Ангарская свита	Поглощение ПЖ	1180–1280	Аномально высокое пластовое давление флюидов ( $P_{пл} = 25,0$ МПа, $K_{ан} = 1,88–2,3$ ). Трещиноватость, кавернозность
			Кавернообразование	920–1160	
				1225–1260	
5	1515–1953	Бельская свита	Кавернообразование	1515–1670	Выщелачивание каменных солей
			Водо- и газпроявления (христофоровский горизонт)	1893–1953	Аномально высокое пластовое давление флюидов ( $P_{пл} = 42,3$ МПа, $K_{ан} = 2,3$ )
6	1953–2593	Усольская свита	Кавернообразование	1955–2550	Выщелачивание каменных солей
			Проявления воды, углеводородного и сероводородного газов (осинский горизонт)	2397–2449	Аномально высокое пластовое давление флюидов ( $P_{пл} = 42,0–46,0$ МПа, $K_{ан} = 1,4–2,5$ )
7	2593–3085	Мотская свита	Поглощение ПЖ	2890–2940	Пониженное пластовое давление флюидов (парфеновский горизонт)
				3035–3085	
8	3085–3210	Ушаковская свита	Поглощение ПЖ	3085–3200	Пониженное пластовое давление флюидов (боханский горизонт)
			Умеренные обвалы стенок скважины		Неустойчивость стенок скважины

христофоровского и балыхтинского горизонтов в скважинах 18, 52, 60, 64 и 72, которые составляли 0,0189–0,0235 МПа/м. Смятие колонн всегда отмечается в интервалах солей, а именно межсолевых высокопроницаемых карбонатных пластов. Именно зоны АВПД являются основной причиной осложнений и аварий при бурении и испытании (ГНВП, смятие колонн и т.д.).

4. При расчете обсадных колонн в интервалах залегания солей следует использовать рекомендации «Инструкции по расчету обсадных колонн», М., 2003, и вести расчет с учетом величины горизонтальной составляющей горного давления. Значение градиента горного

давления следует принять по плотности перекрывающих пород. Проводить испытания скважин при значениях депрессий, не приводящих к смятию обсадной колонны.

5. Первичное вскрытие и бурение по зонам трещиноватых карбонатов, вмещающим залежи рапы с АВПД, требуют разработки детального алгоритма практических действий для снижения риска осложнения циклов бурения и крепления, снижения аварийности. Учет горно-геологических условий, построенный на опыте ранее пробуренных скважин, должен лежать в основе как проектных решений, так и рабочих регламентов по безаварийному ведению работ.

## Библиографический список

1. Абалаков А.Д., Зиганшин Э.С., Медведев Ю.О. [и др.]. Экологические аспекты освоения Ковыктинского газо-конденсатного месторождения. Иркутск: изд-во Ин-та географии РАН, 2001. 194 с.
2. Анциферов А.С. Гидрогеология древнейших нефтегазоносных толщ Сибирской платформы. М.: Недра, 1989. 176 с.
3. Вахромеев А.Г. Закономерности формирования и локализации месторождений промышленных рассолов в карбонатных каверново-трещинных резервуарах кембрия юга Сибирской платформы. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. 248 с.
4. Вахромеев И.С. Об условиях локализации и генетических типах рудных месторождений в надвиговых зонах // Проблемы шарьяжно-надвиговой теории формирования земной коры континентов. Уфа: Изд-во БНЦ УрО АН СССР, 1991. С. 35–41.
5. Дзюба А.А. Разгрузка рассолов Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 1984. 182 с.
6. Смирнов А.С., Горлов И.В., Яицкий Н.Н., Горский О.М., Игнатьев С.Ф., Поспеев А.В., Вахромеев А.Г., Агафонов Ю.А., Буддо И.В. Интерпретация геолого-геофизических данных – путь к созданию достоверной модели Ковыктинского газо-конденсатного месторождения // Геология нефти и газа. 2016. № 2. С. 56–66.
7. Вахромеев А.Г., Хохлов Г.А. Перспективы прогноза зон рапопроявлений в Верхоленском (Жигаловском) газоносном районе Иркутской области // Особенности технологии проводки и закачивания скважин в Восточной Сибири и Якутии: сборник. Новосибирск, Иркутск: Изд-во ВСНИИГГиМС, 1988. С. 140–142.
8. Вахромеев А.Г., Мышевский Н.В., Хохлов Г.А. Аномально высокие пластовые давления как фактор, осложняющий освоение углеводородных месторождений Восточной Сибири // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии: фундаментальный и прикладной аспекты: материалы Всерос. совещания. Иркутск, 2006. Вып. 5. С. 98–119.
9. Сираев Р.У., Сверкунов С.А., Данилова Е.М. [и др.]. Анализ горно-геологических условий бурения геологоразведочных скважин на нефть и газ на Даниловской площади, Непский свод // Вестник ИрГТУ. 2013. № 12 (83). С. 131–135.
10. Камалетдинов М.А., Сизых В.И., Казанцева Т.Т. [и др.]. Надвиговая тектоника Восточно-Европейской и Сибирской платформ (сравнительная характеристика и значение для нефтегазоносности) // Известия АН РБ. Геология. 2000. № 5. С. 46–60.
11. Ларионова Т.И. Признаки перспективности участков скопления углеводородов в аллохтоне складчато-надвиговых территорий // Геология, тектоника, металлогения Северо-Азиатского кратона: материалы Всерос. науч. конф. Якутск, 2011. Т. 1. С. 59–62.
12. Мигурский А.В., Старосельцев В.С. Зоны разломов – естественные насосы природных флюидов // Отечественная геология. 2000. № 1. С. 56–59.
13. Сизых В.И. Шарьяжно-надвиговая тектоника окраин древних платформ. Новосибирск: Изд-во СО РАН. Филиал «Гео», 2001. 154 с.
14. Сметанин А.В. Опыт динамической интерпретации гравитационных аномалий. Иркутск, 2000. 85 с.
15. Дубровин М.А. Соляная тектоника Верхне-Ленской впадины Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 1979. 95 с.
16. Камалетдинов М.А., Казанцева Т.Т., Казанцев Ю.В., Постников Д.В. Шарьяжно-надвиговая тектоника литосферы. М.: Наука, 1991. 256 с.
17. Кучерук Е.В., Люстих Т.Е. Прогнозирование и оценка аномальных пластовых давлений по материалам геофизических исследований // ВИНТИ. Геологические и геохимические методы поисков полезных ископаемых. Итоги науки и

техники: Методы разведки и оценка месторождений. Разведочная и промысловая геофизика. Т. 7. М., 1986. 129 с.

18. Пиннекер Е.В. Проблемы региональной гидрогеологии. М.: Наука, 1977. 196 с.

19. Сверкунов С.А., Вахромеев А.Г., Сираев Р.У. Данилова Е.М. Повышение эффективности бурения горизонтальных скважин в сложных горно-геологических условиях. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. 204 с.

20. Mouchet J. P. & Mitchell A. Abnormal pressures while drilling-manuels techniques elf aquitaine. Boussens: Elf Aquitaine Edition, 1989. 264 p.

21. Hubbert M.K., Rubey W.W. Role of Fluid Pressure in Mechanics of Overthrust Faulting. I Mechanics of Fluid-Filled Porous Solids and its Application thrust faulting // Geol. Soc. Amer. Bull. 1959. № 2 (70). P. 75–78.

22. Ишбаев Г.Г. [и др.]. Технологии разработки утяжеленного соленасыщенного термостойкого бурового раствора ООО «НПП “Буринтех”» // Бурение и нефть. 2013. № 9. С. 47–48.

23. Басарыгин Ю.М., Булатов А.И., Проселков Ю.М. Осложнения и аварии при бурении нефтяных и газовых скважин: учебник для вузов. М.: Недра, 2000. 680 с.

### References

1. Abalakov A.D., Ziganshin E.S., Medvedev Yu.O. *Ekologicheskie aspekty osvoeniya Kovyktinskogo gazokondensatnogo mestorozhdeniya* [Environmental aspects of the Kovykta gas condensate field development]. Irkutsk, In-t geografii RAN Publ., 2001. 194 p.

2. Antsiferov A.S. *Gidrogeologiya drevneishikh neftegazonosnykh tolshch Sibirskoi platform* [Hydrogeology of the ancient oil and gas strata of the Siberian Platform]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 176 p.

3. Vakhromeev A.G. *Zakonomernosti formirovaniya i lokalizatsii mestorozhdenii promyshlennykh rassolov v karbonatnykh kavernovo-treshchinnykh rezervuarakh kembriya yuga Sibirskoi platform* [Regularities of industrial brine deposits formation and localization in Cambrian carbonate vuggy fractured reservoirs of the south of the Siberian platform]. Irkutsk, IRNITU Publ., 2015. 248 p.

4. Vakhromeev I.S. Ob usloviyakh lokalizatsii i geneticheskikh tipakh rudnykh mestorozhdenii v nadvigovykh zonakh [On localization conditions and genetic types of ore deposits in the overthrust areas]. *Problemy shar'yazhno-nadvigovoi teorii formirovaniya zemnoi kory kontinentov* [Problems of the overthrust-faulting theory of the continental earth's crust formation]. Ufa, BNTs UrO AN SSSR Publ., 1991, pp. 35–41.

5. Dzyuba A.A. *Razgruzka rassolov Sibirskoi platform* [Preconditioning of the Siberian Platform brines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984. 182 p.

6. Smirnov A.S., Gorlov I.V., Yaitskii N.N., Gorskii O.M., Ignat'ev S.F., Pospeev A.V., Vakhromeev A.G., Agafonov Yu.A., Buddo I.V. Interpretatsiya geologo-geofizicheskikh dannykh – put' k sozdaniyu dostovernoi modeli Kovyktinskogo gazokondensatnogo mestorozhdeniya [Interpretation of geological and geophysical data as a way to create a reliable model of the Kovykta gas condensate field]. *Geologiya nefti i gaza = Oil and Gas Geology*, 2016, no. 2, pp. 56–66.

7. Vakhromeev A.G., Khokhlov G.A. Perspektivy prognoza zon rapoproyavlenii v Verkholskom (Zhigalovskom) gazonosnom raione Irkutskoi oblasti [Prospects of gas ingress zone prediction in the Upper Lena (Zhigalovo) gas area of the Irkutsk region]. *Osobennosti tekhnologii provodki i zakachivaniya skvazhin v Vostochnoi Sibiri i Yakutii: sbornik* [Features of well drilling and pumping technology in Eastern Siberia and Yakutia: Collection of articles]. Novosibirsk, Irkutsk, VSNIIGGiMS Publ., 1988, pp. 140–142.

8. Vakhromeev A.G., Myshevskii N.V., Khokhlov G.A. Anomal'no vysokie plastovye davleniya kak faktor,

oslozhnyayushchii osvoenie uglevodorodnykh mestorozhdenii Vo-stochnoi Sibiri [Abnormally high reservoir pressures as a factor complicating hydrocarbon fields development in Eastern Siberia]. *Sovremennaya geodinamika i opasnye prirodnye protsessy v Tsentral'noi Azii: fundamental'nyi i prikladnoi aspekty: materialy Vseros. soveshchaniya* [Modern geodynamics and hazardous natural processes in Central Asia: fundamental and applied aspects: Proceedings of the All-Russian Meeting]. Irkutsk, 2006. Vol. 5, pp. 98–119.

9. Siraev R.U., Sverkunov S.A., Danilova E.M. Analiz gorno-geologicheskikh uslovii bureniya geologorazvedochnykh skvazhin na neft' i gaz na Danilovskoi ploshchadi, Nepskaa svod [Analysis of mining and geological conditions for drilling exploration wells for oil and gas in the Danilovsky area, Nepa vault]. *Vestnik IrGTU = Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2013, no. 12 (83), pp. 131–135.

10. Kamaletdinov M.A., Sizykh V.I., Kazantseva T.T. Nadvigovaya tektonika Vostochno-Evropeskoi i Sibirskoi platform (sravnitel'naya kharakteristika i znachenie dlya neftegazonosnosti) [Thrust tectonics of East European and Siberian platforms (comparative analysis and significance for oil and gas potential)]. *Izvestiya AN RB. Geologiya = Proceedings of the Academy of Sciences of the Bashkortostan Republic. Geology*, 2000, no. 5, pp. 46–60.

11. Larionova T.I. Priznaki perspektivnosti uchastkov skopleniya uglevodorodov v allokhthone skladchato-nadvigovykh territorii [Exploitability features of the hydrocarbon accumulation areas in the fold-thrust area allochthon]. *Geologiya, tektonika, metallogeniya Severo-Aziatskogo kratona: materialy Vseros. nauch. konf.* [Geology, tectonics, metallogeny of the North-Asian craton: Materials of the All-Russian Scientific Conference]. Yakutsk, 2011, Vol. 1, pp. 59–62.

12. Migurskii A.V., Starosel'tsev V.S. Zony razlomov – estestvennye nasosy prirodnykh flyuidov [Fault zones as intrinsic pumps of natural fluids]. *Otechestvennaya*

*geologiya = National Geology*, 2000, no. 1, pp. 56–59.

13. Sizykh V.I. *Shar'yazhno-nadvigovaya tektonika okrain drevnikh platform* [Overthrust-folding tectonics of ancient platform outskirts]. Novosibirsk, SO RAN. Filial «Geo» Publ., 2001. 154 p.

14. Smetanin A.V. *Opyt dinamicheskoi interpretatsii gravitatsionnykh anomalii* [Experience of gravity anomaly dynamic interpretation]. Irkutsk, 2000. 85 p.

15. Dubrovin M.A. *Solyanaya tektonika Verkhne-Lenskoi vpadiny Sibirskoi platform* [Saline tectonics of the Upper Lena Depression of the Siberian platform]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979. 95 p.

16. Kamaletdinov M.A., Kazantseva T.T., Kazantsev Yu.V., Postnikov D.V. *Shar'yazhno-nadvigovaya tektonika litosfery* [Lithospheric overthrust-folding tectonics]. Moscow, Nauka Publ., 1991. 256 p.

17. Kucheruk E.V., Lyustikh T.E. Prognozirovaniye i otsenka anomal'nykh plastovykh davlenii po materialam geofizicheskikh issledovaniy [Prediction and evaluation of abnormal formation pressures based on geophysical study data]. *VINITI. Geologicheskie i geokhimicheskie metody poiskov poleznykh iskopaemykh. Itogi nauki i tekhniki: Metody razvedki i otsenka mestorozhdenii. Razvedochnaya i promyslovaya geofizika* [Russian Institute for Scientific and Technical Information (VINITI RAS). Geological and geochemical methods of mineral prospecting. The results of science and technology: prospecting methods and deposit evaluation. Exploration and production geophysics]. Vol. 7. Moscow, 1986. 129 p.

18. Pinneker E.V. *Problemy regional'noi gidrogeologii* [Problems of regional hydrogeology]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 196 p.

19. Sverkunov S.A., Vakhromeev A.G., Siraev R.U., Danilova E.M. *Povyshenie effektivnosti bureniya gorizontallykh skvazhin v slozhnykh gorno-geologicheskikh usloviyakh* [Improving drilling efficiency of horizontal wells in complex mining and geological conditions]. Irkutsk, IRNITU Publ., 2016. 204 p.

20. Mouchet J. P. & Mitchell A. *Abnormal pressures while drilling-manuels techniques elf aquitaine*. Boussens, Elf Aquitaine Edition, 1989. 264 p.

21. Hubbert M.K., Rubey W.W. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting. Mechanics of fluid-filled porous solids and its application in thrust faulting. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1959, no. 2 (70), pp. 75–78.

22. Ishbaev G.G. *Tekhnologii razrabotki utyazhennogo solenasyshchen-*

*nogo termo-stoikogo burovogo rastvora* ООО «NPP “Burintekh”» [Development technologies of weighted salt-saturated heat-resistant mud of “NPP “Burintekh”” LLC]. *Burenie i neft' = Drilling and Oil*, 2013, no. 9, pp. 47–48.

23. Basarygin Yu.M., Bulatov A.I., Proselkov Yu.M. *Oslozhneniya i avarii pri burenii neftyanykh i gazovykh skvazhin* [Complications and failures in drilling oil and gas wells]. Moscow, Nedra Publ., 2000. 680 p.

*Статья поступила 24.04.2016 г.*

*Article received 24.04.2016.*