

СТРОЕНИЕ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА ПУГАЧЕВСКОГО ГРЯЗЕВУЛКАНИЧЕСКОГО РАЙОНА (о. САХАЛИН) ПО ДАННЫМ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

О.В. Веселов, П.Ф. Волгин, Л.М. Лютая

*ФГБУН Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки 1Б, 693022;
e-mail: veselov@imgg.ru*

Поступила в редакцию 26 марта 2012 г.

Анализируется геолого-геофизическая информация о Пугачевской группе грязевых вулканов, расположенных в зоне субмеридионального Центрально-Сахалинского разлома (ЦСР). Рассматриваются результаты геоплотностного и геотермического моделирования по двум пересекающимся профилям, проходящим через центральный участок Пугачевской площади. В разрезе позднемиоценовых отложений этой площади, приуроченной к разломной зоне, выделена субвертикальная узкая аномально разуплотненная зона конусообразной формы, которая расширяется от 1 км на поверхности до 4 км в ее основании на глубинах более 6 км. Плотность блоков разуплотнения – 2.20–2.22 г/см³, тогда как в смежных блоках она достигает 2.4–2.5 г/см³. Наиболее объемный блок разуплотнения расположен в нижнемеловой айской свите, где на глубинах ниже 4400 м при температурах более 140°C следует ожидать наличия обширной зоны коллекторов, вмещающей в основном углеводородный газ (УВ). Результаты моделирования показали, что основной резервуар газов, периодически выбрасываемых Пугачевским грязевым вулканом, находится в тектонически ослабленной разломной зоне ЦСР на глубинах 4.5–5.6 км в толще айской свиты. Выше располагаются менее крупные промежуточные резервуары. Пугачевская площадь перспективна на содержание промышленных залежей углеводородов.

Ключевые слова: раннемеловые свиты, плотностные и температурные модели, зона разуплотнения, коллектор, углеводороды, Пугачевский грязевой вулкан, о. Сахалин.

ВВЕДЕНИЕ

Грязевой вулканизм представляет собой уникальное геологическое явление, распространенное во многих районах позднеальпийского тектогенеза. Все исследователи грязевого вулканизма сходятся в том, что он является индикатором наличия в недрах залежей нефти и газа и подготовки процессов землетрясений. В связи с этим выяснение особенностей строения грязевулканических районов и грязевулканических построек, в частности, а также изучение механизма формирования и активизации грязевых вулканов до сегодняшнего дня является весьма актуальным направлением исследовательских работ во многих регионах мира [10, 20, 31, 39]. В этом плане не является исключением и о. Сахалин, где известны четыре района грязевого вулканизма [24, 27, 32, 33, 35, 36, 38]. Один из них находится на севере острова (Дагинские грязевые вулканчики), а три других располагаются на его юге (Пугачевский, Южно-Сахалинский и Лес-

новский). Самыми крупными из них и наиболее изученными являются Пугачевский и Южно-Сахалинский. Их исследование началось в 20-е годы прошлого века японскими геологами Ф.Сайто и М.Уэда, а затем было продолжено целым рядом специалистов [6, 7, 16, 24–26, 37, 41]. Активно изучаются они и в настоящее время [1, 12–14, 27, 30], причем, в итоге последних исследований была установлена непосредственная связь их деятельности с сейсмичностью, определяемой активным протеканием в земной коре геодинамических процессов [11, 15, 28, 42].

Выяснение деталей геологического строения районов сахалинских грязевых вулканов, установление местоположения сейсмоактивных зон, оценка перспектив нефтегазоносности районов их размещения могут быть получены путем геофизического моделирования разреза земной коры района вулканов в температурном и геоплотностном вариантах. Оба варианта предполагают использование как можно

большого объема геолого-геофизической информации с тем, чтобы снизить неоднозначность получаемых решений и сделанных выводов. С этой точки зрения наиболее представительным является район Пугачевского грязевого вулкана, где выполнен большой комплекс детальных геолого-геофизических работ, проведены структурно-поисковые, параметрическое бурение и проведены температурные измерения. При бурении этих скважин отмечались многочисленные выбросы глинистого раствора и газопроявления. Отобранные при этом газы состояли в основном из метана и углекислоты. Лабораторными определениями было выяснено, что они имеют нефтяную природу, сходны по компонентному составу с газами грязевых вулканов нефтяных районов Азербайджана, Кубани и Керченского полуострова. Совпадают по компонентному составу газы Пугачевского вулкана и с газами нефтяных месторождений Северного Сахалина [35, 36]. Еще И.М. Губкин писал, что диапировая структура, нефтегазовое месторождение и грязевой вулканизм являются триединой сутью процесса геологического развития области образования грязевых вулканов [10]. Последнее обстоятельство вполне определенно указывает на большую вероятность нахождения в осадочных отложениях в области Пугачевского вулкана залежей углеводородов.

Указанные соображения дают полное основание считать, что район Пугачевского грязевого вулкана, являясь одним из уникальных явлений на Дальнем Востоке России, был и остается объектом необходимых специальных исследований, результаты одного из возможных направлений которых приведены в настоящей работе.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Пугачевский грязевой вулкан находится в главном поле выхода на дневную поверхность меловых пород Сахалина [29, 36]. В районе его грязевулканического поля они образуют мощную толщу (порядка 4–5 км), подразделяемую сверху вниз на красноярковскую (K_2kr), быковскую (K_2bk) свиты и верхнюю часть найбинской (K_2nb_2) и айскую свиты. Первая из них, верхняя, сложена песчаниками, а в двух нижележащих преобладают аргиллиты и алевролиты, но в найбинской свите заметную долю составляют песчаники [29].

Поздне меловая толща разреза согласно подстилается отложениями раннемелового возраста, состоящими из нижней подсвиты найбинской свиты (K_1nb) и айской свиты (K_1as). Эти отложения представлены переслаиванием алевролитов, песчаников и аргиллитов. Породы в средней и нижней подсвитах быковской свиты характеризуются повышенной пористостью (до

18 %) [29]. Геохимические анализы позволяют отнести отложения поздне меловых свит к потенциально нефтегазоматеринским. Содержание органического вещества (ОВ), рассеянного в породах, колеблется в пределах 1.5–2.2 %. В породах верхней подсвиты быковской свиты содержание хлороформенного битумоида (ХБ) достигает 0.012 %, несколько ниже содержание ХБ в породах айской свиты (K_1as) и нижней части найбинской свиты (0.007–0.009 %). Меньше всего ХБ (0.002–0.003 %) в отложениях быковской и красноярковской свит [29]. Содержание спиртобензольного битумоида (СББ) в породах меловых отложений колеблется в пределах 0.003–0.009 % [29], максимальное (до 0.0037 %) – в пачках красноярковской свиты. Согласно геохимическим данным, тонкообломочные породы позднего мела в средней части Сахалина относятся к нефтегазоматеринским свитам среднего качества, генерационный потенциал которых в значительной степени реализован [19]. При этом нижние толщи поздне мелового комплекса соответствуют нижней катагенетической зоне метанообразования. Степень углефикации растительных останков соответствует газовым маркам углей [23]. Поэтому, судя по катагенетической преобразованности ОВ пород, поздне меловые отложения Пугачевского района могут содержать, главным образом, газовые залежи.

Поскольку вся толща быковской свиты является хорошей экранирующей покрывкой, то нижележащую найбинскую свиту можно признать в силу ее углеводородного потенциала газогенерирующей и газоаккумулирующей.

Наличие в отложениях айской свиты алевролитоподобных коллекторов позволяет отнести свиту к нефтегазоматеринскому и, возможно, газоаккумулирующему резервуарному комплексу [35].

По результатам параметрического бурения было выяснено, что здесь вскрытая мощность нижней части быковской свиты образована в результате пологого надвига пластичных чешуй отложений свиты друг на друга под воздействием мощного горизонтального сжатия.

Судя по материалам геологической съемки, структурная позиция Пугачевского грязевого вулкана определяется его приуроченностью к одноименной антиклинальной складке, которую можно рассматривать как диапировую структуру, входящую в состав упорядоченной структурной зоны, являющейся звеном плиоцен-четвертичного Центрально-Сахалинского разлома. Этот разлом представляет собой регионально выраженную взбросово-надвиговую тектоническую структуру субмеридионального простираения [26], сопровождаемую

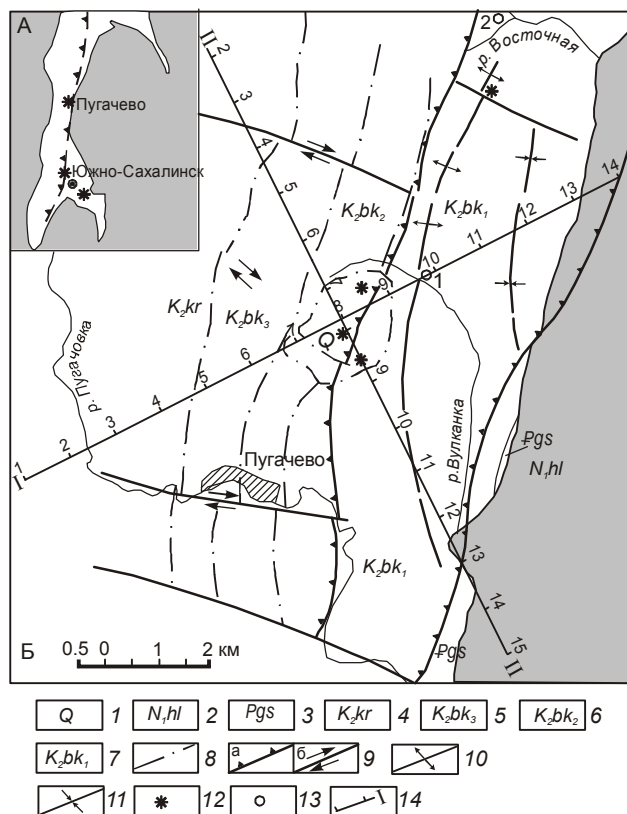


Рис. 1. А – обзорная схема Южного Сахалина (звездочки – грязевые вулканы Лесновский, Южно-Сахалинский, Пугачевский). Б – геологическая карта Пугачевской площади.

1–7 – разновозрастные отложения: 1 – четвертичные (Q); 2 – холмская свита (N_{1hl}); 3 – гасстелловская свита (Pgs); 4 – красноржковская свита (K_{2kr}); 5–7 – подсвиты быковской свиты (K_{2bk₁₋₃}); 8 – стратиграфические границы; 9 – разрывные нарушения: а – надвиги, б – сдвиги; 10 – шарнир Пугачевской антиклинали; 11 – шарнир Восточной синклинали; 12 – грифоны грязевого вулкана; 13 – пробуренные глубокие скважины; 14 – линии интерпретационных профилей.

системой менее крупных разрывов самой разнообразной ориентировки (рис. 1).

О сложности геологического строения Пугачевской площади свидетельствуют также материалы сейсморазведки МОГТ, которой удалось осветить ее геологический разрез лишь до 1.5–2.0 км. На временных разрезах прослежена только одна отражающая граница, вероятно находящаяся внутри нижнебыковской подсвиты. Этот условный сейсмический горизонт послужил основой для составления структурной схемы Пугачевской площади в общих чертах.

Согласно этой схеме, Пугачевская группа вулканов находится в теле субмеридионально протяженной антиклинальной складки высотой около 300 м. Восточный и северный борта складки пологие. С запада она ограничена субмеридиональным разрыв-

ным нарушением, известным как Пугачевский взбросо-надвиг. По этому нарушению западное крыло складки надвинуто на ее свод. Разлом осложняется поперечными сдвигами, делящими складку на ряд самостоятельных блоков. Один из этих сдвигов ограничивает свод Пугачевской антиклинальной складки с юга. На восточном и северном бортах складки сопрягается с небольшими синклиналиями.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ

На Пугачевском грязевулканическом поле в течение нескольких лет проводился комплекс геофизических исследований, позволивший выявить глубинные особенности строения этого района и построить геофизическую модель осадочной толщи Пугачевского вулкана.

Аномальное гравитационное поле в редукции Буге района Пугачевского грязевого вулкана в целом является слабозмущенным и характеризуется положительными значениями, меняющимися в пределах первого-второго десятка миллигал (мГл). Лишь в его центральной части наблюдается интенсивная округлая локальная аномалия относительно пониженных значений поля интенсивностью около 10 мГл, которая практически оконтуривает грязевулканическое поле (рис. 2а). Эта аномалия является весьма контрастной и осложняет периферию зоны относительно пониженных значений поля северо-западной ориентировки, начинающейся на акватории залива Терпения. В целом морфологические особенности поля не согласуются с геологическим строением района, поэтому вполне естественно предположить, что они в значительной мере обусловлены наличием в разрезе земной коры существенных плотностных неоднородностей, искажающих влияние структурного фактора. Особенно контрастно такая неоднородность выделяется отмеченной локальной аномалией, приуроченной к своду Пугачевской антиклинали, где находится грязевой вулкан. Очевидно, что эта неоднородность, как и вся аномальная зона, к которой она принадлежит, связана с областью разуплотнения, возможно приуроченной к основному каналу поступления на поверхность материала сопочной брекчии.

Аномальное магнитное поле (ДТ) района Пугачевского грязевого вулкана (рис. 2б) в целом характеризуется пониженным уровнем, что определяется низкими магнитными свойствами пород осадочного комплекса поздне мелового возраста. Породы айской, найбинской и быковской свит практически немагнитны. Значения магнитной восприимчивости не превышают $9.5 \cdot 10^{-6}$ – $13.5 \cdot 10^{-6}$ ед. CGSM. Более намагничен-

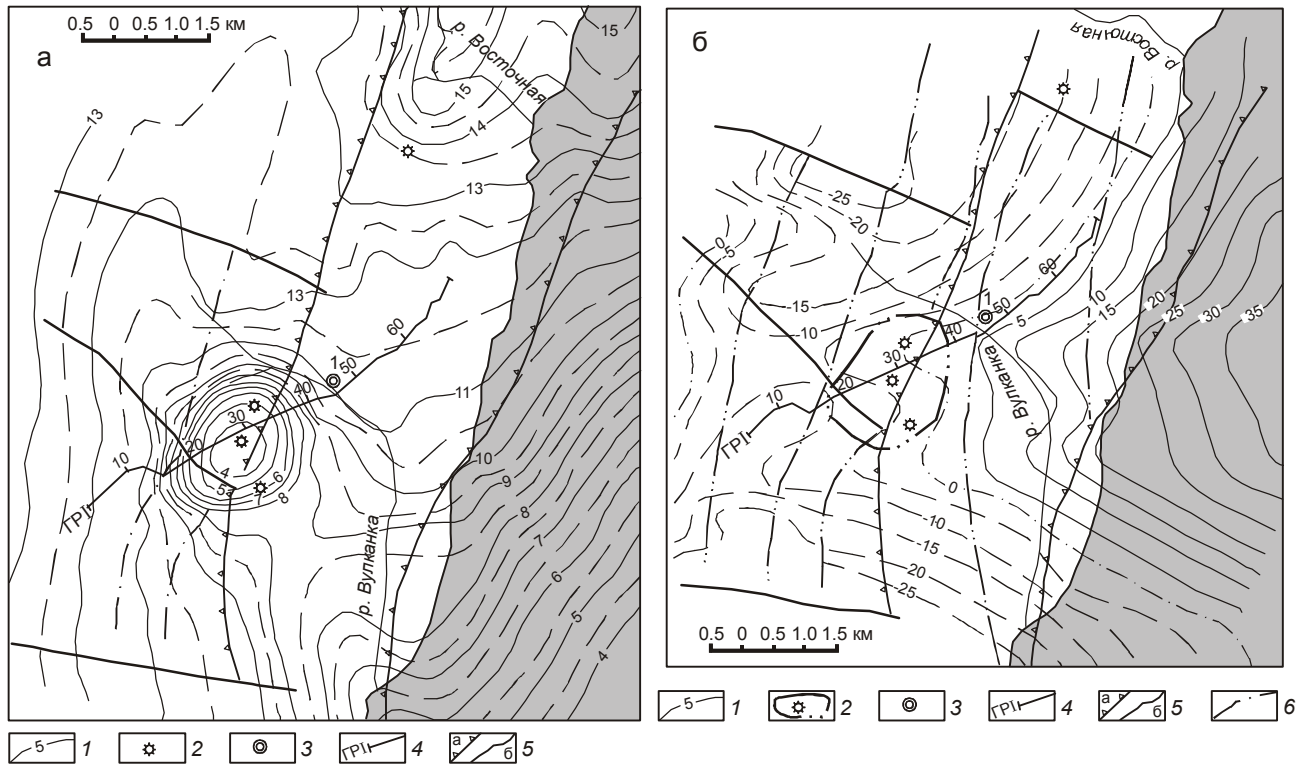


Рис. 2. Карта аномального гравитационного поля Пугачевской площади (в условном уровне) (а).

1 – изоаномалы (в мГл); 2 – грифоны грязевого вулкана; 3 – пробуренная параметрическая скважина; 4 – линия интерпретационного профиля; 5 – разрывные нарушения: а – надвиги, б – сдвиги.

Карта аномального магнитного поля (ΔT) (б).

1 – изодинамы (в нТл); 2 – грязевулканическое поле с грязевыми грифонами в нем; 3 – пробуренная параметрическая скважина; 4 – линия интерпретированного профиля; 5 – разрывные нарушения: а – надвиги, б – сдвиги; 6 – стратиграфические границы.

ными являются породы красноярковской свиты, магнитная восприимчивость которых равна в среднем $430 \cdot 10^{-6}$ ед. CGSM [5]. Не исключено, что низкий уровень магнитного поля определяется широким развитием в данном районе разрывных нарушений, обуславливающих образование зон дробления пород и тектонических брекчий. Ферромагнитные минералы здесь частично дезинтегрированы или приобрели хаотическую ориентировку, что существенно снижает намагниченность осадочных пород, как это обычно имеет место в других районах развития грязевого вулканизма [22]. Лишь на восточной стороне в центральной части района уровень поля повышен в связи с тем, что сюда протягивается магнитная аномалия, находящаяся в прибрежной части залива Терпения. Последняя предположительно связана с достаточно высокомагнитными слабо нарушенными эффузивными образованиями, известными как в поздне меловом, так и в его кайнозойском комплексах осадков. Однако заметно, что в районе грязевулканического поля периферия этой аномалии осложнена локальным минимумом, что может объясняться поступле-

нием на это место менее магнитных образований из более глубоких частей разреза, а также температурным фактором.

Тепловое поле района Пугачевского грязевого вулкана характеризуется несколько повышенным уровнем относительно его средних значений для Южного Сахалина [3, 30]. Проведенными расчетами выяснено, что здесь суммарный приповерхностный тепловой поток оценивается величиной около 52 мВт/м^2 , что характерно для зоны Центрально-Сахалинского разлома и несколько выше, чем в близлежащих районах юга Сахалина. Полученные геотемпературные данные свидетельствуют о существенно большем прогреве привулканической части разреза осадков по сравнению с таковыми на поверхности смежных участков. Так, приповерхностная температура почвы вблизи жерла превышает среднегодовую вне вулканического поля на $8\text{--}18^\circ\text{C}$ в периоды межпароксизмальной деятельности вулкана. Кроме того, выяснено, что в поисковых скважинах Пугачевской площади на глубине 500 м зафиксированы температуры около 50°C , что на $16\text{--}17^\circ\text{C}$ превышает темпе-

ратуру на той же глубине в скважинах на близлежащих площадях разведочного бурения.

Следует отметить, что анализ эволюции теплового поля Охотоморско-Сахалинского региона приводит к выводу, что в раннепалеогеновый период тепловой поток в южной части Сахалина был на уровне 42 мВт/м². Разрез осадочной толщи характеризовался низким геотемпературным градиентом и поэтому породы на палеоглубинах 1.5–2 км при максимальном погружении позднемиоценовых толщ находились в температурном интервале 50–75°C. При позднеогеновой инверсии осадочного комплекса и эрозии примерно полуторакилометровой толщи на поверхность были выведены позднемиоценовые породы с температурами более высокими в сравнении с температурами осадочного чехла зал. Терпения на сопоставимых уровнях до глубины 1.5 км. Однако относительно спокойный тектонический режим района в поздне неогене-плиоцене привёл к стабилизации температурного режима осадочных комплексов, о чем свидетельствует прямолинейный характер термограмм скважин Южного Сахалина [3]. Выпуклый характер термограмм двух скважин Пугачевской площади в верхнем интервале свидетельствует об активном адвективном выносе тепла из нижележащих толщ.

ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для района Пугачевского грязевулканического месторождения было проведено геофизическое моделирование по двум ортогональным профилям, пересекающимся в его центральной зоне (рис.1). Интерпретационный профиль I, имеющий длину 17 км, пересекает район с юго-запада на северо-восток. Профиль II, такой же длины, пересекает район с северо-запада на юго-восток. Геологический разрез на обоих профилях состоит из шести слоев, априорно представляющих собой конкретные осадочно-стратиграфические комплексы пород. Первый, самый нижний слой разреза на профиле I отождествлен с толщей айской свиты мелового возраста, последующие четыре верхних слоя представлены породами найбинской, быковской, разделенной на два подслоя, и красноярковской свитами. Шестой, самый верхний слой, соответствует нерасчлененному комплексу осадков палеоген-неогенового возраста (рис. 3). Для всех слоев разреза характерна общая направленность их восстания от обоих концов профиля к его центру, где под грязевым вулканом с глубиной все более и более рельефно проявляется крупная антиклинальная структурная форма, которую следует рассматривать как диапировую складку. Как указывалось выше, совокупность всех слоев разреза представляет собой практически однородную в литологическом

отношении аргиллитоглинистую толщу. Лабораторными определениями установлено, что ее плотность со слабым градиентом возрастает сверху вниз от 2.35 г/см³. В связи с этим для последующих расчетов априорная (начальная) плотность слоев принималась с чисто условным разграничением, составляющим 0.05–0.10 г/м³. Исходя из этого плотность самого верхнего (шестого) слоя была принята равной 2.35 г/см³, а всех остальных нижележащих последовательно 2.40, 2.45, 2.50, 2.55 и 2.60 г/см³. Другой важной особенностью разреза является наличие в его центральной части двух крупных разрывных нарушений. Наибольшим из них является восточный, представляющий собой региональный Центрально-Сахалинский взбросо-надвиг. Его плоскость, выходя на поверхность почти вертикально, с глубиной выполаживается к западу почти до горизонтали. По ней все западные части слоев разреза надвинуты на их блоки, расположенные восточнее плоскости надвига. Второе разрывное нарушение представляет собой Пугачевский разлом, который входит в состав западной части Центрально-Сахалинской разломной зоны. Его плоскость сместителя, так же как и предыдущего, являясь у поверхности субвертикальной, с глубиной сильно выполаживается и к началу профиля сливается с субгоризонтальной плоскостью сместителя Центрально-Сахалинского разлома. Несколько западнее Пугачевского разлома находится ответвляющийся от него разрыв небольшой амплитуды, определяемый по геолого-геофизическим данным как поперечный к Пугачевскому разлому сдвиг. Находящаяся здесь межразломная зона по всем слоям разреза сброшена относительно смежных участков. Она представляет собой тектонически ослабленную зону, само существование которой способствовало проявлению над ней на поверхности грязевого вулканизма.

Аномальное гравитационное поле вдоль линии профиля от его начала плавно понижается к его центральной части примерно на 6–7 мГл с градиентом около 1 мГл/км, где фиксируется локальный минимум интенсивностью более 10 мГл. Местоположение этого минимума практически точно совпадает с местонахождением грязевулканического поля Пугачевского вулкана. Восточнее аномалии гравитационная кривая по существу выполаживается до значения 9–10 мГл. Обращает на себя внимание явное несоответствие кривой гравитационного поля поведению геологических слоев. Так в западной половине профиля I имеет место снижение кривой, тогда как в этом направлении все геологические слои воздымаются к центральной части грязевого поля. Почти аналогичная картина отмечается и в западной части профиля II, где подъем геологических слоев сопровождается

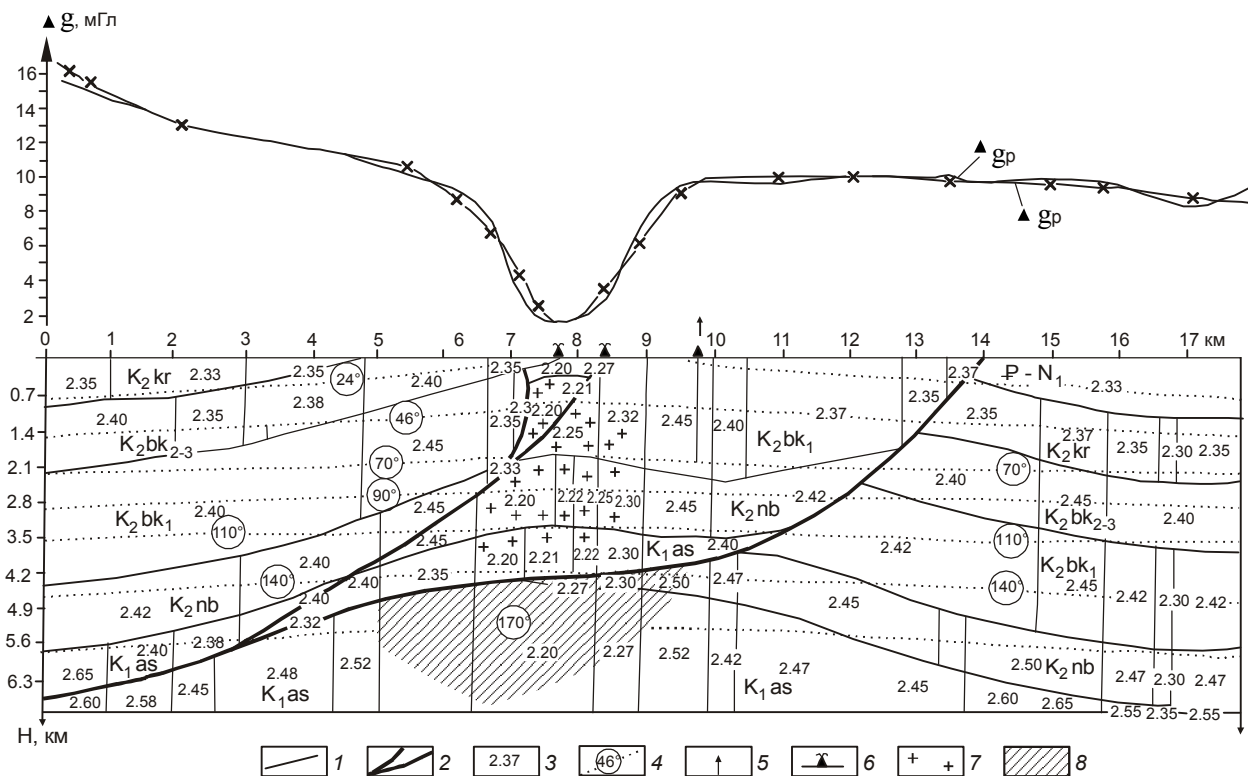


Рис. 3. Геолого-геофизический разрез по интерпретационному профилю I (юго-запад – северо-восток).

I – геологические границы и индексы стратиграфических подразделений осадочного чехла мелового: K₁as – айская, K₂nb – найбинская, K₂bk – быковская, K₂kr – красноярковская свиты, P-N₁ – отложения кайнозойского возраста; 2 – надвиги; 3 – рассчитанные плотности (г/см³); 4 – изотермы (°С); 5 – пробуренная параметрическая скважина; 6 – грифоны грязевого вулкана; 7 – область нефтегазогенерации и нефтегазоаккумуляции; 8 – область газогенерации и газонакопления.

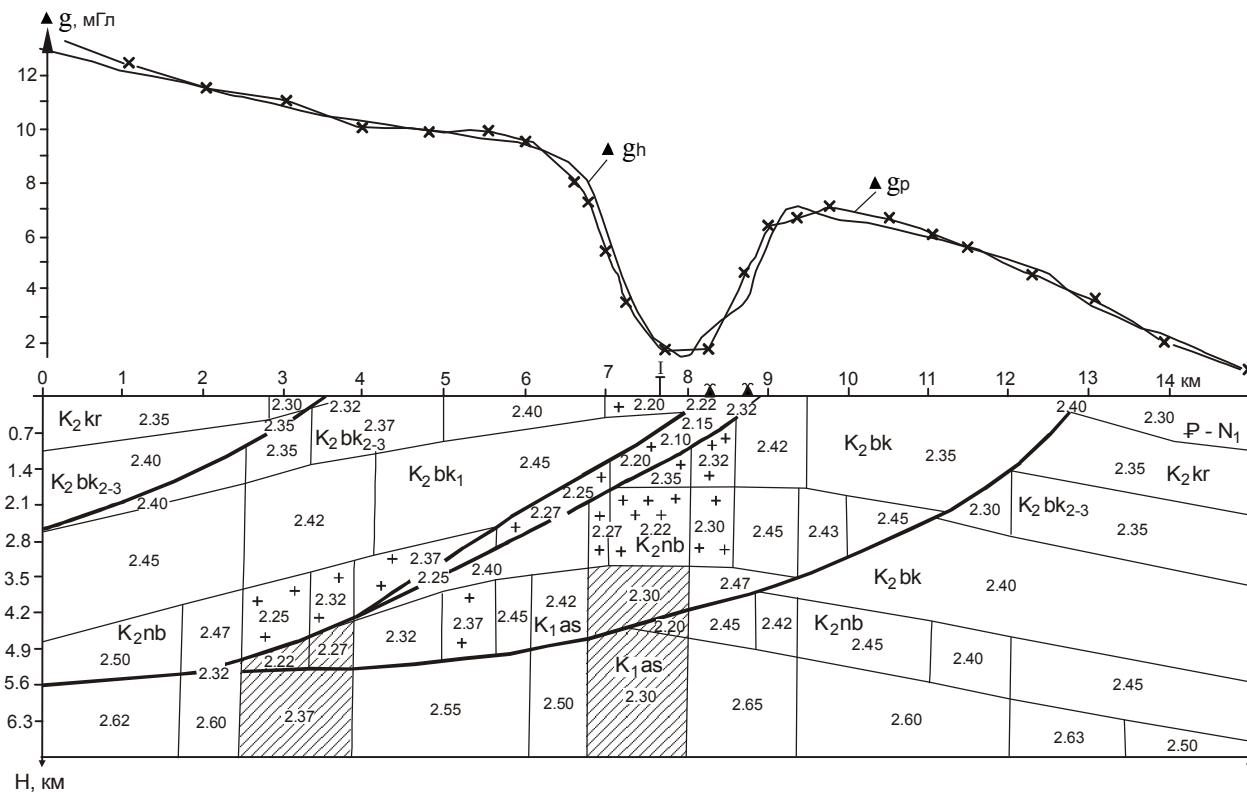


Рис. 4. Геолого-плотностной разрез по профилю II (северо-запад – юго-восток). Условные обозначения на рис. 3.

лишь выполаживанием гравитационной кривой. То есть налицо обратное соответствие гравитационного поля геологическому строению района Пугачевского грязевого вулкана, что вполне определенно указывает на существование здесь весьма значительных плотностных неоднородностей.

Аномальное магнитное поле (ΔT) вдоль линии профиля плавно снижается от его обоих краев к центру примерно на 25–30 нТл, причем наиболее низкий участок кривой находится в двух км западнее грязевого вулкана. В центре профиля наблюдается относительный максимум поля ΔT , осложненный в районе грязевулканического поля локальным минимумом. Аналогичная картина наблюдается при интерпретации гравитационного и магнитного полей вдоль профиля II (рис. 4).

Интерпретация геолого-геофизических материалов района Пугачевского грязевого вулкана осуществлялась в несколько этапов. Первый из них заключался в обобщении всех имеющихся на данный момент сведений о его геологическом строении. В результате оказалось возможным сконструировать по линии I-I, пересекающей грязевулканическое поле, геологический разрез, близкий к вероятному. Этот разрез лег в основу температурного и плотностного моделирования строения осадочного чехла района Пугачевского грязевого вулкана, осуществленного на следующем этапе интерпретации.

Температурное моделирование основывалось на анализе измерений температур в глубоких разведочных скважинах Сахалина. Для расчета температур по вертикальному разрезу осадочного чехла использовалось решение стационарного уравнения теплопроводности. Исходными данными являлись определения теплового потока, геотемпературного градиента и коэффициентов теплопроводности пород, полученные при геотермических исследованиях на Сахалине [3 и др.]. Тепловой поток вдоль профиля изменяется от 49 до 52 мВт/м², геотемпературный градиент – от 31 до 40°С/км, теплопроводность – в пределах 1.32–1.62 Вт/(м·К). Кроме того, были обработаны эпизодические измерения температуры на глубине 1.5 м, проведенные в межпароксизмальные периоды, и сделан расчет суммарного теплового потока в центральной части, чья конвективная составляющая вычислялась по формуле

$$Q_{\text{конв}} = 0.5 \sum h_i \frac{dT_i}{dz_i} m_i C_{pi},$$

где h_i – мощность i -го пласта в зоне конвективной передачи тепла (м); m_i – модуль стока в i -м пласте (кг/с·м²); C_{pi} – теплоемкость пород (Дж/кг·град); $\frac{dT_i}{dz_i}$ –

геотермический градиент в i -м пласте [40]. Модуль стока оценивался по формуле: $m_i = \frac{Q}{S_i}$, где Q – расход флюида, S_i – площадь истечения. Расчетные параметры даны в следующем виде: $h_i = 1900$ м; grad T = 31.2·10⁻³ град/м; $q_{\text{конв.}} = 30$ мВт/м², $C_p = 975$ Дж/кг·град (для аргиллито-алевролитовой толщи).

Параллельно с температурными исследованиями осуществлялось моделирование плотностной структуры этого же разреза по методике гравитационного моделирования. Это моделирование предполагает путем решения обратной линейной задачи гравиметрии выделение в разрезе осадочных слоев интервалов с относительно повышенной и пониженной плотностью. Общей задачей этого моделирования являлось установление на данном участке геологического пространства распределения плотности, с достаточной степенью надежности отвечающего ее реальному распределению. В основу данного вида моделирования был положен известный алгоритм В.И. Старостенко, реализованный в программе В.И. Исаева [17, 21], предназначенной для расчета двухмерных плотностных моделей, позволяющей решать обратную задачу гравиметрии в линейной постановке. В 1992 г. В.Н.Сеначиным была усовершенствована эта программа, что позволило решать обратную задачу с блоками трапецевидной формы (путем объединения группы блоков в единое геологическое тело) [4, 34].

В самом общем виде методика гравитационного моделирования сводится к расчету гравитационного поля от априорной плотностной модели, представленной серией слоев с фиксированной плотностью, блоками правильной геометрической формы (трапеция) с вертикальными боковыми сторонами, и установлению его адекватности наблюдаемому. В случае их несоответствия друг другу путем расчета плотностного разреза, представленного в виде систем линейных уравнений, решается обратная задача гравиметрии. Рассчитанная таким образом плотностная модель анализируется по ряду признаков [17, 34].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

В результате обработки температурных измерений, выполненных вблизи жерла грязевого вулкана, было установлено, что модуль стока флюидов на участке его деятельности составляет 1–2.5·10⁻⁶ кг/см², т.е. суточный вынос грязевой массы достигает четверти кг на одном квадратном метре. Сделанные одновременно расчеты показали, что здесь конвективная составляющая приповерхностного теплового потока составляет около 30 мВт/м². Температурным мо-

делированием, выполненным вдоль линии геологического разреза, было выяснено, что в интервале его глубин температура осадочных пород меняется от 19°C в приповерхностных слоях главного грифона до 170°C на глубине 5 км в самом первом слое. Результаты моделирования, представленные на рис. 3, позволяют утверждать, что на глубине 3300 м температура пород найбинской свиты достигает 110°C, следовательно, в толще, насыщенной аргиллитовой составляющей, возникают зоны вторичного разуплотнения. В этой толще следует предполагать наличие коллекторов, содержащих газожидкостную составляющую. Ниже, в пределах айской свиты на глубинах около 4400 м и глубже, где температура превышает 140°C, при наличии зоны разуплотнения, вероятно существование обширной коллекторной толщи, вмещающей высокую долю газовой составляющей глубинного флюида (более 10 % от общего объема газоводокластитовой массы).

Результаты плотностного моделирования геологического разреза приведены на том же рисунке. Их рассмотрение показывает, что здесь имеют место вариации плотности от одного его блока к другому, которые формируют в разрезе вертикальные локальные плотностные аномалии определенного знака. Особенно контрастная аномалия находится под грязевым вулканом. Здесь во всем интервале разреза вычисленная плотность слагающих слои блоков составляет всего 2.2–2.3 г/см³, тогда как смежные с ними блоки слоев имеют плотность 2.45 г/см³ и выше. Форма этой аномалии близка к конусообразной и, по-видимому, отражает реалии глубинного строения Пугачевского грязевого вулкана, заключающегося в существовании здесь во всем осадочном разрезе субвертикальной, тектонически ослабленной, трещиноватой, разуплотненной зоны. Что касается смежных с указанной аномальной зоной относительно уплотненных блоков разреза, то они, очевидно, отвечают локальным участкам больших динамических напряжений, что подтверждается очень сложными условиями проходки параметрической скважины № 1, пробуренной в одном из них. Другая важная особенность плотностного разреза состоит в том, что к плоскостям надвигов прилегают относительно разуплотненные блоки разреза. Предполагается, что они трассируют собой высокопроницаемую зону интенсивного дробления и тектонической трещиноватости, сопровождающую плоскости скольжения надвигов.

Основные особенности плотностного разреза заключаются в следующем:

- осадочная толща, выполняющая геологический разрез площади, в целом является достаточно

однородной по плотности, которая со слабым градиентом монотонно возрастает сверху вниз от 2.35 до 2.60 г/см³;

- вариации плотности во всех слоях разреза, за исключением аномальных участков, незначительны и не превышают первых единиц сотых граммов в см³;

- плоскости надвигов трассируются относительно разуплотненными блоками разреза, плотность которых соразмерна и иногда даже меньше плотности блоков вышележащих слоев;

- под грязевым вулканом во всех слоях разреза имеют место контрастно выраженные, разуплотненные до 2.20–2.27 г/см³ блоки, в совокупности формирующие аномально низкую по плотности конусообразную структурную форму;

- по обе стороны от местоположения грязевого вулкана в разрезе отмечаются относительно уплотненные (до 2.45 г/см³) блоки, происхождение которых связывается с существованием здесь условий больших тангенциальных напряжений.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты геофизического моделирования разреза земной коры Пугачевского грязевулканического района по линиям 2-х профилей, проходящих через поле его деятельности, свидетельствуют о новизне полученной информации, которая освещает ранее не известные особенности ее глубинного строения, в целом, и тектонической постройки самого вулкана, в частности.

На основе сопоставления температур на одних и тех же глубинах в глубоких скважинах, пробуренных на Пугачевской и близлежащих к ней площадях, можно сделать следующий вывод. В пределах первой, в зоне Пугачевского вулканического центра, при истечении грязевых масс через толщу быковской свиты к поверхности происходит постоянный теплоперенос, приводящий к увеличению температуры в породах, вмещающих каналы конвективного течения флюидов. Наличие этого эффекта, а также сделанные оценки средней мощности интервалов разуплотнения, где происходит формирование грязевых масс, и данные расчетов модуля их стока на поверхность свидетельствуют о том, что Пугачевский грязевый вулкан представляет собой канал мощного выноса тепла из недр Земли, носителем которого являются глубинные флюиды. Проведенное по глубине разреза температурное моделирование позволяет утверждать, что в интервалах глубин залегания найбинской и айской свит следует ожидать наличие зон коллекторов, представляющих собой своеобразные резервуары флюидов, содержащих высокий процент

углеводородных компонентов. При этом предполагается, что в найбинской свите будет преобладать их газо-жидкостная составляющая, а в айской, в основном, газовая. Выявленное для разных интервалов глубин температурное распределение позволяет утверждать, что источником углеводородных газов Пугачевского грязевого вулкана являются отложения айской свиты. Вышележащий комплекс отложений найбинской и быковской свит также может являться нефтегазогенерирующим, но в нем должны преобладать его нефтегазоаккумулирующие возможности. Представление о глубинном источнике газов Пугачевского грязевого вулкана вполне согласуется с мнением некоторых исследователей [2, 8, 9] о том, что газы грязевых вулканов генерируются в осадочных толщах на глубинах порядка 5–6 км. Считается, что на меньших глубинах не существует термобарических условий для генерации газа в объемах, способных формировать энергетические ресурсы, обеспечивающих образование и деятельность грязевых вулканов.

Результаты плотностного моделирования свидетельствуют о наличии в части разреза, находящейся под грязевым вулканом, аномально разуплотненной зоны и ограничивающих ее достаточно узких интервалов относительного уплотнения. Выделенная на профиле I аномальная зона от поверхности до глубины 2000 м характеризуется конусообразной формой, где участки слоев верхней и нижней частей быковской свиты имеют плотность всего 2.2 г/см^3 , примерно соответствующую плотности истекающей из жерла вулкана грязи. С востока и запада этот локальный участок аномальной зоны ограничен плоскостями разрывов, за которыми находятся блоки, уплотненные до 2.35 г/см^3 . Ниже этой конусообразной, локально разуплотненной части аномальной зоны под плоскостью надвига находится значительно больший, почти квадратный блок, плотность которого такая же аномально низкая. Выполнен этот блок толщей найбинской свиты и верхним слоем айской свиты. По обе стороны от этого блока располагаются блоки плотностью от 2.30 до 2.45 г/см^3 . Снизу блок ограничен субгоризонтальной плоскостью Центрально-Сахалинского взбросо-надвига.

Под плоскостями надвига отмечается еще более обширная, разуплотненная до 2.2 – 2.25 г/см^3 часть разреза, представленная тремя блоками слоя айской свиты. В смежных с зоной разуплотнения блоках плотность значительно более высокая и составляет 2.52 г/см^3 . В целом, для всей толщи айской свиты характерно ее закономерное уплотнение к концам профиля, чего не наблюдается для всех слоев свит вышележащих верхнемеловых отложений.

Отмеченная особенность в распределении плотностных неоднородностей в разрезе земной коры под Пугачевским грязевым вулканом позволяет достаточно объективно обосновать модель его глубинного строения. Судя по всему, в общем виде вулканическая постройка имеет форму конуса, разделенного на три части. Самая верхняя из них, сложенная глинистыми слоями нижней части быковской свиты и частично слоем ее верхней части, представляет собой область размещения близповерхностных залежей газа, находящихся в изолированных друг от друга резервуарах, представляющих собой своеобразные газовые камеры. По-видимому, первая из них находится у самой поверхности, где фиксируется маломощная часть слоя верхней подсвиты быковской свиты. Еще одна залежь, скорее всего, находится на глубине порядка 2000 м (целиком в нижнем слое быковской свиты) в зоне пересечения линий субвертикального разрывного нарушения и надвига. Этому предположению вполне соответствуют расчеты В.Н. Горкуна [6, 37], согласно которым в канальной зоне Пугачевского вулкана предполагалось наличие двух газовых камер, ориентировочно находящихся одна на глубине 40 м, а вторая – в интервале 1900–2300 м. Вторая (центральная) часть вулканической структуры сложена слоем найбинской свиты и верхней частью айской свиты, прилегающей сверху к плоскости Центрально-Сахалинского взбросо-надвига. Здесь, как и в первом случае, предполагается существование высокопроницаемой зоны и весьма вероятное наличие в ее принадвиговой части еще нескольких газовых камер. Третья (самая нижняя) часть глубинной постройки вулкана находится под плоскостью надвига практически целиком в слое айской свиты. Обладая значительно большими размерами, по плотности она соизмерима с ее верхними частями и также должна представлять высокопроницаемую мощную зону развития трещинных коллекторов. По-видимому, здесь и находится основной резервуар, питающий через систему трещин, вплоть до поверхностного грязевулканического поля, всю вышерасположенную серию газовых камер.

В рамках этой модели предполагается, что в процессе тепловой конвекции с глубины залегания айской свиты по высокопроницаемым разрывным трещинным зонам происходит подъем материала сопочной брекчии с примесью УВ. По мере их поднятия и уменьшения литостатического давления выделяются газы и УВ, которые затем локализуются в залежи. При достаточном скоплении УВ создавшееся дополнительное напряжение приводит к активизации газовых камер и возобновлению процесса проникновения вторичных глинистых, насыщенных га-

зом, растворов в верхи разреза. Периодическое возобновление этого процесса приводит к образованию во всем аргиллито-глинистом разрезе цепочки газовых камер и, в конечном итоге, к периодической активности грязевого вулкана. Выделенные на основе гравитационного моделирования под грязевым вулканом зоны разуплотнения следует интерпретировать как пути восходящих потоков газонасыщенных флюидов и области размещения серии вторичных очагов грязеизвержений.

Итак, в глубинном разрезе Пугачевского вулкана выделяются несколько крупных аномальных зон. Первая сверху зона разуплотнения находится в толще быковской свиты, в интервале глубин 0.79–1.22 км, с температурами 46–60 °С, то есть породы находятся в стадии позднего диагенеза, характеризующегося активным выделением CO_2 и бикарбонатов. Вторая крупная зона разуплотнения располагается в найбинской свите, в интервале глубин 2.45–3.2 км, с температурами 90–105 °С, что соответствует поздней стадии протокатагенеза. Третья зона находится в интервале 3.5–4.8 км, охватывая нижнюю часть найбинской и верхнюю часть айской свит. Температурный интервал этой зоны – 115–140 °С, что соответствует оптимальной зоне нефтеобразования и нефтесохранения. Наиболее объемная зона разуплотнения в пределах рассматриваемого разреза охватывает блок пород айской свиты в интервале глубин 4.8–6.3 км. Эта зона целиком находится в области образования термогенного газа и его накопления. Интерпретация полученных данных свидетельствует о существовании в меловой толще осадков Пугачевского грязевулканического района многоэтажной системы зон разуплотнения. При этом наиболее объемной является зона разуплотнения в породах айской свиты, являющейся основным резервуаром накопления газовой смеси, поставляемой по глубинному разлому. Примером описанного типа строения грязевых вулканических районов могут являться Апшеронская и Шамахи-Гобустанские области Азербайджана. Поисково-разведочным бурением выяснено, что там в пластичных слоях глины и глинистые породы составляют от 50 до 90 процентов, при этом плотность осадочных глинистых слоев изменяется от 2.3 до 2.6 г/см³. В зонах регионального разуплотнения глинистая толща имеет меньшую, до 2.2 г/см³, плотность [18, 31]. Все это очень характерно и для осадочной толщи Пугачевской площади, причем, здесь последнее обстоятельство еще более выражено.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Температурным моделированием выяснено, что источником углеводородных газов Пугачевского

вулкана могут являться отложения айской свиты среднемелового возраста, а осадки вышележащей найбинской являются как нефтегазогенерирующими, так и нефтегазоаккумулирующими. Отложения быковской свиты, являясь региональной глинистой покровкой, могут быть и газоаккумулирующими. Основной причиной тепловой аномалии, связанной с Пугачевским грязевым вулканом, является теплоперенос в вязких аргиллито-глинистых слоях и вертикальная адвекция тепла по каналу вулкана.

Гравитационное моделирование также показало, что под жерлом вулкана во всей осадочной толще земной коры наблюдается аномально разуплотненная зона, которая интерпретируется как путь восходящего конвекционного потока газонасыщенных флюидов в глинистой среде и область размещения серии вторичных очагов грязеизвержений.

Представление о глубинном источнике газов Пугачевского вулкана согласуется с мнением многих исследователей [18, 31 и др.], что газы грязевых вулканов генерируются в осадочных толщах на глубинах порядка 5–6 км, где существуют термобарические условия для образования больших объемов газа.

Данные плотностного и геотемпературного моделирования Пугачевской группы вулканов можно применить как основу для оценки глубинного строения районов грязевого вулканизма на юге Сахалина и Хоккайдо.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аргентов В.В., Жигулев В.В., Патрикеев В.Н. Строение Южно-Сахалинского грязевого вулкана по сейсмическим данным // Строение земной коры и перспективы нефтегазоносности в регионах Северо-Западной окраины Тихого океана: Сб. статей. Южно-Сахалинск, 2000. Т. 2. С. 104–113.
2. Ахундов И.Д., Гусейнов М.А., Солодилов Л.Н. Механизм образования грязевых вулканов и основы мониторинга // Разведка и охрана недр. 2003. № 2. С. 26–28.
3. Веселов О.В., Соинов В.В. Тепловой поток Сахалина и Южных Курильских островов // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Т. IV. Структура и вещественный состав осадочного чехла Северо-Запада Тихого океана. Южно-Сахалинск, 1997. С. 153–176.
4. Волгин П.Ф., Исаев В.И., Косыгин В.Ю. Нефтегазоносность верхнемеловых отложений южной части Сахалина // Тихоокеан. геология. 2004. Т. 23, № 1. С. 61–76.
5. Геология, геодинамика и перспективы нефтегазоносности осадочных бассейнов Татарского пролива / А.Э. Жаров, Г.Л. Кириллова, Л.С. Маргулис и др. Владивосток: ДВО РАН, 2004. 220 с. (Серия "Осадочные бассейны Востока России" / Гл. ред. А.И. Ханчук).
6. Горкун В.Н., Сирый И.М. Опыт расчета глубины залегания и объема выбрасываемого газа при извержении грязевых вулканов на Южном Сахалине // Геология и геофизика. 1967. № 2. С. 30–41.
7. Горкун В.Н. Сравнение способов подсчета глубины залегания

- ния газов, питающих грязевые вулканы (на Южном Сахалине) // Вопросы геологии Сахалина и Курильских островов. Владивосток, 1974. С.295–302. (Тр. СахКНИИ; вып. 31).
8. Григорьянц Б.В., Гулиев И.С., Огаджанов В.А. Условия формирования плотностных неоднородностей и автономной складчатости // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1989. № 10. С. 121–125.
 9. Грязевой вулканизм Советского Союза и его связь с нефтегазоносностью / А.А. Якубов, Б.В. Григорьянц, Ад.А. Алиев и др. Баку: Изд-во “Элм”, 1980. 162 с.
 10. Губкин И.М. Учение о нефти. М., Л.: Изд-во ОНТИ НКТП СССР, 1937. 456 с.
 11. Динамика процессов дефлюидизации Центрально-Сахалинского глубинного разлома при сейсмической активизации (по результатам мониторинга Южно-Сахалинского грязевого вулкана в июле-августе 2001 г.) / А.С. Астахов, К.Ф. Сергеев, О.А. Мельников и др. // Докл. РАН. 2002. Т. 386, № 2. С.1–6.
 12. Ершов В.В., Мельников О.А. О необычном извержении Главного Пугачевского газоводолитокластитового (грязевого) вулкана на Сахалине зимой 2005г. // Тихоокеан. геология. 2007. Т. 26, № 4. С. 69–74.
 13. Ершов В.В., Доманский А.В., Левин Б.В. Моделирование температурного режима грифонов грязевого типа // Докл. РАН. 2010. Т. 435, № 3. С. 384–389.
 14. Ершов В.В., Шакиров Р.Б., Обжиров А.И. Изотопно-геохимические характеристики свободных газов Южно-Сахалинского грязевого вулкана и их связь с региональной сейсмичностью // Докл. РАН. 2011. Т. 440, № 2. С. 256–261.
 15. Землетрясение 4(5) августа 2006 г. на Сахалине / А.И. Иващенко, Р.Ф. Булгаков, Ким Чун Ун и др. // Проблемы геодинамики и прогноза землетрясений / I Российско-японский семинар, Хабаровск, 26-29 сентября 2000 г. Хабаровск, 2001. С. 109–125.
 16. Ильев А.Я., Сапрыгин С.М., Сырык И.М. Извержение Пугачевского грязевого вулкана в 1967 г. // Изв. Сахалин. отдела географ. об-ва СССР. 1970. № 1. С.92–99.
 17. Исаев В.И., Хвостовская Н.В. О реализации на ЕС ЭВМ метода математического программирования для решения обратной задачи гравиметрии в линейной постановке // Разведочная геофизика: теория, методика, результаты. Киев: Наук. думка, 1984. С.156–171.
 18. Кадиров Ф.А., Мухтаров А.Ш. Геофизические поля, глубинное строение и динамика грязевого вулкана Локбатан // Физика Земли. 2004. № 3. С.67–73.
 19. Кайнозой Сахалина и его нефтегазоносность / Ю.Б. Гладенков, О.К. Баженова, В.И. Гречин и др. М.: ГЕОС, 2002. 225 с.
 20. Каракин А.В., Каракин С.А., Камбарова Г.Н. Геолого-геофизический анализ регионов грязевого вулканизма // Физика Земли. 2001. № 8. С. 76–85.
 21. Косыгин В.Ю., Исаев В.И. О построении региональных плотностных моделей // Тихоокеан. геология. 1985. № 2. С. 113–116.
 22. Логачев А.А., Захаров В.П. Магниторазведка. Изд. 4-е, перераб. и доп. Л.: Недра, 1973. 352 с.
 23. Мавринский Ю.С., Уткина А.И. О метаморфизме органического вещества верхнемеловых, палеогеновых и неогеновых отложений Южного Сахалина // Изв. Сахалин. от-дела географ. об-ва СССР. Южно-Сахалинск, 1971. Вып. 2. С. 152–159.
 24. Мельников О.А., Ильев А.Я. О новых проявлениях грязевого вулканизма на Сахалине // Тихоокеан. геология. 1989. № 3. С. 42–49.
 25. Мельников О.А., Сабиров Р.Н. Новые данные о современном состоянии и былой активности Южно-Сахалинского газоводогрязевого вулкана (о. Сахалин) // Тихоокеан. геология. 1999. Т. 18, № 3. С. 37–46.
 26. Мельников О.А. Тымь-Поронайский (Центрально-Сахалинский) взбросо-надвиг – основной сейсмогенерирующий разлом Сахалина. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2000. 67 с.
 27. Мельников О.А. Южно-Сахалинский газоводолитокластитовый (“грязевой”) вулкан – уникальный объект Природы на Дальнем Востоке / Путеводитель экскурсии на вулкан для участников междунар. науч. симпоз. 24–28 сентября 2002 г.). Южно-Сахалинск: ИМГиГ СахНЦ ДВО РАН, 2002. 48 с.
 28. Мельников О.А. Дислокации и сейсмичность южной части зоны Тымь-Поронайского взбросо-надвига // Тектоника, геодинамика, магматизм, металлогения и сейсмичность Тихоокеанского сегмента Земли. Южно-Сахалинск, 2002. С. 50–58.
 29. Опорный разрез меловых отложений Сахалина (Найбинский разрез). Л.: Наука, 1987. 196 с.
 30. Особенности строения верхнемелового комплекса Пугачевского грязевого вулкана по геофизическим данным / О.В. Веселов, П.Ф. Волгин, Л.М. Лютая, В.А. Паровышний // Геодинамика, геология и нефтегазоносность осадочных бассейнов Дальнего Востока России: Докл. междунар. науч. симпоз. Южно-Сахалинск, 24–25 сентября 2002 г. Южно-Сахалинск, 2004. С.145–156.
 31. Рахманов Р.Ф. Грязевые вулканы и их значение в прогнозировании газоносности недр. М.: Недра, 1987. 174 с.
 32. Рождественский В.С., Сапрыгин С.М. О гидротермальных проявлениях о. Сахалин, связанных с грязевым вулканизмом и газонефтеносностью // Вопросы геологии Сахалина и Курильских островов. Владивосток, 1974. С. 227–234.
 33. Сапрыгин С.М. Тектоническая флюидодинамика. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. 80 с.
 34. Сеначин В.Н. Методика регионального гравитационного моделирования. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1992. 62 с.
 35. Сырык И.М. Нефтегазоносность восточных склонов Запдно-Сахалинских гор. М.: Наука, 1968. 248 с.
 36. Сырык И.М. Грязевые вулканы. Геология СССР. Т. 33. М., 1970. № 7. С. 355–368.
 37. Сырык И.М., Федорченко В.И. Извержение Пугачевского вулкана на Сахалине осенью 1961 г. // Труды СахКНИИ СО АН СССР. Вып. 12. Геология и геофизика. Южно-Сахалинск, 1962. С. 103–113.
 38. Смехов Е.М. Грязевые вулканы острова Сахалина // Изв. Всесоюз. географ. об-ва. 1947. Т. 79. Вып. 4. С. 493–495.
 39. Смехов Е.М. Геологическое строение острова Сахалина и его нефтегазоносность. М., Л.: Гостоптехиздат, 1953. 322 с.
 40. Фролов Н.М. Температурный режим гелиотермозоны. М.: Недра, 1966. 156 с.

41. Чернышевская З.А. О грязевых вулканах в южной части Сахалина // Сообщ. СахКНИИ СО АН СССР. Южно-Сахалинск, 1958. Вып. 6. С. 118–130.
42. Эпицентральные наблюдения роя ощутимых землетрясений 2001 года на юге острова Сахалин / А.И. Иващенко, Ким Чун Ун, Л.Н. Поплавская и др. Инструментальные и микросейсмические данные // Динамика очаговых зон и прогнозирование сильных землетрясений северо-запада Тихого океана. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2001. Т. 1. С. 161–193.

O.V. Veselov, P.F. Volgin, L.M. Lyutaya

**Sedimentary cover structure of the Pugachevo mud volcano area (Sakhalin)
from geophysical modelling**

The geological-geophysical data on the group of the Pugachevo mud volcano area which lie in the zone of the submeridional Central Sakhalin fault (CSF) are analyzed. Results of geodensity and geothermal modeling from two orthogonal profiles passing through the central part of the Pugachevo area are examined. In the Late Cretaceous section of this area confined to the fault zone, a subvertical, narrow, abnormally deconsolidated cone-shaped zone extending from 1 km on the surface up to almost 4 km at its base (at the depths of more than 6 km), was distinguished. The density of deconsolidation blocks is 2.20–2.22 g/cm³, whereas in the adjacent blocks it reaches about 2.4–2.5 g/cm³. The largest deconsolidation block is located in the Aiskaya form-n (K_{1-2as}), where a vast reservoir zone containing mainly hydrocarbon gas (HC) should be expected at depths deeper than 4400 m at temperatures more than 140°C. Modeling results showed that the main reservoir of gases periodically ejected by the Pugachevo mud volcano was in the tectonically fault zone of CSF at the depth of 4.5–5.6 km in the Aiskaya. Above are smaller intermediate reservoirs. The Pugachevo area is perspective for commercial hydrocarbon occurrences.

Key words: Late Cretaceous deposits, density and temperature models, deconsolidation zone, reservoir, hydrocarbons, Pugachevo mud volcano, Sakhalin Island.

СТРОЕНИЕ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА ПУГАЧЕВСКОГО ГРЯЗЕВУЛКАНИЧЕСКОГО РАЙОНА (о. САХАЛИН) ПО ДАННЫМ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

О.В. Веселов, П.Ф. Волгин, Л.М. Лютая

*ФГБУН Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки 1Б, 693022;
e-mail: veselov@imgg.ru*

Поступила в редакцию 26 марта 2012 г.

Анализируется геолого-геофизическая информация о Пугачевской группе грязевых вулканов, расположенных в зоне субмеридионального Центрально-Сахалинского разлома (ЦСР). Рассматриваются результаты геоплотностного и геотермического моделирования по двум пересекающимся профилям, проходящим через центральный участок Пугачевской площади. В разрезе поздне меловых отложений этой площади, приуроченной к разломной зоне, выделена субвертикальная узкая аномально разуплотненная зона конусообразной формы, которая расширяется от 1 км на поверхности до 4 км в ее основании на глубинах более 6 км. Плотность блоков разуплотнения – 2.20–2.22 г/см³, тогда как в смежных блоках она достигает 2.4–2.5 г/см³. Наиболее объемный блок разуплотнения расположен в нижнемеловой айской свите, где на глубинах ниже 4400 м при температурах более 140°C следует ожидать наличия обширной зоны коллекторов, вмещающей в основном углеводородный газ (УВ). Результаты моделирования показали, что основной резервуар газов, периодически выбрасываемых Пугачевским грязевым вулканом, находится в тектонически ослабленной разломной зоне ЦСР на глубинах 4.5–5.6 км в толще айской свиты. Выше располагаются менее крупные промежуточные резервуары. Пугачевская площадь перспективна на содержание промышленных залежей углеводородов.

Ключевые слова: раннемеловые свиты, плотностные и температурные модели, зона разуплотнения, коллектор, углеводороды, Пугачевский грязевой вулкан, о. Сахалин.

ВВЕДЕНИЕ

Грязевой вулканизм представляет собой уникальное геологическое явление, распространенное во многих районах позднеальпийского тектогенеза. Все исследователи грязевого вулканизма сходятся в том, что он является индикатором наличия в недрах залежей нефти и газа и подготовки процессов землетрясений. В связи с этим выяснение особенностей строения грязевулканических районов и грязевулканических построек, в частности, а также изучение механизма формирования и активизации грязевых вулканов до сегодняшнего дня является весьма актуальным направлением исследовательских работ во многих регионах мира [10, 20, 31, 39]. В этом плане не является исключением и о. Сахалин, где известны четыре района грязевого вулканизма [24, 27, 32, 33, 35, 36, 38]. Один из них находится на севере острова (Дагинские грязевые вулканчики), а три других располагаются на его юге (Пугачевский, Южно-Сахалинский и Лес-

новский). Самыми крупными из них и наиболее изученными являются Пугачевский и Южно-Сахалинский. Их исследование началось в 20-е годы прошлого века японскими геологами Ф.Сайто и М.Уэда, а затем было продолжено целым рядом специалистов [6, 7, 16, 24–26, 37, 41]. Активно изучаются они и в настоящее время [1, 12–14, 27, 30], причем, в итоге последних исследований была установлена непосредственная связь их деятельности с сейсмичностью, определяемой активным протеканием в земной коре геодинамических процессов [11, 15, 28, 42].

Выяснение деталей геологического строения районов сахалинских грязевых вулканов, установление местоположения сейсмоактивных зон, оценка перспектив нефтегазоносности районов их размещения могут быть получены путем геофизического моделирования разреза земной коры района вулканов в температурном и геоплотностном вариантах. Оба варианта предполагают использование как можно

большого объема геолого-геофизической информации с тем, чтобы снизить неоднозначность получаемых решений и сделанных выводов. С этой точки зрения наиболее представительным является район Пугачевского грязевого вулкана, где выполнен большой комплекс детальных геолого-геофизических работ, проведены структурно-поисковые, параметрическое бурение и проведены температурные измерения. При бурении этих скважин отмечались многочисленные выбросы глинистого раствора и газопроявления. Отобранные при этом газы состояли в основном из метана и углекислоты. Лабораторными определениями было выяснено, что они имеют нефтяную природу, сходны по компонентному составу с газами грязевых вулканов нефтяных районов Азербайджана, Кубани и Керченского полуострова. Совпадают по компонентному составу газы Пугачевского вулкана и с газами нефтяных месторождений Северного Сахалина [35, 36]. Еще И.М. Губкин писал, что диапировая структура, нефтегазовое месторождение и грязевой вулканизм являются триединой сутью процесса геологического развития области образования грязевых вулканов [10]. Последнее обстоятельство вполне определенно указывает на большую вероятность нахождения в осадочных отложениях в области Пугачевского вулкана залежей углеводородов.

Указанные соображения дают полное основание считать, что район Пугачевского грязевого вулкана, являясь одним из уникальных явлений на Дальнем Востоке России, был и остается объектом необходимых специальных исследований, результаты одного из возможных направлений которых приведены в настоящей работе.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Пугачевский грязевой вулкан находится в главном поле выхода на дневную поверхность меловых пород Сахалина [29, 36]. В районе его грязевулканического поля они образуют мощную толщу (порядка 4–5 км), подразделяемую сверху вниз на красноярковскую (K_2kr), быковскую (K_2bk) свиты и верхнюю часть найбинской (K_2nb_2) и айскую свиты. Первая из них, верхняя, сложена песчаниками, а в двух нижележащих преобладают аргиллиты и алевролиты, но в найбинской свите заметную долю составляют песчаники [29].

Поздне меловая толща разреза согласно подстилается отложениями раннемелового возраста, состоящими из нижней подсвиты найбинской свиты (K_1nb) и айской свиты (K_1as). Эти отложения представлены переслаиванием алевролитов, песчаников и аргиллитов. Породы в средней и нижней подсвитах быковской свиты характеризуются повышенной пористостью (до

18 %) [29]. Геохимические анализы позволяют отнести отложения поздне меловых свит к потенциально нефтегазоматеринским. Содержание органического вещества (ОВ), рассеянного в породах, колеблется в пределах 1.5–2.2 %. В породах верхней подсвиты быковской свиты содержание хлороформенного битумоида (ХБ) достигает 0.012 %, несколько ниже содержание ХБ в породах айской свиты (K_1as) и нижней части найбинской свиты (0.007–0.009 %). Меньше всего ХБ (0.002–0.003 %) в отложениях быковской и красноярковской свит [29]. Содержание спиртобензольного битумоида (СББ) в породах меловых отложений колеблется в пределах 0.003–0.009 % [29], максимальное (до 0.0037 %) – в пачках красноярковской свиты. Согласно геохимическим данным, тонкообломочные породы позднего мела в средней части Сахалина относятся к нефтегазоматеринским свитам среднего качества, генерационный потенциал которых в значительной степени реализован [19]. При этом нижние толщи поздне мелового комплекса соответствуют нижней катагенетической зоне метанообразования. Степень углефикации растительных останков соответствует газовым маркам углей [23]. Поэтому, судя по катагенетической преобразованности ОВ пород, поздне меловые отложения Пугачевского района могут содержать, главным образом, газовые залежи.

Поскольку вся толща быковской свиты является хорошей экранирующей покрывкой, то нижележащую найбинскую свиту можно признать в силу ее углеводородного потенциала газогенерирующей и газоаккумулирующей.

Наличие в отложениях айской свиты алевролитоподобных коллекторов позволяет отнести свиту к нефтегазоматеринскому и, возможно, газоаккумулирующему резервуарному комплексу [35].

По результатам параметрического бурения было выяснено, что здесь вскрытая мощность нижней части быковской свиты образована в результате пологого надвига пластичных чешуй отложений свиты друг на друга под воздействием мощного горизонтального сжатия.

Судя по материалам геологической съемки, структурная позиция Пугачевского грязевого вулкана определяется его приуроченностью к одноименной антиклинальной складке, которую можно рассматривать как диапировую структуру, входящую в состав упорядоченной структурной зоны, являющейся звеном плиоцен-четвертичного Центрально-Сахалинского разлома. Этот разлом представляет собой регионально выраженную взбросо-надвиговую тектоническую структуру субмеридионального простираения [26], сопровождаемую

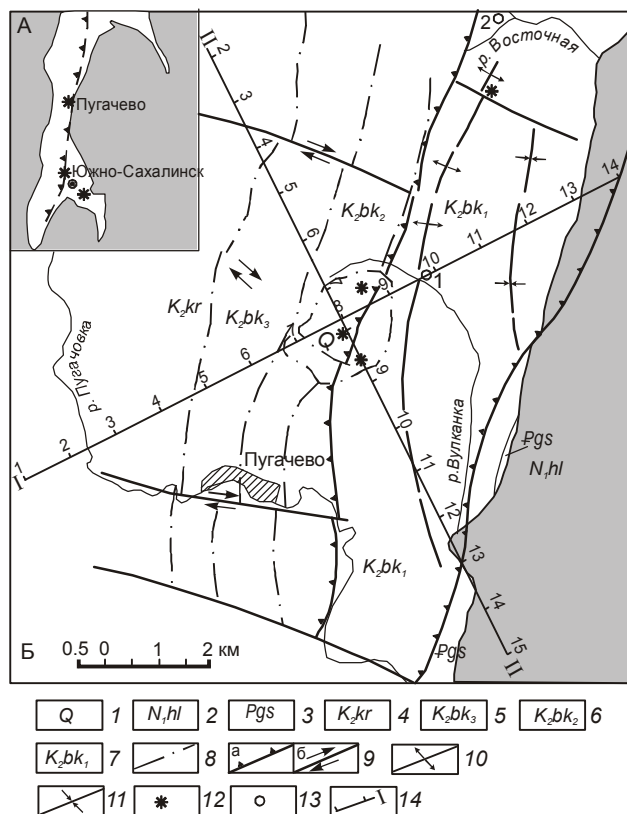


Рис. 1. А – обзорная схема Южного Сахалина (звездочки – грязевые вулканы Лесновский, Южно-Сахалинский, Пугачевский). Б – геологическая карта Пугачевской площади.

1–7 – разновозрастные отложения: 1 – четвертичные (Q); 2 – холмская свита (N_{1hl}); 3 – гастелловская свита (Pgs); 4 – красноярковская свита (K_{2kr}); 5–7 – подсвиты быковской свиты (K_{2bk}₁₋₃); 8 – стратиграфические границы; 9 – разрывные нарушения: а – надвиги, б – сдвиги; 10 – шарнир Пугачевской антиклинали; 11 – шарнир Восточной синклинали; 12 – грифоны грязевого вулкана; 13 – пробуренные глубокие скважины; 14 – линии интерпретационных профилей.

системой менее крупных разрывов самой разнообразной ориентировки (рис. 1).

О сложности геологического строения Пугачевской площади свидетельствуют также материалы сейсморазведки МОГТ, которой удалось осветить ее геологический разрез лишь до 1.5–2.0 км. На временных разрезах прослежена только одна отражающая граница, вероятно находящаяся внутри нижнебыковской подсвиты. Этот условный сейсмический горизонт послужил основой для составления структурной схемы Пугачевской площади в общих чертах.

Согласно этой схеме, Пугачевская группа вулканов находится в теле субмеридионально протяженной антиклинальной складки высотой около 300 м. Восточный и северный борта складки пологие. С запада она ограничена субмеридиональным разрыв-

ным нарушением, известным как Пугачевский взбросо-надвиг. По этому нарушению западное крыло складки надвинуто на ее свод. Разлом осложняется поперечными сдвигами, делящими складку на ряд самостоятельных блоков. Один из этих сдвигов ограничивает свод Пугачевской антиклинальной складки с юга. На восточном и северном бортах складки сопрягается с небольшими синклиналиями.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ

На Пугачевском грязевулканическом поле в течение нескольких лет проводился комплекс геофизических исследований, позволивший выявить глубинные особенности строения этого района и построить геофизическую модель осадочной толщи Пугачевского вулкана.

Аномальное гравитационное поле в редукции Буге района Пугачевского грязевого вулкана в целом является слабозмущенным и характеризуется положительными значениями, меняющимися в пределах первого-второго десятка миллигал (мГл). Лишь в его центральной части наблюдается интенсивная округлая локальная аномалия относительно пониженных значений поля интенсивностью около 10 мГл, которая практически оконтуривает грязевулканическое поле (рис. 2а). Эта аномалия является весьма контрастной и осложняет периферию зоны относительно пониженных значений поля северо-западной ориентировки, начинающейся на акватории залива Терпения. В целом морфологические особенности поля не согласуются с геологическим строением района, поэтому вполне естественно предположить, что они в значительной мере обусловлены наличием в разрезе земной коры существенных плотностных неоднородностей, искажающих влияние структурного фактора. Особенно контрастно такая неоднородность выделяется отмеченной локальной аномалией, приуроченной к своду Пугачевской антиклинали, где находится грязевой вулкан. Очевидно, что эта неоднородность, как и вся аномальная зона, к которой она принадлежит, связана с областью разуплотнения, возможно приуроченной к основному каналу поступления на поверхность материала сопочной брекчии.

Аномальное магнитное поле (ДТ) района Пугачевского грязевого вулкана (рис. 2б) в целом характеризуется пониженным уровнем, что определяется низкими магнитными свойствами пород осадочного комплекса позднемелового возраста. Породы айской, найбинской и быковской свит практически немагнитны. Значения магнитной восприимчивости не превышают $9.5 \cdot 10^{-6}$ – $13.5 \cdot 10^{-6}$ ед. CGSM. Более намагничен-

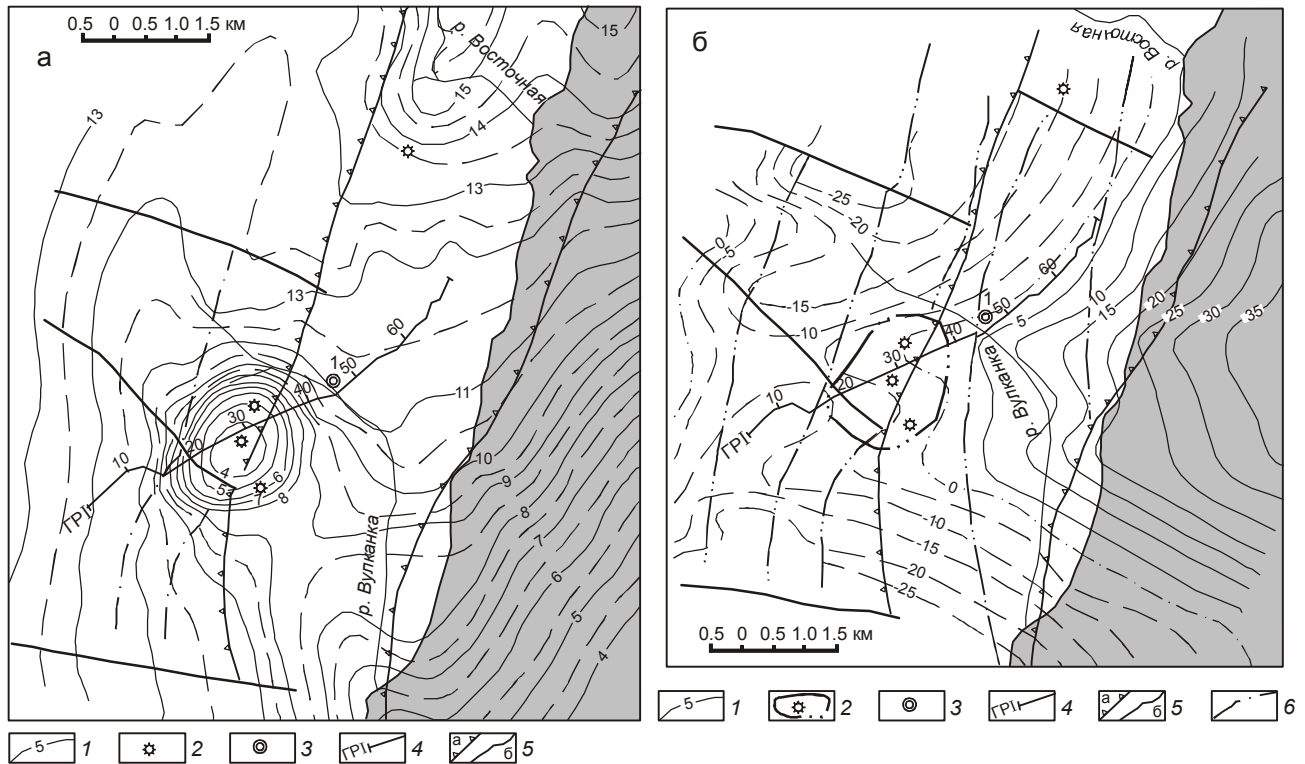


Рис. 2. Карта аномального гравитационного поля Пугачевской площади (в условном уровне) (а).

1 – изоаномалы (в мГл); 2 – грифоны грязевого вулкана; 3 – пробуренная параметрическая скважина; 4 – линия интерпретационного профиля; 5 – разрывные нарушения: а – надвиги, б – сдвиги.

Карта аномального магнитного поля (ΔT) (б).

1 – изодинамы (в нТл); 2 – грязевулканическое поле с грязевыми грифонами в нем; 3 – пробуренная параметрическая скважина; 4 – линия интерпретированного профиля; 5 – разрывные нарушения: а – надвиги, б – сдвиги; 6 – стратиграфические границы.

ными являются породы красноярковской свиты, магнитная восприимчивость которых равна в среднем $430 \cdot 10^{-6}$ ед. CGSM [5]. Не исключено, что низкий уровень магнитного поля определяется широким развитием в данном районе разрывных нарушений, обуславливающих образование зон дробления пород и тектонических брекчий. Ферромагнитные минералы здесь частично дезинтегрированы или приобрели хаотическую ориентировку, что существенно снижает намагниченность осадочных пород, как это обычно имеет место в других районах развития грязевого вулканизма [22]. Лишь на восточной стороне в центральной части района уровень поля повышен в связи с тем, что сюда протягивается магнитная аномалия, находящаяся в прибрежной части залива Терпения. Последняя предположительно связана с достаточно высокомагнитными слабо нарушенными эффузивными образованиями, известными как в поздне меловом, так и в его кайнозойском комплексах осадков. Однако заметно, что в районе грязевулканического поля периферия этой аномалии осложнена локальным минимумом, что может объясняться поступле-

нием на это место менее магнитных образований из более глубоких частей разреза, а также температурным фактором.

Тепловое поле района Пугачевского грязевого вулкана характеризуется несколько повышенным уровнем относительно его средних значений для Южного Сахалина [3, 30]. Проведенными расчетами выяснено, что здесь суммарный приповерхностный тепловой поток оценивается величиной около 52 мВт/м^2 , что характерно для зоны Центрально-Сахалинского разлома и несколько выше, чем в близлежащих районах юга Сахалина. Полученные геотемпературные данные свидетельствуют о существенно большем прогреве привулканической части разреза осадков по сравнению с таковыми на поверхности смежных участков. Так, приповерхностная температура почвы вблизи жерла превышает среднегодовую вне вулканического поля на $8\text{--}18^\circ\text{C}$ в периоды межпароксизмальной деятельности вулкана. Кроме того, выяснено, что в поисковых скважинах Пугачевской площади на глубине 500 м зафиксированы температуры около 50°C , что на $16\text{--}17^\circ\text{C}$ превышает темпе-

ратуру на той же глубине в скважинах на близлежащих площадях разведочного бурения.

Следует отметить, что анализ эволюции теплового поля Охотоморско-Сахалинского региона приводит к выводу, что в раннепалеогеновый период тепловой поток в южной части Сахалина был на уровне 42 мВт/м². Разрез осадочной толщи характеризовался низким геотемпературным градиентом и поэтому породы на палеоглубинах 1.5–2 км при максимальном погружении позднемеловых толщ находились в температурном интервале 50–75°C. При позднеэоценовой инверсии осадочного комплекса и эрозии примерно полутораклометровой толщи на поверхность были выведены позднемеловые породы с температурами более высокими в сравнении с температурами осадочного чехла зал. Терпения на сопоставимых уровнях до глубины 1.5 км. Однако относительно спокойный тектонический режим района в позднем неогене-плиоцене привёл к стабилизации температурного режима осадочных комплексов, о чем свидетельствует прямолинейный характер термограмм скважин Южного Сахалина [3]. Выпуклый характер термограмм двух скважин Пугачевской площади в верхнем интервале свидетельствует об активном адвективном выносе тепла из нижележащих толщ.

ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для района Пугачевского грязевулканического месторождения было проведено геофизическое моделирование по двум ортогональным профилям, пересекающимся в его центральной зоне (рис.1). Интерпретационный профиль I, имеющий длину 17 км, пересекает район с юго-запада на северо-восток. Профиль II, такой же длины, пересекает район с северо-запада на юго-восток. Геологический разрез на обоих профилях состоит из шести слоев, априорно представляющих собой конкретные осадочно-стратиграфические комплексы пород. Первый, самый нижний слой разреза на профиле I отождествлен с толщей айской свиты мелового возраста, последующие четыре верхних слоя представлены породами найбинской, быковской, разделенной на два подслоя, и красноярковской свитами. Шестой, самый верхний слой, соответствует нерасчлененному комплексу осадков палеоген-неогенового возраста (рис. 3). Для всех слоев разреза характерна общая направленность их восстания от обоих концов профиля к его центру, где под грязевым вулканом с глубиной все более и более рельефно проявляется крупная антиклинальная структурная форма, которую следует рассматривать как диапировую складку. Как указывалось выше, совокупность всех слоев разреза представляет собой практически однородную в литологическом

отношении аргиллито-глинистую толщу. Лабораторными определениями установлено, что ее плотность со слабым градиентом возрастает сверху вниз от 2.35 г/см³. В связи с этим для последующих расчетов априорная (начальная) плотность слоев принималась с чисто условным разграничением, составляющим 0.05–0.10 г/м³. Исходя из этого плотность самого верхнего (шестого) слоя была принята равной 2.35 г/см³, а всех остальных нижележащих последовательно 2.40, 2.45, 2.50, 2.55 и 2.60 г/см³. Другой важной особенностью разреза является наличие в его центральной части двух крупных разрывных нарушений. Наибольшим из них является восточный, представляющий собой региональный Центрально-Сахалинский взбросо-надвиг. Его плоскость, выходя на поверхность почти вертикально, с глубиной выполаживается к западу почти до горизонтали. По ней все западные части слоев разреза надвинуты на их блоки, расположенные восточнее плоскости надвига. Второе разрывное нарушение представляет собой Пугачевский разлом, который входит в состав западной части Центрально-Сахалинской разломной зоны. Его плоскость сместителя, так же как и предыдущего, являясь у поверхности субвертикальной, с глубиной сильно выполаживается и к началу профиля сливается с субгоризонтальной плоскостью сместителя Центрально-Сахалинского разлома. Несколько западнее Пугачевского разлома находится ответвляющийся от него разрыв небольшой амплитуды, определяемый по геолого-геофизическим данным как поперечный к Пугачевскому разлому сдвиг. Находящаяся здесь межразломная зона по всем слоям разреза сброшена относительно смежных участков. Она представляет собой тектонически ослабленную зону, само существование которой способствовало проявлению над ней на поверхности грязевого вулканизма.

Аномальное гравитационное поле вдоль линии профиля от его начала плавно понижается к его центральной части примерно на 6–7 мГл с градиентом около 1 мГл/км, где фиксируется локальный минимум интенсивностью более 10 мГл. Местоположение этого минимума практически точно совпадает с местонахождением грязевулканического поля Пугачевского вулкана. Восточнее аномалии гравитационная кривая по существу выполаживается до значения 9–10 мГл. Обращает на себя внимание явное несоответствие кривой гравитационного поля поведению геологических слоев. Так в западной половине профиля I имеет место снижение кривой, тогда как в этом направлении все геологические слои воздымаются к центральной части грязевого поля. Почти аналогичная картина отмечается и в западной части профиля II, где подъем геологических слоев сопровождается

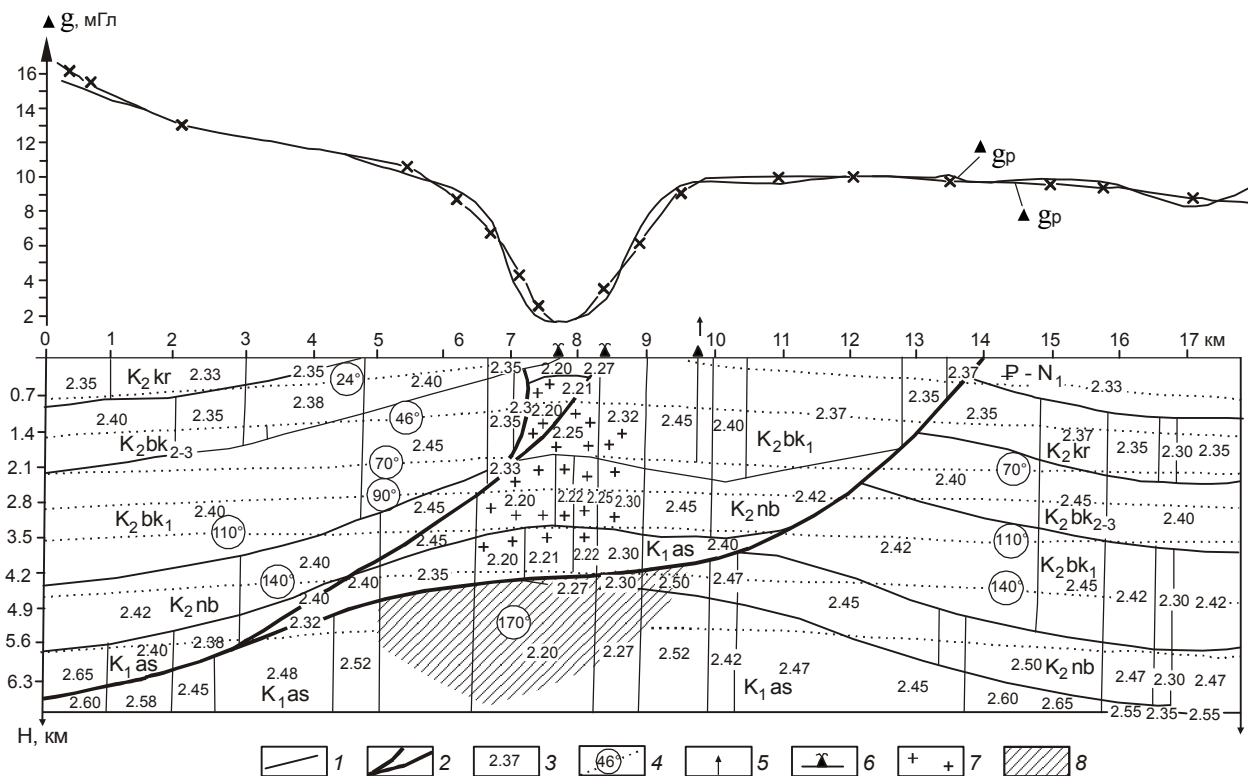


Рис. 3. Геолого-геофизический разрез по интерпретационному профилю I (юго-запад – северо-восток).

I – геологические границы и индексы стратиграфических подразделений осадочного чехла мелового: K₁as – айская, K₂nb – найбинская, K₂bk – быковская, K₂kr – красноярковская свиты, P-N₁ – отложения кайнозойского возраста; 2 – надвиги; 3 – рассчитанные плотности (г/см³); 4 – изотермы (°C); 5 – пробуренная параметрическая скважина; 6 – грифоны грязевого вулкана; 7 – область нефтегазогенерации и нефтегазонакопления; 8 – область газогенерации и газонакопления.

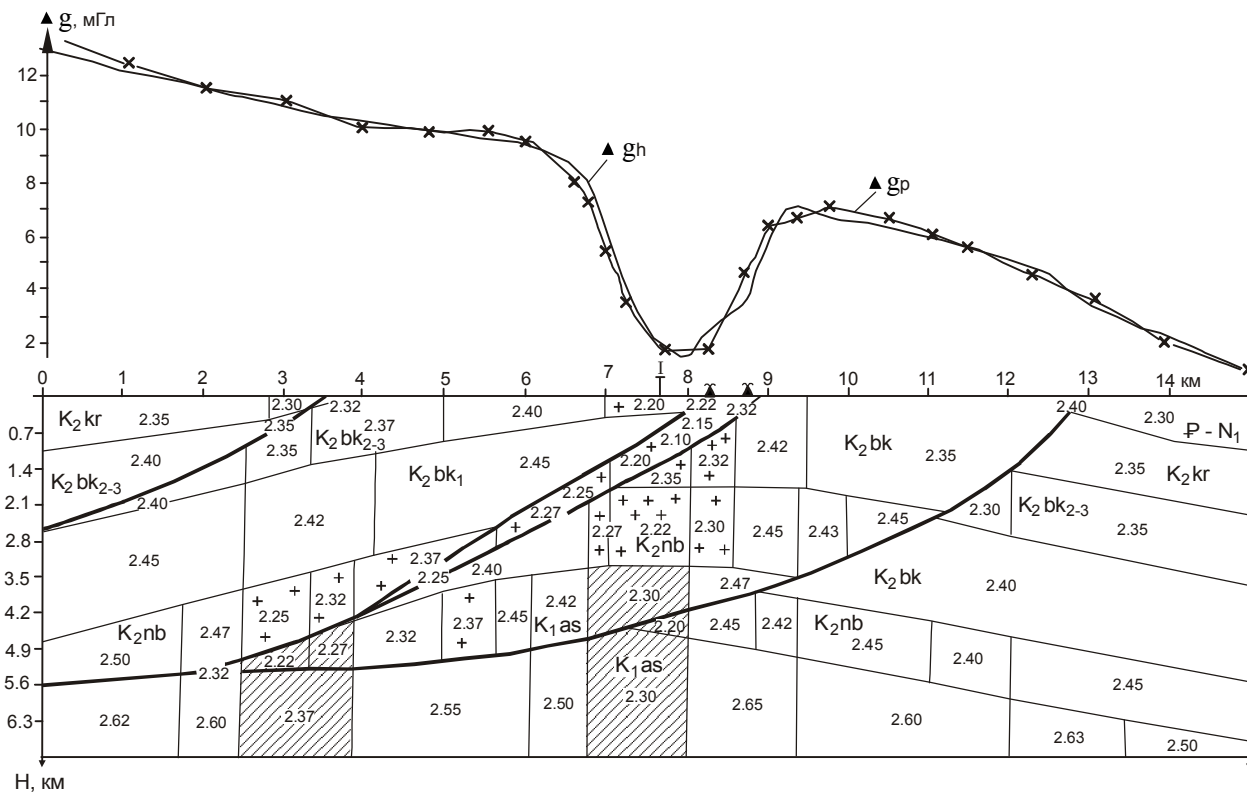


Рис. 4. Геолого-плотностной разрез по профилю II (северо-запад – юго-восток). Условные обозначения на рис. 3.

лишь выполаживанием гравитационной кривой. То есть налицо обратное соответствие гравитационного поля геологическому строению района Пугачевского грязевого вулкана, что вполне определенно указывает на существование здесь весьма значительных плотностных неоднородностей.

Аномальное магнитное поле (ΔT) вдоль линии профиля плавно снижается от его обоих краев к центру примерно на 25–30 нТл, причем наиболее низкий участок кривой находится в двух км западнее грязевого вулкана. В центре профиля наблюдается относительный максимум поля ΔT , осложненный в районе грязевулканического поля локальным минимумом. Аналогичная картина наблюдается при интерпретации гравитационного и магнитного полей вдоль профиля II (рис. 4).

Интерпретация геолого-геофизических материалов района Пугачевского грязевого вулкана осуществлялась в несколько этапов. Первый из них заключался в обобщении всех имеющихся на данный момент сведений о его геологическом строении. В результате оказалось возможным сконструировать по линии I-I, пересекающей грязевулканическое поле, геологический разрез, близкий к вероятному. Этот разрез лег в основу температурного и плотностного моделирования строения осадочного чехла района Пугачевского грязевого вулкана, осуществленного на следующем этапе интерпретации.

Температурное моделирование основывалось на анализе измерений температур в глубоких разведочных скважинах Сахалина. Для расчета температур по вертикальному разрезу осадочного чехла использовалось решение стационарного уравнения теплопроводности. Исходными данными являлись определения теплового потока, геотемпературного градиента и коэффициентов теплопроводности пород, полученные при геотермических исследованиях на Сахалине [3 и др.]. Тепловой поток вдоль профиля изменяется от 49 до 52 мВт/м², геотемпературный градиент – от 31 до 40°С/км, теплопроводность – в пределах 1.32–1.62 Вт/(м·К). Кроме того, были обработаны эпизодические измерения температуры на глубине 1.5 м, проведенные в межпароксизмальные периоды, и сделан расчет суммарного теплового потока в центральной части, чья конвективная составляющая вычислялась по формуле

$$Q_{\text{конв}} = 0.5 \sum h_i \frac{dT_i}{dz_i} m_i C_{pi},$$

где h_i – мощность i -го пласта в зоне конвективной передачи тепла (м); m_i – модуль стока в i -м пласте (кг/с·м²); C_{pi} – теплоемкость пород (Дж/кг·град); $\frac{dT_i}{dz_i}$ –

геотермический градиент в i -м пласте [40]. Модуль стока оценивался по формуле: $m_i = \frac{Q}{S_i}$, где Q – расход флюида, S_i – площадь истечения. Расчетные параметры даны в следующем виде: $h_i = 1900$ м; grad T = $31.2 \cdot 10^{-3}$ град/м; $q_{\text{конв}} = 30$ мВт/м², $C_p = 975$ Дж/кг·град (для аргиллито-алевролитовой толщи).

Параллельно с температурными исследованиями осуществлялось моделирование плотностной структуры этого же разреза по методике гравитационного моделирования. Это моделирование предполагает путем решения обратной линейной задачи гравиметрии выделение в разрезе осадочных слоев интервалов с относительно повышенной и пониженной плотностью. Общей задачей этого моделирования являлось установление на данном участке геологического пространства распределения плотности, с достаточной степенью надежности отвечающего ее реальному распределению. В основу данного вида моделирования был положен известный алгоритм В.И. Старостенко, реализованный в программе В.И. Исаева [17, 21], предназначенной для расчета двухмерных плотностных моделей, позволяющей решать обратную задачу гравиметрии в линейной постановке. В 1992 г. В.Н. Сеначиным была усовершенствована эта программа, что позволило решать обратную задачу с блоками трапецевидной формы (путем объединения группы блоков в единое геологическое тело) [4, 34].

В самом общем виде методика гравитационного моделирования сводится к расчету гравитационного поля от априорной плотностной модели, представленной серией слоев с фиксированной плотностью, блоками правильной геометрической формы (трапеция) с вертикальными боковыми сторонами, и установлению его адекватности наблюдаемому. В случае их несоответствия друг другу путем расчета плотностного разреза, представленного в виде систем линейных уравнений, решается обратная задача гравиметрии. Рассчитанная таким образом плотностная модель анализируется по ряду признаков [17, 34].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

В результате обработки температурных измерений, выполненных вблизи жерла грязевого вулкана, было установлено, что модуль стока флюидов на участке его деятельности составляет $1-2.5 \cdot 10^{-6}$ кг/см², т.е. суточный вынос грязевой массы достигает четверти кг на одном квадратном метре. Сделанные одновременно расчеты показали, что здесь конвективная составляющая приповерхностного теплового потока составляет около 30 мВт/м². Температурным мо-

делированием, выполненным вдоль линии геологического разреза, было выяснено, что в интервале его глубин температура осадочных пород меняется от 19°C в приповерхностных слоях главного грифона до 170°C на глубине 5 км в самом первом слое. Результаты моделирования, представленные на рис. 3, позволяют утверждать, что на глубине 3300 м температура пород найбинской свиты достигает 110°C, следовательно, в толще, насыщенной аргиллитовой составляющей, возникают зоны вторичного разуплотнения. В этой толще следует предполагать наличие коллекторов, содержащих газожидкостную составляющую. Ниже, в пределах айской свиты на глубинах около 4400 м и глубже, где температура превышает 140°C, при наличии зоны разуплотнения, вероятно существование обширной коллекторной толщи, вмещающей высокую долю газовой составляющей глубинного флюида (более 10 % от общего объема газоводокластитовой массы).

Результаты плотностного моделирования геологического разреза приведены на том же рисунке. Их рассмотрение показывает, что здесь имеют место вариации плотности от одного его блока к другому, которые формируют в разрезе вертикальные локальные плотностные аномалии определенного знака. Особенно контрастная аномалия находится под грязевым вулканом. Здесь во всем интервале разреза вычисленная плотность слагающих слоёв блоков составляет всего 2.2–2.3 г/см³, тогда как смежные с ними блоки слоев имеют плотность 2.45 г/см³ и выше. Форма этой аномалии близка к конусообразной и, по-видимому, отражает реалии глубинного строения Пугачевского грязевого вулкана, заключающегося в существовании здесь во всем осадочном разрезе субвертикальной, тектонически ослабленной, трещиноватой, разуплотненной зоны. Что касается смежных с указанной аномальной зоной относительно уплотненных блоков разреза, то они, очевидно, отвечают локальным участкам больших динамических напряжений, что подтверждается очень сложными условиями проходки параметрической скважины № 1, пробуренной в одном из них. Другая важная особенность плотностного разреза состоит в том, что к плоскостям надвигов прилегают относительно разуплотненные блоки разреза. Предполагается, что они трассируют собой высокопроницаемую зону интенсивного дробления и тектонической трещиноватости, сопровождающую плоскости скольжения надвигов.

Основные особенности плотностного разреза заключаются в следующем:

- осадочная толща, выполняющая геологический разрез площади, в целом является достаточно

однородной по плотности, которая со слабым градиентом монотонно возрастает сверху вниз от 2.35 до 2.60 г/см³;

- вариации плотности во всех слоях разреза, за исключением аномальных участков, незначительны и не превышают первых единиц сотых граммов в см³;

- плоскости надвигов трассируются относительно разуплотненными блоками разреза, плотность которых соразмерна и иногда даже меньше плотности блоков вышележащих слоев;

- под грязевым вулканом во всех слоях разреза имеют место контрастно выраженные, разуплотненные до 2.20–2.27 г/см³ блоки, в совокупности формирующие аномально низкую по плотности конусообразную структурную форму;

- по обе стороны от местоположения грязевого вулкана в разрезе отмечаются относительно уплотненные (до 2.45 г/см³) блоки, происхождение которых связывается с существованием здесь условий больших тангенциальных напряжений.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты геофизического моделирования разреза земной коры Пугачевского грязевулканического района по линиям 2-х профилей, проходящих через поле его деятельности, свидетельствуют о новизне полученной информации, которая освещает ранее не известные особенности ее глубинного строения, в целом, и тектонической постройки самого вулкана, в частности.

На основе сопоставления температур на одних и тех же глубинах в глубоких скважинах, пробуренных на Пугачевской и близлежащих к ней площадях, можно сделать следующий вывод. В пределах первой, в зоне Пугачевского вулканического центра, при истечении грязевых масс через толщу быковской свиты к поверхности происходит постоянный теплоперенос, приводящий к увеличению температуры в породах, вмещающих каналы конвективного течения флюидов. Наличие этого эффекта, а также сделанные оценки средней мощности интервалов разуплотнения, где происходит формирование грязевых масс, и данные расчетов модуля их стока на поверхность свидетельствуют о том, что Пугачевский грязевый вулкан представляет собой канал мощного выноса тепла из недр Земли, носителем которого являются глубинные флюиды. Проведенное по глубине разреза температурное моделирование позволяет утверждать, что в интервалах глубин залегания найбинской и айской свит следует ожидать наличие зон коллекторов, представляющих собой своеобразные резервуары флюидов, содержащих высокий процент

углеводородных компонентов. При этом предполагается, что в найбинской свите будет преобладать их газо-жидкостная составляющая, а в айской, в основном, газовая. Выявленное для разных интервалов глубин температурное распределение позволяет утверждать, что источником углеводородных газов Пугачевского грязевого вулкана являются отложения айской свиты. Вышележащий комплекс отложений найбинской и быковской свит также может являться нефтегазогенерирующим, но в нем должны преобладать его нефтегазоаккумулирующие возможности. Представление о глубинном источнике газов Пугачевского грязевого вулкана вполне согласуется с мнением некоторых исследователей [2, 8, 9] о том, что газы грязевых вулканов генерируются в осадочных толщах на глубинах порядка 5–6 км. Считается, что на меньших глубинах не существует термобарических условий для генерации газа в объемах, способных формировать энергетические ресурсы, обеспечивающих образование и деятельность грязевых вулканов.

Результаты плотностного моделирования свидетельствуют о наличии в части разреза, находящейся под грязевым вулканом, аномально разуплотненной зоны и ограничивающих ее достаточно узких интервалов относительного уплотнения. Выделенная на профиле I аномальная зона от поверхности до глубины 2000 м характеризуется конусообразной формой, где участки слоев верхней и нижней частей быковской свиты имеют плотность всего 2.2 г/см^3 , примерно соответствующую плотности истекающей из жерла вулкана грязи. С востока и запада этот локальный участок аномальной зоны ограничен плоскостями разрывов, за которыми находятся блоки, уплотненные до 2.35 г/см^3 . Ниже этой конусообразной, локально разуплотненной части аномальной зоны под плоскостью надвига находится значительно больший, почти квадратный блок, плотность которого такая же аномально низкая. Выполнен этот блок толщей найбинской свиты и верхним слоем айской свиты. По обе стороны от этого блока располагаются блоки плотностью от 2.30 до 2.45 г/см^3 . Снизу блок ограничен субгоризонтальной плоскостью Центрально-Сахалинского взбросо-надвига.

Под плоскостями надвига отмечается еще более обширная, разуплотненная до $2.2\text{--}2.25 \text{ г/см}^3$ часть разреза, представленная тремя блоками слоя айской свиты. В смежных с зоной разуплотнения блоках плотность значительно более высокая и составляет 2.52 г/см^3 . В целом, для всей толщи айской свиты характерно ее закономерное уплотнение к концам профиля, чего не наблюдается для всех слоев свит вышележащих верхнемеловых отложений.

Отмеченная особенность в распределении плотностных неоднородностей в разрезе земной коры под Пугачевским грязевым вулканом позволяет достаточно объективно обосновать модель его глубинного строения. Судя по всему, в общем виде вулканическая постройка имеет форму конуса, разделенного на три части. Самая верхняя из них, сложенная глинистыми слоями нижней части быковской свиты и частично слоем ее верхней части, представляет собой область размещения близповерхностных залежей газа, находящихся в изолированных друг от друга резервуарах, представляющих собой своеобразные газовые камеры. По-видимому, первая из них находится у самой поверхности, где фиксируется маломощная часть слоя верхней подсвиты быковской свиты. Еще одна залежь, скорее всего, находится на глубине порядка 2000 м (целиком в нижнем слое быковской свиты) в зоне пересечения линий субвертикального разрывного нарушения и надвига. Этому предположению вполне соответствуют расчеты В.Н. Горкуна [6, 37], согласно которым в канальной зоне Пугачевского вулкана предполагалось наличие двух газовых камер, ориентировочно находящихся одна на глубине 40 м, а вторая – в интервале 1900–2300 м. Вторая (центральная) часть вулканической структуры сложена слоем найбинской свиты и верхней частью айской свиты, прилегающей сверху к плоскости Центрально-Сахалинского взбросо-надвига. Здесь, как и в первом случае, предполагается существование высокопроницаемой зоны и весьма вероятное наличие в ее принадвиговой части еще нескольких газовых камер. Третья (самая нижняя) часть глубинной постройки вулкана находится под плоскостью надвига практически целиком в слое айской свиты. Обладая значительно большими размерами, по плотности она соизмерима с ее верхними частями и также должна представлять высокопроницаемую мощную зону развития трещинных коллекторов. По-видимому, здесь и находится основной резервуар, питающий через систему трещин, вплоть до поверхностного грязевулканического поля, всю вышерасположенную серию газовых камер.

В рамках этой модели предполагается, что в процессе тепловой конвекции с глубины залегания айской свиты по высокопроницаемым разрывным трещинным зонам происходит подъем материала сопочной брекчии с примесью УВ. По мере их поднятия и уменьшения литостатического давления выделяются газы и УВ, которые затем локализуются в залежи. При достаточном скоплении УВ создавшееся дополнительное напряжение приводит к активизации газовых камер и возобновлению процесса проникновения вторичных глинистых, насыщенных га-

зом, растворов в верхи разреза. Периодическое возобновление этого процесса приводит к образованию во всем аргиллито-глинистом разрезе цепочки газовых камер и, в конечном итоге, к периодической активности грязевого вулкана. Выделенные на основе гравитационного моделирования под грязевым вулканом зоны разуплотнения следует интерпретировать как пути восходящих потоков газонасыщенных флюидов и области размещения серии вторичных очагов грязеизвержений.

Итак, в глубинном разрезе Пугачевского вулкана выделяются несколько крупных аномальных зон. Первая сверху зона разуплотнения находится в толще быковской свиты, в интервале глубин 0.79–1.22 км, с температурами 46–60 °С, то есть породы находятся в стадии позднего диагенеза, характеризующегося активным выделением CO_2 и бикарбонатов. Вторая крупная зона разуплотнения располагается в найбинской свите, в интервале глубин 2.45–3.2 км, с температурами 90–105 °С, что соответствует поздней стадии протокатагенеза. Третья зона находится в интервале 3.5–4.8 км, охватывая нижнюю часть найбинской и верхнюю часть айской свит. Температурный интервал этой зоны – 115–140 °С, что соответствует оптимальной зоне нефтеобразования и нефтесохранения. Наиболее объемная зона разуплотнения в пределах рассматриваемого разреза охватывает блок пород айской свиты в интервале глубин 4.8–6.3 км. Эта зона целиком находится в области образования термогенного газа и его накопления. Интерпретация полученных данных свидетельствует о существовании в меловой толще осадков Пугачевского грязевулканического района многоэтажной системы зон разуплотнения. При этом наиболее объемной является зона разуплотнения в породах айской свиты, являющейся основным резервуаром накопления газовой смеси, поставляемой по глубинному разлому. Примером описанного типа строения грязевых вулканических районов могут являться Апшеронская и Шамахи-Гобустанские области Азербайджана. Поисково-разведочным бурением выяснено, что там в пластичных слоях глины и глинистые породы составляют от 50 до 90 процентов, при этом плотность осадочных глинистых слоев изменяется от 2.3 до 2.6 г/см³. В зонах регионального разуплотнения глинистая толща имеет меньшую, до 2.2 г/см³, плотность [18, 31]. Все это очень характерно и для осадочной толщи Пугачевской площади, причем, здесь последнее обстоятельство еще более выражено.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Температурным моделированием выяснено, что источником углеводородных газов Пугачевского

вулкана могут являться отложения айской свиты среднемелового возраста, а осадки вышележащей найбинской являются как нефтегазогенерирующими, так и нефтегазоаккумулирующими. Отложения быковской свиты, являясь региональной глинистой покровкой, могут быть и газоаккумулирующими. Основной причиной тепловой аномалии, связанной с Пугачевским грязевым вулканом, является теплоперенос в вязких аргиллито-глинистых слоях и вертикальная адвекция тепла по каналу вулкана.

Гравитационное моделирование также показало, что под жерлом вулкана во всей осадочной толще земной коры наблюдается аномально разуплотненная зона, которая интерпретируется как путь восходящего конвекционного потока газонасыщенных флюидов в глинистой среде и область размещения серии вторичных очагов грязеизвержений.

Представление о глубинном источнике газов Пугачевского вулкана согласуется с мнением многих исследователей [18, 31 и др.], что газы грязевых вулканов генерируются в осадочных толщах на глубинах порядка 5–6 км, где существуют термобарические условия для образования больших объемов газа.

Данные плотностного и геотемпературного моделирования Пугачевской группы вулканов можно применить как основу для оценки глубинного строения районов грязевого вулканизма на юге Сахалина и Хоккайдо.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аргентов В.В., Жигулев В.В., Патрикеев В.Н. Строение Южно-Сахалинского грязевого вулкана по сейсмическим данным // Строение земной коры и перспективы нефтегазоносности в регионах Северо-Западной окраины Тихого океана: Сб. статей. Южно-Сахалинск, 2000. Т. 2. С. 104–113.
2. Ахундов И.Д., Гусейнов М.А., Солодилов Л.Н. Механизм образования грязевых вулканов и основы мониторинга // Разведка и охрана недр. 2003. № 2. С. 26–28.
3. Веселов О.В., Соинов В.В. Тепловой поток Сахалина и Южных Курильских островов // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Т. IV. Структура и вещественный состав осадочного чехла Северо-Запада Тихого океана. Южно-Сахалинск, 1997. С. 153–176.
4. Волгин П.Ф., Исаев В.И., Косыгин В.Ю. Нефтегазоносность верхнемеловых отложений южной части Сахалина // Тихоокеан. геология. 2004. Т. 23, № 1. С. 61–76.
5. Геология, геодинамика и перспективы нефтегазоносности осадочных бассейнов Татарского пролива / А.Э. Жаров, Г.Л. Кириллова, Л.С. Маргулис и др. Владивосток: ДВО РАН, 2004. 220 с. (Серия "Осадочные бассейны Востока России" / Гл. ред. А.И. Ханчук).
6. Горкун В.Н., Сирый И.М. Опыт расчета глубины залегания и объема выбрасываемого газа при извержении грязевых вулканов на Южном Сахалине // Геология и геофизика. 1967. № 2. С. 30–41.
7. Горкун В.Н. Сравнение способов подсчета глубины залегания

- ния газов, питающих грязевые вулканы (на Южном Сахалине) // Вопросы геологии Сахалина и Курильских островов. Владивосток, 1974. С.295–302. (Тр. СахКНИИ; вып. 31).
8. Григорьянц Б.В., Гулиев И.С., Огаджанов В.А. Условия формирования плотностных неоднородностей и автономной складчатости // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1989. № 10. С. 121–125.
 9. Грязевой вулканизм Советского Союза и его связь с нефтегазоносностью / А.А. Якубов, Б.В. Григорьянц, Ад.А. Алиев и др. Баку: Изд-во “Элм”, 1980. 162 с.
 10. Губкин И.М. Учение о нефти. М., Л.: Изд-во ОНТИ НКТП СССР, 1937. 456 с.
 11. Динамика процессов дефлюидизации Центрально-Сахалинского глубинного разлома при сейсмической активизации (по результатам мониторинга Южно-Сахалинского грязевого вулкана в июле-августе 2001 г.) / А.С. Астахов, К.Ф. Сергеев, О.А. Мельников и др. // Докл. РАН. 2002. Т. 386, № 2. С.1–6.
 12. Ершов В.В., Мельников О.А. О необычном извержении Главного Пугачевского газоводолитокластитового (грязевого) вулкана на Сахалине зимой 2005г. // Тихоокеан. геология. 2007. Т. 26, № 4. С. 69–74.
 13. Ершов В.В., Доманский А.В., Левин Б.В. Моделирование температурного режима грифонов грязевого типа // Докл. РАН. 2010. Т. 435, № 3. С. 384–389.
 14. Ершов В.В., Шакиров Р.Б., Обжиров А.И. Изотопно-геохимические характеристики свободных газов Южно-Сахалинского грязевого вулкана и их связь с региональной сейсмичностью // Докл. РАН. 2011. Т. 440, № 2. С. 256–261.
 15. Землетрясение 4(5) августа 2006 г. на Сахалине / А.И. Иващенко, Р.Ф. Булгаков, Ким Чун Ун и др. // Проблемы геодинамики и прогноза землетрясений / I Российско-японский семинар, Хабаровск, 26-29 сентября 2000 г. Хабаровск, 2001. С. 109–125.
 16. Ильев А.Я., Сапрыгин С.М., Сырык И.М. Извержение Пугачевского грязевого вулкана в 1967 г. // Изв. Сахалин. отдела географ. об-ва СССР. 1970. № 1. С.92–99.
 17. Исаев В.И., Хвостовская Н.В. О реализации на ЕС ЭВМ метода математического программирования для решения обратной задачи гравиметрии в линейной постановке // Разведочная геофизика: теория, методика, результаты. Киев: Наук. думка, 1984. С.156–171.
 18. Кадиров Ф.А., Мухтаров А.Ш. Геофизические поля, глубинное строение и динамика грязевого вулкана Локбатан // Физика Земли. 2004. № 3. С.67–73.
 19. Кайнозой Сахалина и его нефтегазоносность / Ю.Б. Гладенков, О.К. Баженова, В.И. Гречин и др. М.: ГЕОС, 2002. 225 с.
 20. Каракин А.В., Каракин С.А., Камбарова Г.Н. Геолого-геофизический анализ регионов грязевого вулканизма // Физика Земли. 2001. № 8. С. 76–85.
 21. Косыгин В.Ю., Исаев В.И. О построении региональных плотностных моделей // Тихоокеан. геология. 1985. № 2. С. 113–116.
 22. Логачев А.А., Захаров В.П. Магниторазведка. Изд. 4-е, перераб. и доп. Л.: Недра, 1973. 352 с.
 23. Мавринский Ю.С., Уткина А.И. О метаморфизме органического вещества верхнемеловых, палеогеновых и неогеновых отложений Южного Сахалина // Изв. Сахалин. от-дела географ. об-ва СССР. Южно-Сахалинск, 1971. Вып. 2. С. 152–159.
 24. Мельников О.А., Ильев А.Я. О новых проявлениях грязевого вулканизма на Сахалине // Тихоокеан. геология. 1989. № 3. С. 42–49.
 25. Мельников О.А., Сабиров Р.Н. Новые данные о современном состоянии и былой активности Южно-Сахалинского газоводогрязевого вулкана (о. Сахалин) // Тихоокеан. геология. 1999. Т. 18, № 3. С. 37–46.
 26. Мельников О.А. Тымь-Поронайский (Центрально-Сахалинский) взбросо-надвиг – основной сейсмогенерирующий разлом Сахалина. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2000. 67 с.
 27. Мельников О.А. Южно-Сахалинский газоводолитокластитовый (“грязевой”) вулкан – уникальный объект Природы на Дальнем Востоке / Путеводитель экскурсии на вулкан для участников междунар. науч. симпоз. 24–28 сентября 2002 г.). Южно-Сахалинск: ИМГиГ СахНЦ ДВО РАН, 2002. 48 с.
 28. Мельников О.А. Дислокации и сейсмичность южной части зоны Тымь-Поронайского взбросо-надвига // Тектоника, геодинамика, магматизм, металлогения и сейсмичность Тихоокеанского сегмента Земли. Южно-Сахалинск, 2002. С. 50–58.
 29. Опорный разрез меловых отложений Сахалина (Найбинский разрез). Л.: Наука, 1987. 196 с.
 30. Особенности строения верхнемелового комплекса Пугачевского грязевого вулкана по геофизическим данным / О.В. Веселов, П.Ф. Волгин, Л.М. Лютая, В.А. Паровышний // Геодинамика, геология и нефтегазоносность осадочных бассейнов Дальнего Востока России: Докл. междунар. науч. симпоз. Южно-Сахалинск, 24–25 сентября 2002 г. Южно-Сахалинск, 2004. С.145–156.
 31. Рахманов Р.Ф. Грязевые вулканы и их значение в прогнозировании газоносности недр. М.: Недра, 1987. 174 с.
 32. Рождественский В.С., Сапрыгин С.М. О гидротермальных проявлениях о. Сахалин, связанных с грязевым вулканизмом и газонефтеносностью // Вопросы геологии Сахалина и Курильских островов. Владивосток, 1974. С. 227–234.
 33. Сапрыгин С.М. Тектоническая флюидодинамика. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. 80 с.
 34. Сеначин В.Н. Методика регионального гравитационного моделирования. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1992. 62 с.
 35. Сырык И.М. Нефтегазоносность восточных склонов Запдно-Сахалинских гор. М.: Наука, 1968. 248 с.
 36. Сырык И.М. Грязевые вулканы. Геология СССР. Т. 33. М., 1970. № 7. С. 355–368.
 37. Сырык И.М., Федорченко В.И. Извержение Пугачевского вулкана на Сахалине осенью 1961 г. // Труды СахКНИИ СО АН СССР. Вып. 12. Геология и геофизика. Южно-Сахалинск, 1962. С. 103–113.
 38. Смехов Е.М. Грязевые вулканы острова Сахалина // Изв. Всесоюз. географ. об-ва. 1947. Т. 79. Вып. 4. С. 493–495.
 39. Смехов Е.М. Геологическое строение острова Сахалина и его нефтегазоносность. М., Л.: Гостоптехиздат, 1953. 322 с.
 40. Фролов Н.М. Температурный режим гелиотермозоны. М.: Недра, 1966. 156 с.

41. Чернышевская З.А. О грязевых вулканах в южной части Сахалина // Сообщ. СахКНИИ СО АН СССР. Южно-Сахалинск, 1958. Вып. 6. С. 118–130.
42. Эпицентральные наблюдения роя ощутимых землетрясений 2001 года на юге острова Сахалин / А.И. Иващенко, Ким Чун Ун, Л.Н. Поплавская и др. Инструментальные и микросейсмические данные // Динамика очаговых зон и прогнозирование сильных землетрясений северо-запада Тихого океана. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2001. Т. 1. С. 161–193.

O.V. Veselov, P.F. Volgin, L.M. Lyutaya

**Sedimentary cover structure of the Pugachevo mud volcano area (Sakhalin)
from geophysical modelling**

The geological-geophysical data on the group of the Pugachevo mud volcano area which lie in the zone of the submeridional Central Sakhalin fault (CSF) are analyzed. Results of geodensity and geothermal modeling from two orthogonal profiles passing through the central part of the Pugachevo area are examined. In the Late Cretaceous section of this area confined to the fault zone, a subvertical, narrow, abnormally deconsolidated cone-shaped zone extending from 1 km on the surface up to almost 4 km at its base (at the depths of more than 6 km), was distinguished. The density of deconsolidation blocks is 2.20–2.22 g/cm³, whereas in the adjacent blocks it reaches about 2.4–2.5 g/cm³. The largest deconsolidation block is located in the Aiskaya form-n (K_{1-2as}), where a vast reservoir zone containing mainly hydrocarbon gas (HC) should be expected at depths deeper than 4400 m at temperatures more than 140°C. Modeling results showed that the main reservoir of gases periodically ejected by the Pugachevo mud volcano was in the tectonically fault zone of CSF at the depth of 4.5–5.6 km in the Aiskaya. Above are smaller intermediate reservoirs. The Pugachevo area is perspective for commercial hydrocarbon occurrences.

Key words: Late Cretaceous deposits, density and temperature models, deconsolidation zone, reservoir, hydrocarbons, Pugachevo mud volcano, Sakhalin Island.