

УДК 551.2; 539.3

**ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ
СОЗДАНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛИГОНОВ НА КАЛЬЧИНСКОМ,
УСТЬ-ТЕГУССКОМ, ТЯМКИНСКОМ, ЮЖНО-ПЕТЬЕГСКОМ,
РАДОНЕЖСКОМ, ПРОТОЗАНОВСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ**
MINING AND GEOLOGICAL SUBSTANTIATION FOR ENABLE THE CREATION
OF GEODYNAMIC POLYGONS IN KALCHINSKOYE,
UST-TEGUSSKOYE, TYAMKINSKOYE, UJNO-PETEGSKOYE,
RADONEZHSCKOYE, PROTOZANOVSKOYE FIELDS

Ю. В. Васильев

Yu.V. Vasiliev

*Западно-Сибирский филиал института нефтегазовой геологии и геофизики Сибирского
отделения Российской академии наук, г. Тюмень*

*Ключевые слова: геодинамический полигон; мульда оседания земной поверхности;
современные деформационные процессы; геолого-тектоническая модель;
динамически напряженные зоны*

*Key words: hydrodynamic polygon; subsidence trough; actual deformation process;
geological and tectonic model; zone of high dynamic stress*

С 1992 года по настоящее время предприятие ООО «РН-Уватнефтегаз» осуществляет работу по разведке, опытно-промышленной эксплуатации и добыче углеводородного сырья на 15 лицензионных участках, 36 месторождениях, из которых только 15 месторождений введены в эксплуатацию. В соответствии с планом развития предприятия ООО «РН-Уватнефтегаз» до 2020 года планируется ввести в разработку еще 12 месторождений.

Район деятельности ООО «РН-Уватнефтегаз» общей площадью 23 000 км² находится в бассейне нижнего течения р. Иртыш и его правого притока — р. Демьянки. В соответствии с морфоструктурным районированием Тюменской области рассматриваемая территория приурочена к границе Кондинской низменности и возвышенности Тобольский материк и представляет плоско-волнистую озерно-аллювиальную равнину. Рельеф территории характеризуется слабым эрозионным расчленением. Глубина расчленения, то есть превышение водоразделов над урезами рек, составляет преимущественно 10–25 м. Абсолютные отметки поверхности земли изменяются от 35 до 100 м, увеличиваясь к северо-востоку.

Нефтегазоносность геологического разреза установлена в стратиграфическом диапазоне следующими нефтегазоносными комплексами (от 2 000 до 2 920 м): палеозойский + КВ, нижнеюрский, среднеюрский, верхнеюрский, ачимовский (клиноформная часть неокома) и неокомский. Из анализа условий нефтегазоносности следует вывод о том, что наиболее крупными месторождениями на рассматриваемой территории являются Усть-Тегусское, Кальчинское, Радонежское, Тямкинское и Южно-Петьегское, на которых созданы геодинамические полигоны.

Научно-практический опыт эксплуатации нефтегазовых месторождений свидетельствует о том, что их интенсивная и долговременная разработка формирует мощное техногенное воздействие на геологическую среду, которое приводит к нарушению напряженно-деформированного состояния массива недр. Это нередко сопровождается авариями скважин, межпластовыми перетоками, загрязнением водоносных горизонтов, что может привести к оседанию земной поверхности в районе месторождений.

Перечисленные последствия сопровождаются значительным экономическим ущербом, что является существенным фактором эколого-промышленной опасности объектов нефтегазового комплекса, поэтому решение этой проблемы нашло отражение в нормативном документе Ростехнадзора [1]. В этом же документе указано, что стадии проектирования геодинамических полигонов предшествует стадия горно-геологического обоснования (ГГО), в рамках которой рассматриваются вопросы обоснования целесообразности создания геодинамических полигонов на конкретных месторождениях, определяется оптимальный регламент наблюдений и структура измерительной сети геодинамического полигона.

В соответствии с требованиями действующих нормативных документов Ростехнадзора [1, 2], а также условий лицензионных соглашений на предприятии ООО «РН-Уватнефтегаз» последовательно реализуются мероприятия по обеспечению контроля за сдвижением горных пород при отработке углеводородной залежи на следующих геодинамических полигонах: Кальчинский, Усть-Тегусский, Тямкинский, Ю-Петьегский, Радонежское и Протозановское месторождения.

1. Кальчинский геодинамический полигон. Проект разработан в 2006 г. Проведено 3 цикла наблюдений 2007–2010 гг. Выполнена корректировка проекта в 2011 г. В 2015 выполнен 7-й цикл наблюдений.

2. Усть-Тегусский геополigon. Проект подготовлен в 2010 г. В 2015 г. выполнен 4-й цикл наблюдений.

3. Тямкинский геодинамический полигон. Проект создан в 2011 г. Выполнена закладка наблюдательных станций и 2-й цикл наблюдений в 2015 г.

4. Ю-Петьегский геодинамический полигон. Проект разработан в 2012 году. В 2014 году выполнен 1-й цикл наблюдений, в 2015 году — второй.

5. Радонежское месторождение. Выполнен проект в 2013 г., закладка полигона — в 2015 г.

6. Протозановское месторождение. Подготовлен проект геодинамического полигона в 2012 г. Закладка наблюдательной сети планируется в 2016 г.

В этой связи, основной целью работы являлось обеспечение промышленной безопасности объектов нефтегазодобычи посредством создания долговременной системы маркшейдерско-геодезических наблюдений, проведения многократных повторных наблюдений деформационных процессов техногенного и природного происхождения при разработке всей Уватской группы месторождений по принципиальной схеме геодинамического мониторинга (рис. 1).

Задачей работы является анализ и интерпретация полученных результатов геодинамического мониторинга на существующих 6 геодинамических полигонах (нивелирование II класса, спутниковые наблюдения, высокоточная гравиметрия), эксплуатационных параметров разработки месторождений (техногенной нагрузки) и специфики природных геолого-тектонических условий для создания оптимальной системы геодинамического мониторинга.

Рассмотрим и проанализируем методы и результаты полученных расчетов по прогнозным оценкам каждого из вышеперечисленных месторождений для сопоставления с полученными результатами инструментальных геодезических измерений.



Рис. 1. Структура системы комплексной оценки геодинамического риска

Кальчинское месторождение. Прогнозные оценки оседания земной поверхности были выполнены в работах 2006 и 2007 гг. ЗАО НПП «Центр прикладной геодинамики» при разработке научно-технической программы геодинамической безопасности в зоне деятельности ОАО «Тюменнефтегаз» на территории Кальчинского месторождения. Авторами этой работы проведено математическое моделирование, основанное на изучении напряженно-деформированного состояния (НДС) флюидонасыщенных массивов пористых пород с помощью модели М. Био.

Расчетная схема математической модели основана на использовании сеточной модели, узлы которой по вертикали расположены с шагом 40 м, а по горизонтали — с шагом 200 м. Шаги по вертикали выбраны с таким расчетом, чтобы в каждом

выделенном слое число узлов было не менее пяти. Нижняя граница модели отнесена на расстояние, не влияющее на решение задачи. Общее число узлов в сеточной модели составило 8 241.

В результате выполненных оценочных расчетов было получено, что оседание поверхности земли на Кальчинском месторождении будет происходить с величиной 14 мм/год: через 5 лет эксплуатации месторождения величина оседания составит около 70 мм, через 10 лет — 140 мм. При этом падение пластового давления через 10 лет достигнет почти 6 МПа.

Усть-Тегусское месторождение. В ходе выполнения работы «Прогноз деформированного состояния земной поверхности и разработка Проекта и Программы мониторинга деформационных процессов при отработке Уренского и Усть-Тегусского месторождений нефти ООО «ТНК-Уват» Пермским ГТУ в 2008 году выполнен комплекс работ по прогнозу параметров процесса сдвижения горных пород и земной поверхности.

Для анализа деформационных процессов коллекторов при падении пластового давления была использована модифицированная шатровая модель пористой среды и ее численная реализация методом конечных элементов в программе «ANSYS» [3]. Выполнены расчеты типовых схем, исследовано влияние физико-механических свойств вмещающих пород, коллекторов и других факторов на изменение напряженно-деформированного состояния горного массива и земной поверхности.

Результаты математического моделирования процессов деформирования горного массива показывают возможность возникновения оседаний земной поверхности величиной до 100 мм при разработке Усть-Тегусского месторождения при падении пластового давления на 10 МПа.

Радонежское, Тямкинское, Протозановское месторождения. В 2010 году ЗАО НПЦ «ПромНедраЭксперт» была проведена оценка оседания земной поверхности при отработке Радонежского, Тямкинское, Протозановского месторождений.

Расчеты выполнялись по критерию «деформационной толщины», на основании которого был сделан вывод о потенциальной подверженности каждого из вышеперечисленных месторождений аномальным обширным просадкам земной поверхности.

В основе расчетов было принято, что главенствующим фактором, определяющим уровень формирования обширных просадок земной поверхности территории всего месторождения, является величина деформации порового объема пласта-коллектора. Расчетная формула имеет вид

$$e = \frac{\Delta V_{пор}}{V} = m \beta_{пор} \Delta P, \quad (1)$$

где e — величина деформации порового объема пласта-коллектора, $\Delta V_{пор}$ — изменение объема пор в процессе разработки, V — объем пород коллекторов, m — пористость, $\beta_{пор}$ — коэффициент сжимаемости порового пространства, ΔP — изменение пластового давления в процессе разработки.

Для оценки максимальной, предельно возможной величины вертикальных смещений земной поверхности принято условие, что все изменение порового объема происходит за счет деформации породы в вертикальном направлении. В этом случае будет справедлива следующая формула:

$$\Delta h = m H \beta_{пор} \Delta P, \quad (2)$$

где H — эффективная толщина нефтенасыщенности.

Как видно из этой формулы, сомножитель $\beta_{пор}$ относится к генетическому типу пласта-коллектора (песчаник, известняк и т. д.). Сомножитель ΔP напрямую характеризует параметры разработки. В таком случае, только сомножители m и H характеризуют «геометрию» пласта-коллектора и, поэтому, являются наиболее обобщенными характеристиками для оценки всех месторождений на предмет формирования максимально возможных обширных просадок земной поверхности.

Таким образом, общая оценка возможных деформаций земной поверхности с учетом коэффициента, учитывающего весомость вышележащей толщи, показала, что максимальная амплитуда возможных вертикальных смещений за весь период разработки может составить для Радонежского, Тямкинского, Протозановского месторождений 0,54; 0,29; 0,34 м соответственно.

Южно-Петъегское месторождение. Проект геодинамического полигона разработан предприятием ООО «Горные технологии» в 2012 году. В основе расчетной геодинамической модели лежит усовершенствованный инженерный метод прогноза оседаний земной поверхности при разработке нефтяных и газовых месторождений, предложенный Пермским ГТУ. Метод многократно успешно опробован, и имеет высокую степень сходимости как с фактическими оседаниями, впоследствии измеренными непосредственно на месторождении, так и с прогнозными оседаниями, полученными посредством модифицированной шатровой модели (Modified Cam Clay Model), которая применима для описания различных вариантов поведения грунтов и горных пород в условиях месторождений Западной Сибири.

Учитывая возможный диапазон изменений коэффициента сжимаемости нефти при изменении пластового давления от начального до давления насыщения, получена конечная формула расчета оседаний земной поверхности при разработке нефтяных и газовых месторождений

$$\eta = \Delta PH \left(k\beta_{жс}m + \beta_{тв} (1-m) + \frac{1-\nu-2\nu^2}{E(1-\nu)} \right), \quad (3)$$

где ν — коэффициент Пуассона, $\beta_{жс}$ — сжимаемость флюида, $\beta_{тв}$ — сжимаемость твердой фазы, k — коэффициент изменения пластового давления флюида от начального до давления насыщения.

При отработке Южно-Петъегского месторождения прогнозные деформации горных пород и оседания земной поверхности составят 70 и 140 мм соответственно, при падении пластового давления на 5 и 10 МПа.

Таким образом, полученные количественные показатели деформационного процесса согласуются с прогнозными оценками оседания земной поверхности при отработке месторождений, выполненными в процессе разработки проектов создания вышеупомянутых геодинамических полигонов. Результаты прогнозных оценок расчета оседания земной поверхности и данные геодезических инструментальных измерений сведены в таблице.

В рамках ГГО в представленной работе выполнен анализ и интерпретация результатов геодинамического мониторинга самых крупных месторождений: Кальчического, Усть-Тегусского, Тямкинского, Радонежского, Ю-Петъегского, Протозановского. С целью выявления специфики природных геолого-тектонических условий осуществлен комплекс работ по дистанционному зондированию земли (геодинамическое районирование, линейно-блоковый анализ, структурно-тектонические построения). Выполнен анализ геолого-промысловых показателей разработки, а также геолого-геофизических, геолого-тектонических, инженерно-геологических и гидрогеологических материалов.

Учитывая огромную площадь лицензионных участков ООО «РН-Уватнефтегаз», большое число крупных и мелких месторождений расположенных на значительном удалении друг от друга, отсутствие автодорожной связи,

повсеместную заболоченность территории, в настоящей работе выполнено обоснование оптимальной структурной сети геодинамического мониторинга.

Результаты прогнозных оценок расчета оседания земной поверхности и данные геодезических инструментальных измерений

Геодинамический полигон	Площадь горного отвода, га	Разрабатываемые нефтенасыщ. пласты	Интервал глубин пластов, м	Суммарная нефтенасыщенная толщина пластов, м	Предприятие, выполнившее проект полигона	Прогнозные оценки оседания, мм	Значения вертикальных и (горизонтальных) деформаций по данным геодезических измерений
Кальчинский	7 273	Ю ₄ , Ю ₃ , Ю ₁ ¹ , Ю ₁ ^{а6} , Ю ₀ , Ач ₃ , Ач ₂ ² , Ач ₂ ¹⁻² , Ач ₂ ¹⁻¹ , Ач ₁ ⁴ , Ач ₁ ³ , Ач ₁ ² , Ач ₁	2 430–2 823	64,13	ЗАО «Центр прикладной геодинамики», 2006–2007 гг.	140 мм/10 лет или 14 мм/год при падении Р _{пл.} 6 МПа	–22 мм +44 мм (29 мм) за 2007–2010 гг. –104 мм +97 мм (53 мм) за 2013–2015 гг. при фактическом падении Р _{пл.} до 9 МПа
Усть-Тегусский (Усть-Тегусский ЛУ)	17 203	Ю ₂ , Ю ₃ , Ю ₄	2 381–2 455	22,5	Пермский ГТУ, 2008 г.	100 мм, при падении Р _{пл.} 10 МПа	–58 мм + 82 мм (66 мм) за 2011–2014 гг. при фактическом падении Р _{пл.} до 10 МПа
Усть-Тегусский (Урненский ЛУ)	19 298	Ю ₂ , Ю ₃ , Ю ₄	2 403–2 479	22,3			
Тяжминский	4 093	Ю ₃₋₄	2 830–2 920	14,1	НПЦ «ПромНедра Эксперт», 2010 г.	290 мм	–3 мм + 0 мм (89 мм) за 2014–2015 гг. при падении Р _{пл.} до 7 МПа
Ю-Петьегский	3 765	БС ₆ , БС ₇	2 187–2 218	9,3	ООО «Горные технологии», 2012 г.	100 мм при падении Р _{пл.} 10 МПа	–324 мм + 62 мм (61 мм) за 2013–2015 гг. при падении Р _{пл.} до 7 МПа
Радонежский	8 751	БС ₆ , БС ₇ , Ач(БС ₉), Ю ₂ , Ю ₃ , Ю ₄	2 243–2 821	32,7	НПЦ «ПромНедра Эксперт», 2010 г.	540 мм	Выполнена закладка наблюдательной сети полигона в 2015 г.
Протозановский	3 667	БС ₈ ¹ , Ю ₂ , Ю ₄	2 018–2 561	18,9	НПЦ «ПромНедра Эксперт», 2010 г.	340 мм	Планируется закладка наблюдательной сети полигона в 2016 г.

Согласно схеме нефтегазогеологического районирования (НГО) территория Уватской группы месторождений делится на западную и восточную части: на Фроловскую НГО и Каймысовскую НГО (рис. 2). Основной особенностью структурно-тектонической модели Уватской группы месторождений является его тектоническая неоднородность — разломно-блочное строение недр месторождения. Анализ структурной карты-схемы по отражающему горизонту Б, построенной по результатам сейсморазведочных работ (ООО ТННЦ, 2015), подтверждает глубинное (природное) происхождение динамически напряженных зон (ДНЗ), выделенных по результатам дистанционного зондирования. По данным структурного дешифрирования на рассматриваемой территории выделяется система ДНЗ — диагональная, соответствующая структурам фундамента и новейшему тектоническому этапу, отражающая особенности его переформирования и соответствующая элементам разломно-блоковых структур).

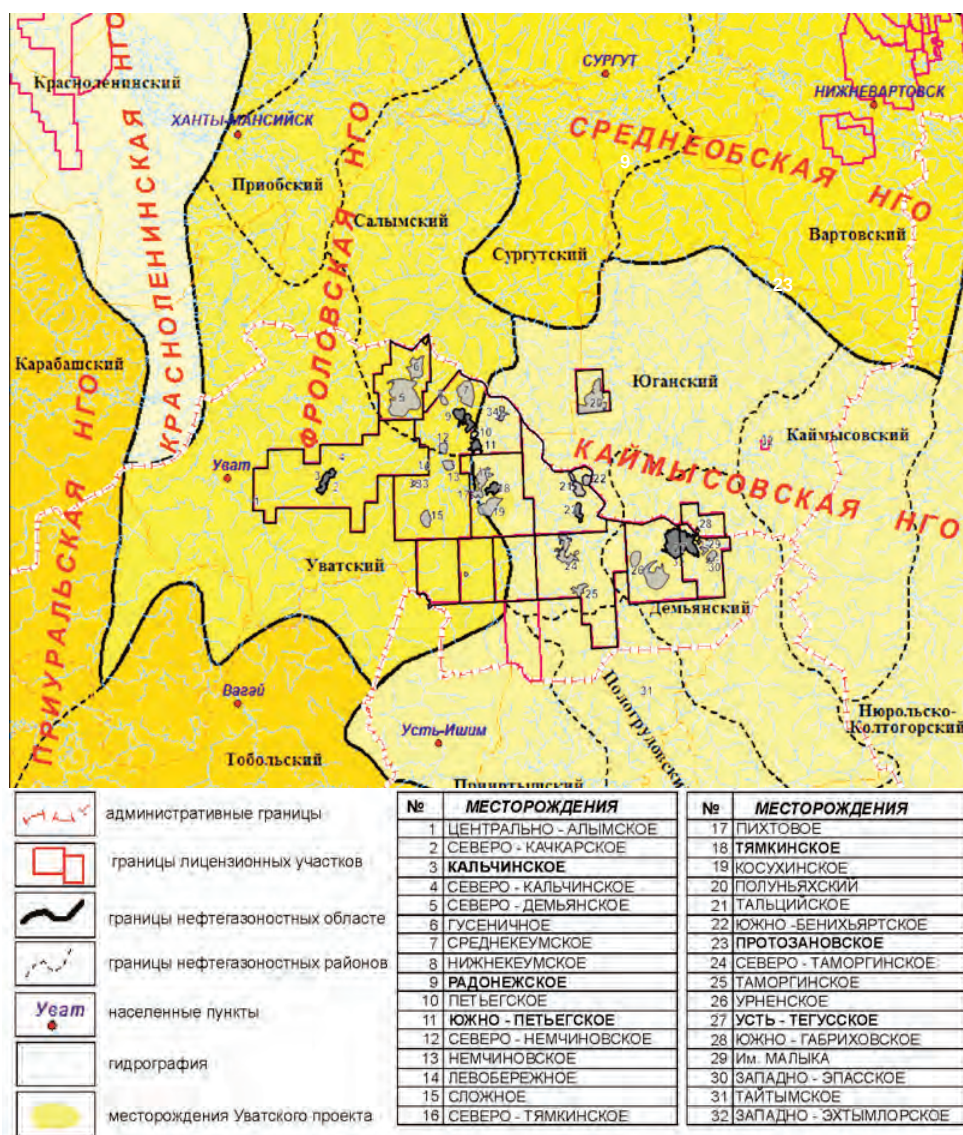


Рис. 2. Выкопировка из «Схемы нефтегазогеологического районирования Западно-Сибирской провинции» (Конторович А. Э., 2006 г.)

На структурном плане по отражающему горизонту Б западная часть в среднем характеризуется изогипсами —2 700 м, восточная часть —2 400 м, то есть на 300 м выше по отметкам и значительно интенсивнее представлена по разломной тектонике.

Полученные результаты структурно-тектонических построений позволяют сделать вывод о том, что существующие 6 геодинамических полигонов способны контролировать особенности геолого-тектонических условий выделенных районов, поскольку по 3 геодинамических полигона равномерно распределены: Кальчинский, Радонежский, Южно-Петъегский — в западной части (Фроловская НГО), а Тямкинский, Протозановский и Усть-Тегусский — в восточной части (Каймысовская НГО).

Месторождения Уватской группы, на которых созданы 6 геодинамических полигонов, имеют самые большие площади горных отводов, наибольшие толщины продуктивных пластов и запасы углеводородного сырья, а это значит, что их недра претерпевают самые высокие техногенные нагрузки и они могут являться ключевыми, эталонными для всей площади работ ООО «РН-Уватнефтегаз».

Таким образом, функционирование Кальчинского (Кальчинский л/у), Усть-Тегусского (Урненский и Усть-Тегусский л/у), Тямкинского (Пихтовый л/у), Радонежского и Ю-Петъегского (Кеумский л/у), а также Протозановского (Южно-Пихтовый л/у) геодинамических полигонов, способно обеспечить информацией для оперативного решения вопросов промышленной безопасности и обеспечить надлежащий контроль всей территории деятельности предприятия.

Выводы

- Анализ материалов ГГО позволяет сделать вывод о том, что прогнозные оценки оседания земной поверхности подтверждены полевыми инструментальными измерениями на Кальчинском и Усть-Тегусском геодинамических полигонах. Амплитуда вертикальных деформаций здесь составила 201 и 140 мм при действительном падении пластовых давлений соответственно 9 и 10 МПа, что подтверждается данными текущего состояния разработки указанных месторождений.

- На Тямкинском геодинамическом полигоне вертикальные деформации находятся в пределах точности измерений (–3 мм +0 мм), горизонтальные сдвигения достигают 89 мм, что свидетельствует о стабильной геодинамической обстановке и не подтверждает прогнозные оценки оседания земной поверхности.

- Полученные на Южно-Петъегском полигоне максимальные значения оседания достигающие — 324 мм могут являться экзогеодинамическим процессом, связанным с наличием слабых заторфованных грунтов в зоне интенсивного заболачивания. Это, безусловно, требует обязательной проверки при дальнейших мониторинговых наблюдениях.

- Выявленная инструментальными геодезическими измерениями скорость оседания земной поверхности на территории месторождений Уватской группы составляет 15 мм/год, что совпадает с результатами многолетних наблюдений на Самотлорском геодинамическом полигоне за период с 2002 по 2015 гг. [4, 5].

- Анализ и интерпретация полученных результатов (2007–2015 гг.) позволили оптимизировать наблюдательную сеть геодинамических полигонов месторождений Уватской группы. Рассмотренные 6 месторождений имеют самые большие площади горных отводов и нефтегазоносности, наибольшие толщины продуктивных пластов и запасы углеводородного сырья, а это значит, что их недра претерпевают самые высокие техногенные нагрузки. Геодинамические полигоны на перечисленных 6 месторождениях могут являться эталонными, ключевыми для всей площади Уватской группы, состоящей из 36 месторождений, поскольку именно здесь могут формироваться зоны геодинамического риска.

Список литературы

1. Инструкция по производству маркшейдерских работ. РД 07-603-03.
2. Положение о геологическом и маркшейдерском обеспечении промышленной безопасности и охраны недр. РД 07-408-01.

3. Кашников Ю. А., Ашихмин С. Г. Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья. – М.: Недра, 2007. – 466 с.
4. Васильев Ю. В., Радченко А. В., Юрьев М. Л. Техногенное влияние добычи углеводородов на формирование мульды оседания земной поверхности Самотлорского месторождения // Маркшейдерия и недропользование. – 2013. – № 5. – С. 63-66.
5. Васильев Ю. В., Филатов А. В., Погодин П. В. Результаты мониторинга деформационных процессов методами высокоточной геодезии, гравиметрии, радарной интерферометрии на Самотлорском геодинамическом полигоне // Маркшейдерский вестник. – 2015. – № 4. – С. 38-43 с.

Сведения об авторе

***Васильев Юрий Владимирович**, к. г.-м. н., старший научный сотрудник, Западно-Сибирский филиал института нефтегазовой геологии и геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Тюмень, тел. 8(9044)968355, e-mail: radan92@list.ru*

Information about the author

***Vasiliev Yu. V.**, Candidate of Geology and Mineralogy Science, senior researcher, West Siberian branch of the Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Tyumen city, phone: 8(9044)968355, e-mail: radan92@list.ru*