

**ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НАД ГАЗОВОЙ ЗАЛЕЖЬЮ
(о. САХАЛИН)**

В.А. Паровышний, О.В. Веселов, В.Н. Сеначин, В.С. Кириенко
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск

Поступила в редакцию 15 июня 2006 г.

В работе рассматриваются результаты многократных геофизических наблюдений над Южно-Луговским месторождением газа (юг о. Сахалин), проведенных за период с 2003 по 2006 г. Показано, что газовая залежь является естественным индикатором геодинамических процессов, протекающих как в самой залежи, так и за ее пределами.

Используемый комплекс методов и методика наблюдений предлагаются для оценки степени продуктивности объектов, вводимых в поисковое бурение. Они являются основой для дальнейшей разработки способов краткосрочного прогноза сейсмических событий геофизическими методами, т.к. резкие изменения параметров геофизических полей над газосодержащей структурой возникают при прохождении сейсмического импульса, распространяющегося от внешнего источника.

Ключевые слова: гравиметрия, термометрия, магнитометрия, предвестники землетрясений, геодинамика, газовая залежь, поисковые признаки нефтегазовых месторождений, о. Сахалин.

ВВЕДЕНИЕ

В статье излагаются результаты первого этапа эксперимента, поставленного с целью выявления характера проявления геодинамических процессов в геофизических полях, определения генезиса этих процессов и, в конечном итоге, определения характера связи временных изменений геофизических полей с сейсмичностью, т.е. выявления предвестников сейсмических событий. В рамках решения этих же задач предполагалось получить надежные прогностические признаки нефтегазоносности, которые позволили бы оценить степень продуктивности поисковых объектов, расположенных в сложнопостроенных зонах региональных дизъюнктивов.

В качестве полигона для отработки методики исследований выбрано Южно-Луговское месторождение газа, расположенное в 4 км к западу от пос. Анива (рис. 1А).

Южно-Луговское месторождение, расположенное в зоне влияния Центрально-Сахалинского регионального разлома, приурочено к терригенным отложениям нижнемаруямской подсвиты миоцена ($N_{1,2} \text{ m}_1$), локализовано в одноименной структуре, плановое положение которой показано на рис 1Б. Структура представляет собой складку срыва (рис. 2), сформирован-

ную только в нижних секциях разреза нижнемаруямской подсвиты, с амплитудой несколько десятков метров, которая затухает вверх по разрезу [18].

Месторождение сосредоточено в 13 горизонтах песчаников, имеющих удовлетворительные коллекторские свойства. Газ (метан) содержится в горизонтах с III по XIII включительно. Промышленно газоносны горизонты с VII по XIII, основные запасы сосредоточены в нижнем горизонте XIII. Мощность газонасыщенной части разреза не превышает 50 м. Площадь структуры составляет около 2 км², нижний газо-водяной контакт расположен на отметке -1368 м, суммарные запасы не превышают 2 млрд. м³.

В стадии проектирования исследований предполагалось, что залежь, расположенная в зоне влияния активного разлома, должна изменять геодинамические характеристики (изменение уровня газо-водяного контакта, температуры, давления в залежи и, как следствие, изменение плотности газонасыщенной части разреза) при изменении термобарических условий в зоне разлома, известно что метан, характеризуется высоким коэффициентом сжимаемости, поэтому скорость перемещения газа как в поровых, так и в массивно-трещинных средах должна быть достаточно высока. Это, в свою очередь, должно вызвать над залежью достаточно быстрые изменения геофизи-

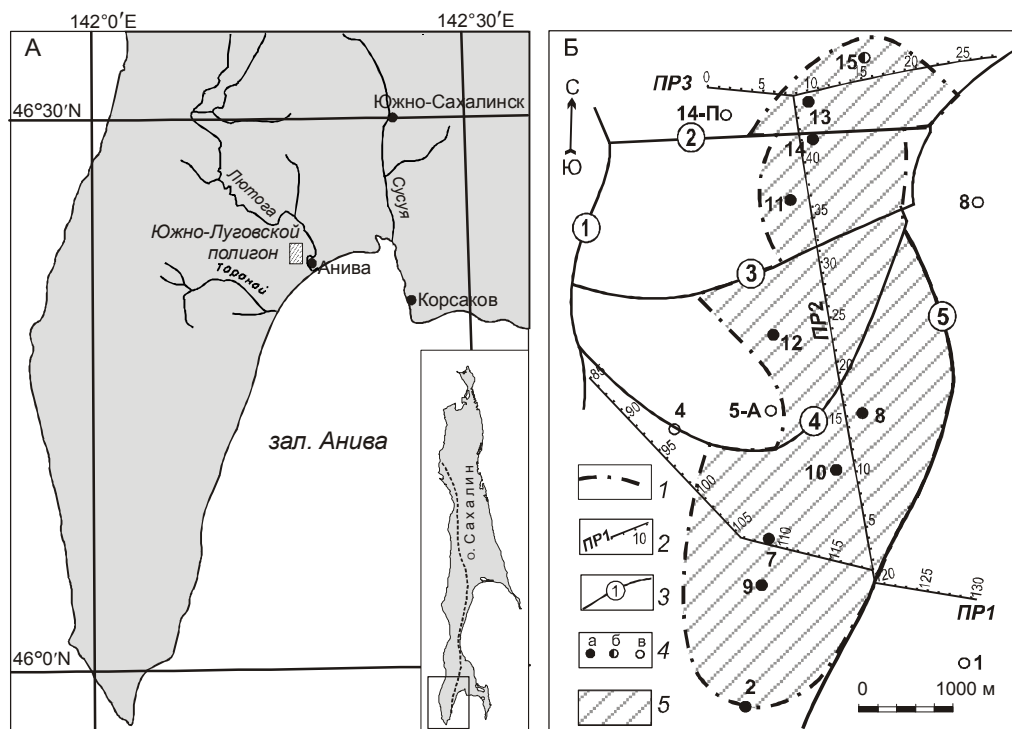


Рис. 1. Географическое расположение (А) и структурная схема (Б) Южно-Луговского геодинамического полигона на юге о.Сахалин (см.врезку на рис. 1А).

1 – контур газовой залежи, 2 – геофизические профили, 3 – основные разрывные нарушения по данным сейсморазведки и бурения, 4 – скважины: а – с промышленными притоками, б – с непромышленными притоками, в – непродуктивные, 5 – площадь залежи. На врезке рис.1А пунктирной линией показано положение Центрально-Сахалинского разлома

ческих полей, доступные регистрации в течение одного сезона.

В период производства наблюдений месторождение не эксплуатировалось. В связи с этим можно считать, что выявленные здесь эффекты временных изменений геофизических полей не связаны с техногенными причинами.

Для решения поставленных задач на Южно-Луговском полигоне выполнены высокоточные гравиметрические, термометрические и магнитометрические наблюдения по трем профилям, пересекающим все блоки залежи (рис. 1Б). Профили комплексных геофизических наблюдений совмещены с сейсмическими профилями, отработанными Сахалинской геофизической экспедицией в 1992 г. Полевые геофизические наблюдения выполнены в период с августа по ноябрь 2003 г. и с конца июля по октябрь 2004 г.

На Дальнем Востоке России работы такого плана проводятся впервые, в данной модификации имеют многоцелевое назначение и рассчитаны на долгосрочную перспективу. Полученные материалы интерпретации наблюдений представляют результаты первого этапа исследований.

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выполненные гравиметрические исследования следует отнести к разделу работ по изучению неприливных изменений силы тяжести, тесно свя-

занных с решением задач геодинамики. основополагающие исследования в этой области принадлежат сотрудникам Института физики Земли РАН и Института геологии и разработки горючих ископаемых (ИГиРГИ МПР) [1, 4–7]. Ими же были предприняты первые шаги по теоретическому обоснованию неприливных изменений силы тяжести, разработаны первые методики наблюдений, а также выполнен значительный объем полевых наблюдений. В результате исследований выявлен эффект неустойчивости гравитационного поля в зонах искусственных водохранилищ и в районах напряженного состояния земной коры. Установлено, что величина напряженности гравитационного поля зависит от уровня грунтовых вод [4], от высоты приливов в прибрежных районах и от других факторов, которые вызывают возмущения, достигающие по величине единиц и первых десятков микрогал (10^{-8} м/с²). Более значительные временные изменения гравитационного поля, достигающие величины десятых долей миллигал (10^{-5} м/с²), зафиксированы над крупными месторождениями углеводородов. При этом наиболее значительные величины неустойчивости отмечены над газовыми залежами. Таким образом, установлено, что величина временных изменений гравитационного поля над залежью находится в прямой зависимости от величины коэффициента сжимаемости флюида и его объема [5]. Последнее обстоятельство послужило основанием для разработки методик по-

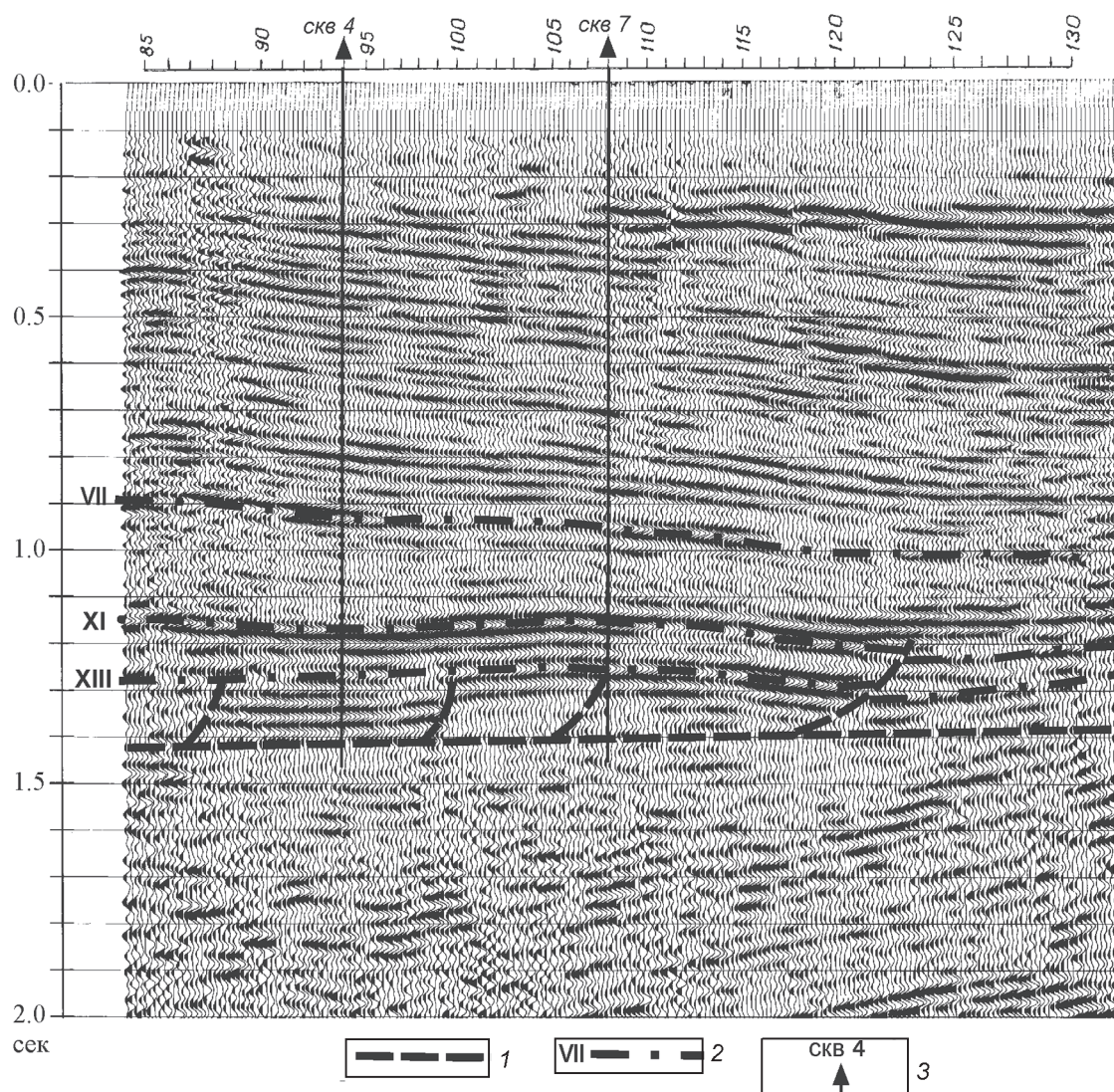


Рис. 2. Временной сейсмический разрез по профилю 920205Б в интерпретации авторов (совмещен с профилем 1 геофизического полигона, см. рис. 1Б).

1 – разрывные нарушения, 2 – продуктивные горизонты, 3 – поисковые скважины.

исков залежей углеводородов, основанных на выявлении эффекта нестабильности гравитационного поля во времени [5–7]. Известны факты успешного применения этих методик, в том числе и в комплексе с геохимическими методами [1].

В части применения гравиметрии для прогноза сейсмических событий известны единичные эксперименты. Так, Х.И. Амирхановым и С.С. Сардаровым (Институт геологии Дагестана) [2] проведен эксперимент по определению влияния близких землетрясений на изменение силы тяжести на стационарных гравиметрических пунктах.

По результатам приливных гравиметрических наблюдений ими установлено, что землетрясению

предшествуют три характерных периода искажения стандартных приливных волн:

– *первый* – начинает возрастать величина гравитационного поля по отношению к характерному для естественных приливно-отливных вариаций, зависящих от суточного вращения Земли;

– *второй* – достижение максимального значения ускорения силы тяжести, после которого начинается спад до устойчивых значений;

– *третий* – устойчивое поведение поля, которое не меняется в течение примерно 20 часов до сейсмического события.

Обнадеживающие результаты получены также в Институте геофизики Грузии [3], где отмечено изме-

нение амплитуд приливных волн при возникновении близких землетрясений.

Локальные геотермические аномалии над нефтяными и газовыми месторождениями установлены во всех регионах мира многочисленными исследованиями [13–16, 22].

Наблюдениями установлено, что величина локальных аномалий всегда выше над ловушками, заполненными углеводородами, чем над водосодержащими структурами.

На формирование геотермического режима залежей углеводородов значительно влияют конвективные процессы, протекающие внутри продуктивного пласта. Согласно расчетам Э.Б. Чекалюка [23], в сводовой части залежи углеводородов температуры выше, чем на нефте- и газодояных контактах, так как восходящий поток фокусируется, как правило, в центре залежи и замыкается физически на его периферии. Этот процесс особенно контрастно выражается в термическом поле.

Предполагается, что в зонах современной тектонической активности, к которым относится и зона Центрально-Сахалинского разлома, изменение геотемпературной аномалии происходит постоянно. Время существования залежи в данном случае существенного значения не имеет. При этом интенсивность тепломассопереноса флюидов под залежью и в ее контуре должна быть выше интенсивности процессов диссипации выносимой к поверхности энергии, что и приводит к формированию положительных температурных аномалий над залежью.

Перечисленные факторы формирования локальных температурных аномалий над залежами являются теоретической основой как для определения диагностических признаков обнаружения залежей углеводородов по температурному полю, так и для исследования геодинамического состояния недр в зонах глубинного тепломассопереноса.

К настоящему времени разработано большое количество малоуглубинных геотермических методов поисков углеводородных залежей. В их числе исследования на глубинах нейтрального слоя, т.е. условного диапазона глубин геологического разреза, ниже которого не фиксируется влияние суточных и сезонных температурных колебаний [8, 9, 12, 23].

Анализ переменного температурного поля в приповерхностном слое Земли показал, что при проведении одновременного (или в узком интервале времени) измерения температуры во всех точках заданного профиля температурными датчиками, внедренными на одинаковую глубину и в литологически

близкий по составу грунт, исключается влияние как солнечной радиации, так и всех периодических и сезонных колебаний приземного воздуха. На температурном профиле при такой съемке отображается влияние только особенностей глубинного теплового потока, не зависящего от времени года.

Анализ различных методик разноглубинных измерений температур показал, что оптимальная глубина погружения температурных датчиков составляет 1.5 м, так как на этой глубине отсутствует влияние суточных изменений температуры независимо от состава грунтов и, в то же время, облегчается процесс внедрения датчиков на заданную глубину.

Существование **геомагнитных аномалий** над залежами известно достаточно давно. Как правило, это положительные малоинтенсивные возмущения геомагнитного поля, доступные регистрации лишь наземными прецизионными наблюдениями. В настоящее время считается, что они обусловлены влиянием пластовых вод продуктивных горизонтов, которые всегда имеют значительно более высокую минерализацию, чем воды непродуктивных горизонтов. За счет некоторой подвижности законтурных высокоминерализованных вод, а также за счет содержания в залежи углеводородов таких химически активных компонентов, как CO , CO_2 , H_2S и других происходит формирование ореолов сульфидной и железокислой минерализации во вмещающих залежь породах. Предполагается, что именно эти ореолы находят отражение в геомагнитном поле в виде относительно положительных аномалий на фоне более низких значений поля, обусловленных, как правило, низкими значениями магнитной восприимчивости осадочных пород, вмещающих залежи углеводородов.

Сведения об исследовании особенностей временных изменений как геомагнитного, так и геотермального полей над флюидосодержащими геодинамическими системами отсутствуют.

Попытки проследить изменения геомагнитного поля в связи с сейсмическими событиями предпринимались во многих странах мира, в том числе и на геодинамических полигонах Средней Азии в СССР [24]. Здесь, на нескольких геодинамических полигонах (Ташкентском, Ферганском, Кызылкумском, Восточно-Ферганском) выполнены магнитометрические наблюдения методами повторных маршрутов и повторных площадных съемок. Стационарные магнитометрические наблюдения проводились на нескольких пунктах, включая эпицентры сильных землетрясений: Газлийского (1976 г.), Исфара-Баткенского (1977 г.), Таваксайского (1977 г.). За период исследований выделены медленные и быстрые изменения

геомагнитного поля, связанные с землетрясениями. Показано, что изменения геомагнитного поля, связанные с этапами подготовки землетрясений, имеют пьезомагнитную, электрокинетическую и электрическую природу. Отмечается перспективность развития данного направления исследований и в других регионах Земли [19].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Гравиметрия. Гравиметрические наблюдения выполнены двумя отечественными гравиметрами первого класса (ГНУ-КВ № 009 и № 535). Перед началом работ, в июле 2003 и июле 2004 гг., гравиметры эталонировались на Южно-Сахалинском государственном эталонировочном полигоне по полному циклу исследований, предусмотренному действующей «Инструкцией по гравиметрии». По данным эталонирования определены основные характеристики приборов: цена деления, зависимость цены деления от температуры, среднеквадратическая погрешность единичного наблюдения (она составила ± 0.02 мГал для каждого исследованного гравиметра), период времени линейного дрейфа 0-пункта (для каждого прибора не менее 3 часов при условии соблюдения температурного режима).

Все гравиметрические измерения проведены в пяти циклах по трем заранее подготовленным профилям с шагом наблюдений 50 и 100 м, с перерывом в каждом сезоне между циклами в один месяц. При этом четвертый и пятый циклы наблюдений (август и сентябрь 2004 г.) выполнены только по профилю 1, который был продлен на 700 м к северо-западу и на 600 м к востоку относительно положения профиля в 2003 г.

В каждом цикле задействовалось по два гравиметра одновременно. Таким образом, полная среднеквадратическая погрешность определения наблюдаемых значений на пунктах полигона в каждом цикле практически не превысила собственной погрешности используемых приборов (в цикле 1 – ± 0.018 мГал, в цикле 2 – ± 0.016 мГал, в цикле 3 – ± 0.022 мГал, в цикле 4 – ± 0.017 мГал, в цикле 5 – ± 0.019 мГал). Рядовые наблюдения в 2003 г. выполнены на 69 пунктах, общее количество измерений – 420. В 2004 г. выполнено 2 цикла наблюдений на 46 пунктах профиля 1 при общем числе измерений 278.

Опорная гравиметрическая сеть одноступенчатая, развивалась перед каждым циклом наблюдений в трех–четырёх независимых рейсах двумя приборами одновременно от одного исходного опорного пункта, расположенного на северо-западном конце профиля 1, заведомо удаленного от западной границы газовой залежи.

Пункты опорной сети располагались таким образом, чтобы обеспечить время наблюдений в рядовом звене гравиметрического рейса не более 30 минут. Среднеквадратическая погрешность определения наблюдаемых значений гравитационного поля (Δg_n) на опорной сети в каждом цикле наблюдений не превысила величины ± 9 мкГал.

Приведенные данные позволяют утверждать, что аномалии разностей наблюдаемого поля интенсивностью более 0.02 мГал следует считать достоверными.

Характеризуя точность определения наблюдаемых значений силы тяжести, следует добавить, что в начале октября 2004 г. были выполнены одновременные наблюдения на пяти опорных пунктах профиля 1 гравиметром Лакоста-Ромберга и гравиметрами, использованными ранее. Максимальное отклонение средних значений по измерениям гравиметрами ГНУ-КВ и значениями, полученными по результатам измерений гравиметром Лакоста-Ромберга, приняты как эталонные, составило 4 мкГал.

Все гравиметрические наблюдения выполнены в условном уровне без привязки к государственной опорной сети.

Термометрия. Термометрические наблюдения производились отечественными электротермометрами ТЭТ-2, запрессованными в алюминиевые трубки. Перед началом полевых работ, в лабораторных условиях, была произведена поверка температурных датчиков с помощью образцовых ртутных термометров ТР-1. Измерения производились в шпурах глубиной 1.5 м, совмещенных с пунктами гравиметрических наблюдений. Точность измерений $\pm 0.05^\circ\text{C}$. На Южно-Луговском полигоне в 2003 г. выполнено 3 полных цикла измерений, в 2004 г. выполнено 4 полных цикла на профиле 1. Все температурные измерения производились не менее, чем через 30 минут после погружения датчиков в шпуры. На всех пунктах наблюдений каждого профиля в текущем цикле измерения выполнялись в течение одного дня.

Магнитометрия. Магнитометрические наблюдения выполнены магнитометрами ММП-203 по однократной методике наблюдений на участках профилей Южно-Луговского полигона, свободных от техногенных загрязнений (профили 1 и 2), с одновременной регистрацией вариаций геомагнитного поля. Точность определения аномалий $\Delta T_a \pm 2$ нТл.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На всех трех профилях полигона зарегистрированы примерно схожие по характеристикам результаты изменения гравитационного и термального полей, позволяющие утверждать, что плановое положение

залежи уверенно определяется по характерному набору признаков. В связи с тем, что наибольший объем данных накоплен по профилю 1, которые наиболее представительно характеризуют изменение полей над залежью, в том числе и во время сейсмического события 13 сентября 2004 г., ниже рассматриваются именно эти материалы.

Временные изменения гравитационного поля.

По данным выполненных гравиметрических наблюдений, на Южно-Луговском месторождении вычислены разности наблюдаемых значений силы тяжести между циклами наблюдений. При этом, с целью прослеживания характера изменения гравитационного поля во времени, из значений каждого вновь выполненного цикла наблюдений последовательно вычитались значения предыдущих циклов.

Полученные результаты свидетельствуют, что в пределах контура залежи гравитационное поле нестабильно во времени. Разности наблюдаемых значений между циклами наблюдений достигают 0.12–0.15 мГал по всем трем профилям полигона. При этом отмечено, что распределение аномально высоких значений разностей в пределах контура залежи различно. Блоки залежи, ограниченные разрывными нарушениями по продуктивному горизонту XIII (рис. 2), выражены максимумами разностей Δg_n . Границы блоков характеризуются либо нулевыми значениями, либо локальными узкими экстремумами, либо сменой знаков разностей Δg_n (рис. 3). Так, на приведенных графиках распределения разностей Δg_n по профилю 1 отчетливо прослеживаются границы блоков залежи на пикетах 98–100, 108 и 120. Характер распределения разностей меняется именно на этих пикетах, на них же вертикально проецируются точки пересечения разрывными нарушениями горизонта XIII, кровля которого показана на временном сейсмическом разрезе 920205b (рис. 2), совмещенного с профилем 1. Эта же закономерность устойчиво прослеживается и на остальных профилях полигона.

На восточном фланге профиля 1 (пикеты 127–130) выявлена еще одна аномалия разностей, которая, вероятно, соответствует локальной залежи, открытой в 1971 г. скв. № 1 (рис. 3 Г). Скважина расположена в 300 м к югу от данного участка профиля. Восточное замыкание аномалии к настоящему времени не установлено.

Участки профилей, расположенные над непродуктивными блоками разреза, характеризуются разностями Δg_n , имеющими значения в пределах заданной точности наблюдений, и на этом основании к аномальным не относятся.

Для оценки достоверности выявленных гравитационных эффектов была решена прямая задача гравиметрии [18] в двухмерном варианте от идеализированной модели, в которой залежь высотой 50 м аппроксимирована прямоугольником, нижняя грань которого погружена на глубину 1370 м, длина соответствует участку пересечения залежи профилем 1.

Результаты вычислений показали, что при изменении плотности в блоке залежи на ± 0.05 г/см³ значения поля изменяются на ± 0.10 – 0.11 мГал. Такие же значения получены при вычислениях по способу А.И. Волгиной [5].

Полученные результаты гравиметрических наблюдений сводятся к следующему:

1. Наблюдениями установлено, что над газовой залежью гравитационное поле нестабильно во времени.

2. Временные вариации поля над залежью достигают величины 0.12±0.15 мГал.

3. Характер временных изменений гравитационного поля подчеркивает неоднородность залежи и может быть использован для оконтуривания блоков газонасыщенной структуры с индивидуальными геодинамическими параметрами.

Изменения температуры. Приступая к изложению результатов термометрических наблюдений на Южно-Луговском полигоне, необходимо отметить, что многолетними наблюдениями в данном регионе установлено постепенное сезонное понижение среднесуточных температур с конца августа до апреля в приповерхностном слое, включая и глубину 1.5 м, на которой производились настоящие измерения [20]. К этому периоду сезонных изменений температур приурочены температурные наблюдения на рассматриваемом полигоне в 2003 и в 2004 гг. Кривые температур, полученные в разных циклах по одним и тем же пунктам наблюдений, последовательно ниже по абсолютным значениям, но, в целом, сохраняют конфигурацию (рис. 4).

По результатам температурных наблюдений, выполненных в 2003 г., наметилась очевидная корреляционная связь относительных температурных максимумов с участками экстремальных значений разностей наблюдаемого гравитационного поля. Кроме того, установлено, что точкам смены характеристик гравитационного поля практически везде соответствуют участки узких локальных минимумов термального поля. При этом экстремальные точки температурных минимумов незначительно (на 1–2 шага наблюдений) смещены относительно пунктов, на которых значения разностей Δg_n близки к нулю.

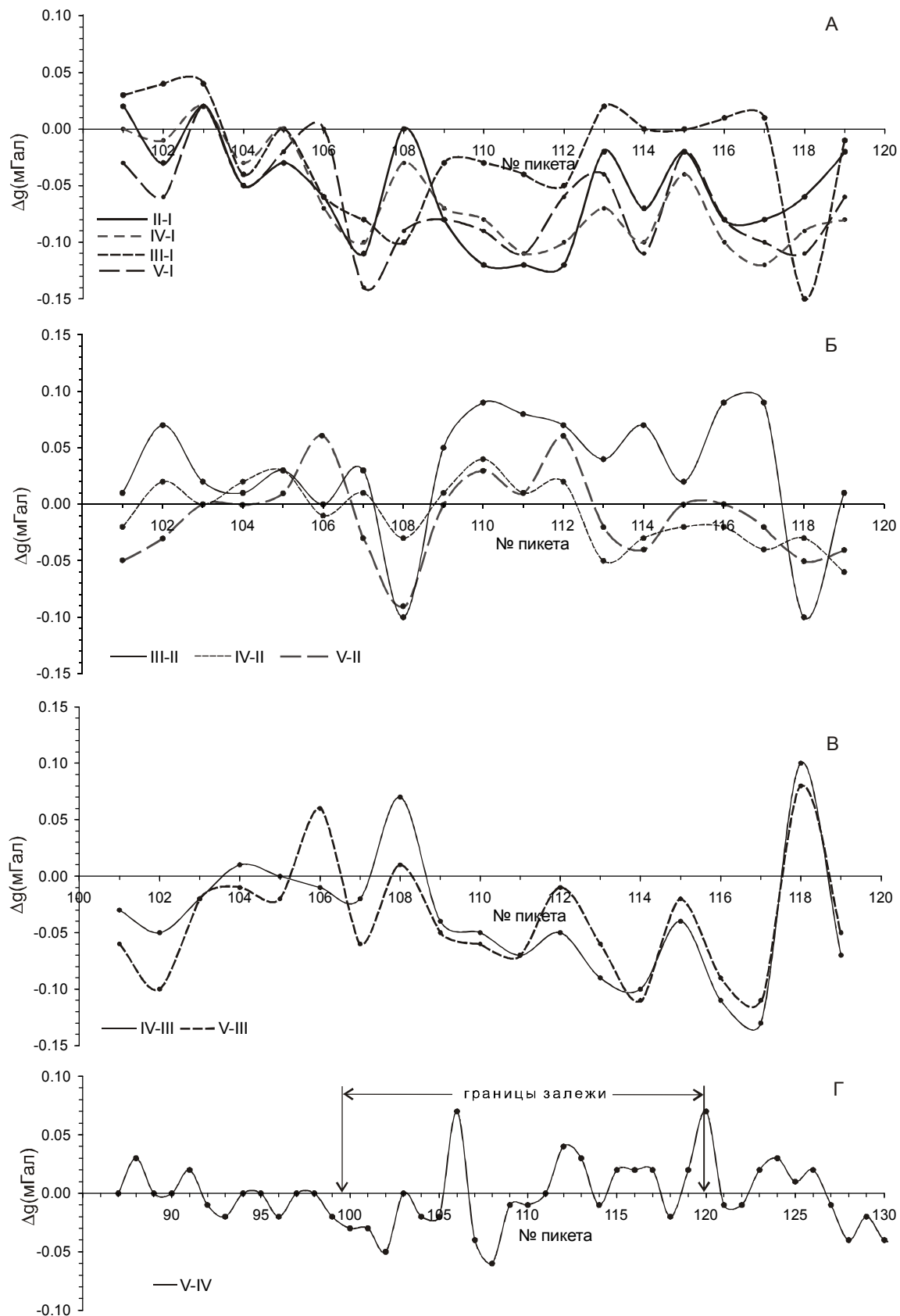


Рис. 3. Разности наблюдаемых значений силы тяжести между циклами наблюдений по профилю 1. А – относительно I цикла, Б – относительно II цикла, В – относительно III цикла, Г – относительно IV цикла.

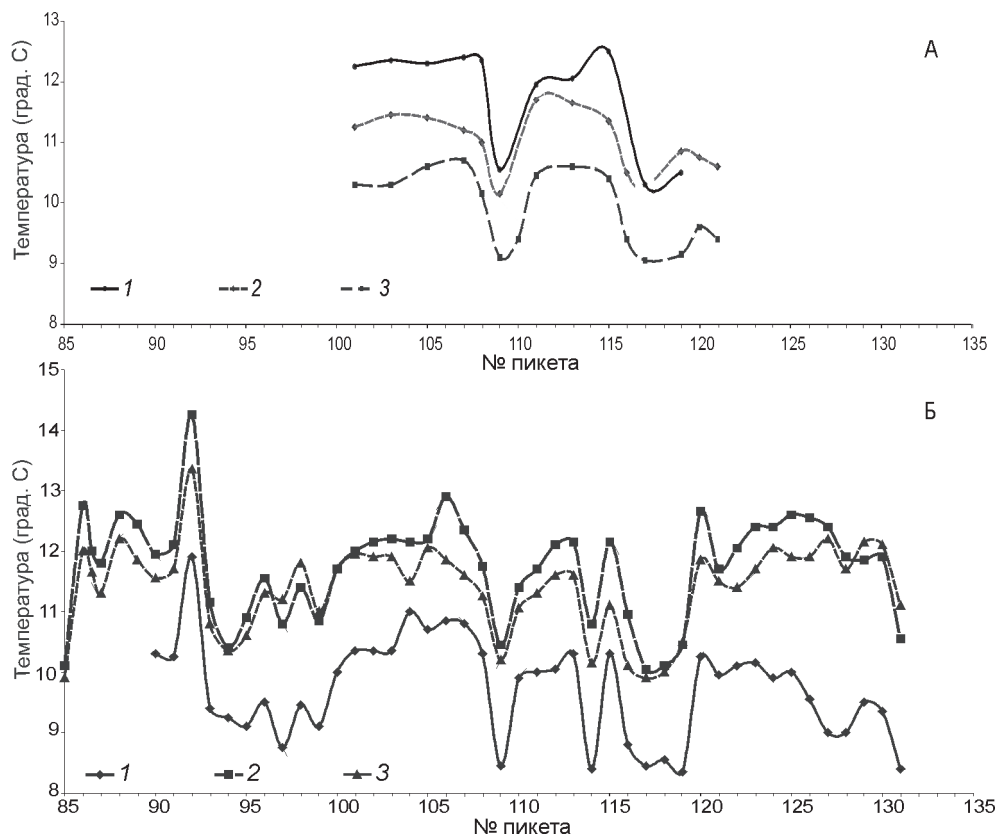


Рис. 4. Графики температур по профилю 1.

А – измеренные в 2003 г.: линия 1 – 8 сентября, линия 2 – 11 октября, линия 3 – 27 октября; Б – измеренные в 2004 г.: линия 1 – 25 июля, линия 2 – 12 сентября, линия 3 – 8 октября.

Выявленная закономерность, однако, справедлива только в пределах залежи. Результатами наблюдений, выполненных в 2004 г., за пределами залежи выявлен еще один относительный температурный максимум (пикеты 85–93), интенсивность которого соизмерима с интенсивностью максимумов, приуроченных к западному и восточному блокам залежи. Таким образом, наметившаяся тенденция к общему (фоновому) повышению термального поля по направлению к зоне Центрально-Сахалинского разлома, которая расположена примерно в 1–1.5 км к западу от полигона, приводит к необходимости следующего уточнения. Относительные максимумы температур, коррелируемые с максимумами разностей наблюдаемых значений силы тяжести, вполне определенно можно считать поисковым признаком. На участках профилей, расположенных в явно непродуктивных блоках, какие-либо выраженные возмущения гравитационного поля отсутствуют. По этой причине на таких участках отсутствуют и основания для корреляции данного параметра с данными термометрии.

Наиболее яркое отражение газовой залежи в термальном поле проявилось в период землетрясения 13 сентября 2004 г. Событие зафиксировано нами при производстве гравиметрических наблюдений

в 14 час 02 мин. по местному времени (03^h02^m по Гринвичу). Эпицентр землетрясения расположен в 600 км к юго-востоку от Южно-Луговского полигона. Событие выразилось в резких неперiodических колебаниях измерительных систем гравиметров, которые продолжались более 4 часов, после чего стали неотличимы от колебаний, вызванных начавшимся штормом. Это же событие в указанное время зарегистрировано в двух пунктах автономными сейсмическими станциями, расположенными в пос. Ожидаево и в г. Южно-Сахалинске (40 км к северо-северо-западу и 40 км к северо-востоку от полигона, соответственно). Параметры события занесены в сейсмологический бюллетень № 26 (с 11 по 20 сентября 2004 г.). Термометрические наблюдения, выполненные на профиле 1 12 сентября 2004 г. с 14 час 31 мин до 18 час 26 мин местного времени (менее чем за сутки до указанного события), были повторно проведены 15 сентября 2004 г. с 9 час 37 мин до 12 час 40 мин. Сопоставление результатов двух серий наблюдений (рис. 5) показало, что в пределах контура залежи (пикеты 100–119) произошло повышение температур на 0.5–0.8°C, что противоречит установленной для региона закономерности их сезонного снижения. В то же время, на участках профиля, расположенных над заведомо непродуктивными блока-

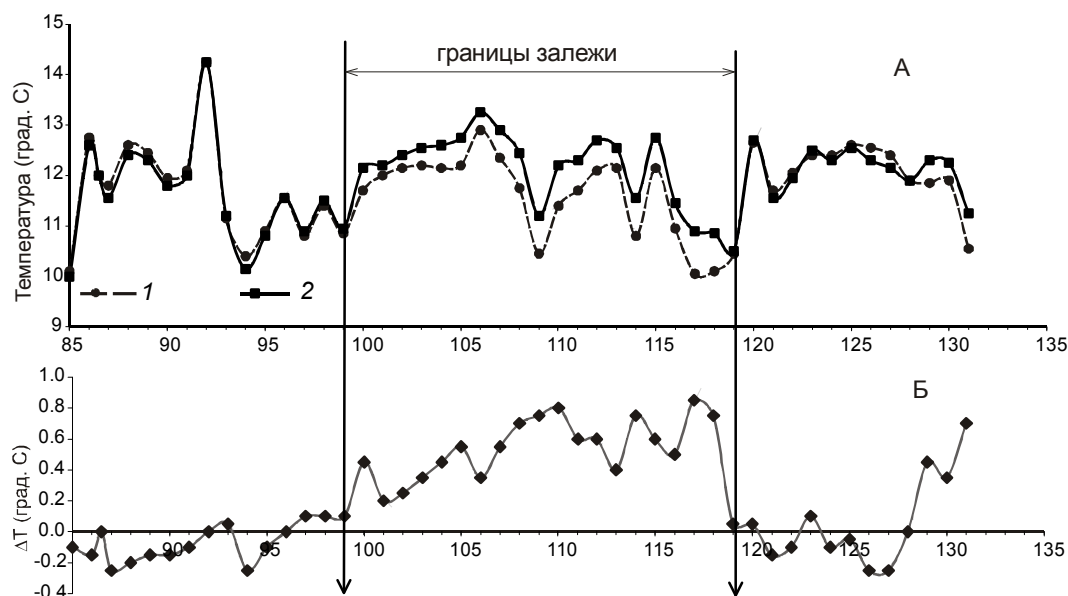


Рис. 5. Изменение температур по профилю 1 до и после землетрясения 13.09.04 г.
 А – температуры до землетрясения (1) и после землетрясения (2); Б – разности температур (2-1).

ми разреза, зафиксировано закономерное понижение температур на $0.1\text{--}0.15^\circ\text{C}$. На восточном фланге профиля 1 (пикеты 128–131) этими же сериями наблюдений выявлена еще одна положительная температурная аномалия, которая, видимо, соответствует западной части локальной залежи газа, открытой при бурении поисковой скважины № 1 Золоторыбной площади в 1971 г. Скважина расположена в 300 метрах к югу от аномального участка профиля (рис. 1Б). Температурная аномалия здесь так же закономерно сопровождается повышенными значениями разностей наблюдаемого гравитационного поля между пятым и четвертым циклами наблюдений. Восточное замыкание аномалии предполагается проследить в процессе дальнейшего производства работ.

Отмечая быструю температурную инверсию над залежью как факт, следует иметь в виду, что ее начало не обязательно должно совпадать с моментом прохождения сейсмического импульса. Д.Г. Осика [17] на многочисленных примерах показал, что увеличение дебитов различных флюидов в скважинах и температуры в источниках, расположенных в сейсмоактивных зонах, происходит за несколько дней до землетрясения. В данном случае не исключено, что повышение термального поля над залежью до $0.7\pm 0.8^\circ\text{C}$ менее, чем за двое суток – всего лишь интервал на фоне общего увеличения температур, обусловленного активной фазой подготовки сейсмического события.

Продолжая изложение результатов термометрических наблюдений, необходимо несколько подробнее рассмотреть следующее.

Одновременное производство термометрических и гравиметрических наблюдений было выполнено только во втором и третьем циклах наблюдений. Синхронность выполнения наблюдений, в данном случае, расценивается нами как основание для их сопоставления.

Некоторые отличия в форме температурных кривых (рис. 4А, кривые 2, 3) могут быть вызваны несколькими причинами:

1. За время, прошедшее между циклами наблюдений в 2003 г., прошло несколько затяжных дождей, что в условиях затрудненного стока верховодки, обусловленного выположенным рельефом и литологией осадков квартера в пределах полигона, могло привести к разной степени обводненности одних и тех же шпуров, а, следовательно, и к разной степени теплопроводности вскрываемых ими грунтов.

2. Различие в форме кривых вызвано временными изменениями теплового поля, обусловленными динамикой тепломассопереноса в пределах изучаемого объекта.

Разности температур, взятые между значениями третьего и второго циклов наблюдений и сопоставленные со значениями разностей Δg_H , взятыми в той же последовательности (рис. 6), показывают, что гравитационное и термальное поля претерпевают над изучаемым объектом практически одинаковые изме-

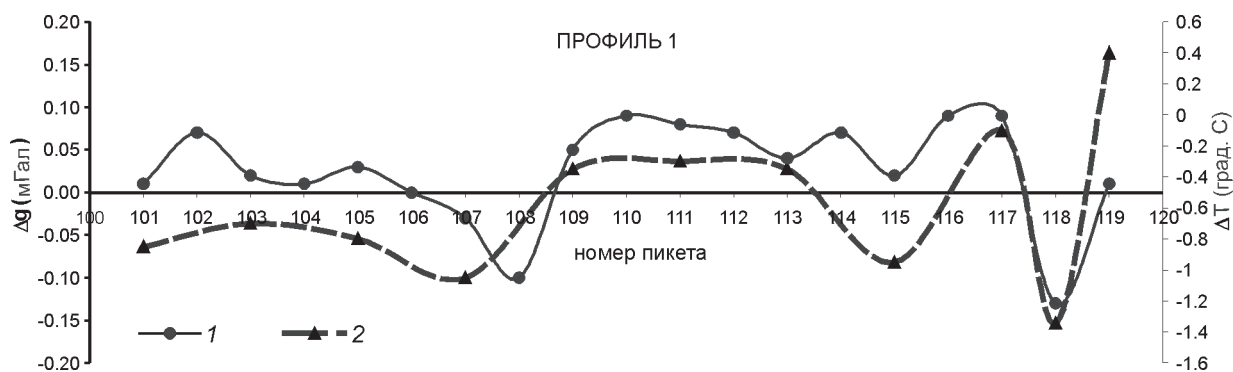


Рис. 6. Графики синхронного изменения наблюдаемых значений силы тяжести и температур по профилю 1 между III и II циклами наблюдений:

1 – разности значений силы тяжести, 2 – разности температур.

нения. Кроме того, разности значений термометрических наблюдений в указанных циклах наблюдений, по характеру распределения, соответствуют определенным блокам структуры, границы которых определились ранее.

По нашим данным, экспериментальные исследования в этой области еще не проводились, и описанный эффект выявлен впервые. Однако в работах ряда исследователей [11, 21, 25] показано, что между аномалиями теплового потока и силы тяжести существует соотношение, связывающее динамику температурного режима и плотностные изменения, обусловленные теплопереносом. В результате выполненных нами преобразований [18], для плоскопараллельного слоя это соотношение имеет вид:

$$\Delta g_B = 2\pi f \Delta \rho \frac{\lambda \Delta T}{q \Delta z} = 2\pi f \Delta \rho H,$$

где Δg_B – аномалия силы тяжести в редукции Буге, f – гравитационная постоянная, q – теплогенерация единичного объема источника, λ – коэффициент эффективной теплопроводности среды, H – мощность слоя, содержащего флюид, $\Delta \rho$ – изменение плотности среды,

$\frac{\Delta T}{\Delta z}$ – геотермический градиент.

В работе [18] на конкретном примере (землетрясение 13.09.2004 г.) показано, что при $\lambda_{cp} = 1.32$ Вт/(м·К) (для преимущественно аргиллитового состава), $H = 40$ м, $\Delta g_B = 0.1$ мГал, изменение плотности флюидосодержащего пласта достигает 0.06 г/см³.

При приращении температуры в пласте на 0.8 К, то есть с увеличением термоградиента на 20 мК/м, удельная теплогенерация в объеме пласта, определяемая из выражения $q = \frac{\lambda \Delta T}{H \Delta z}$, равна 0.66 мВт/м³. Это

более чем в 500 раз превышает фоновую удельную теплогенерацию за счет радиоактивного распада в аргиллитосодержащей толще и свидетельствует о мощном термогидродинамическом воздействии на флюидосодержащую толщу в контуре газоносности при прохождении упругих колебаний от очага землетрясения.

В результате сейсмического события 13 сентября 2004 г., в соответствии с вышеизложенными оценками, объем “впрыснутого” водного раствора в южной части контура газоносности Южно-Луговского месторождения примерно равен 280 тыс. м³, а уровень воды в пласте поднялся на 240 см.

Основные результаты термометрических наблюдений на Южно-Луговском полигоне могут быть выражены в следующем виде:

1. Блоки газонасыщенной структуры находят выражение в термальном поле в виде относительных максимумов температур, соответствующих местоположению участков с аномально высокими значениями разностей наблюдаемого гравитационного поля.

2. Границы блоков газонасыщенной структуры с индивидуальными геодинамическими параметрами выражены узкими относительными минимумами температур и расположены на участках смены характеристик временных изменений гравитационного поля.

3. Распределение температур над газонасыщенной структурой зависит от ее геодинамического состояния, а уровень температуры увеличивается при прохождении сейсмического импульса.

4. Температурное поле меняет конфигурацию над газонасыщенной структурой синхронно с изменением конфигурации гравитационного поля.

Геомагнитные наблюдения. Геомагнитные наблюдения из-за избыточного техногенного загрязне-

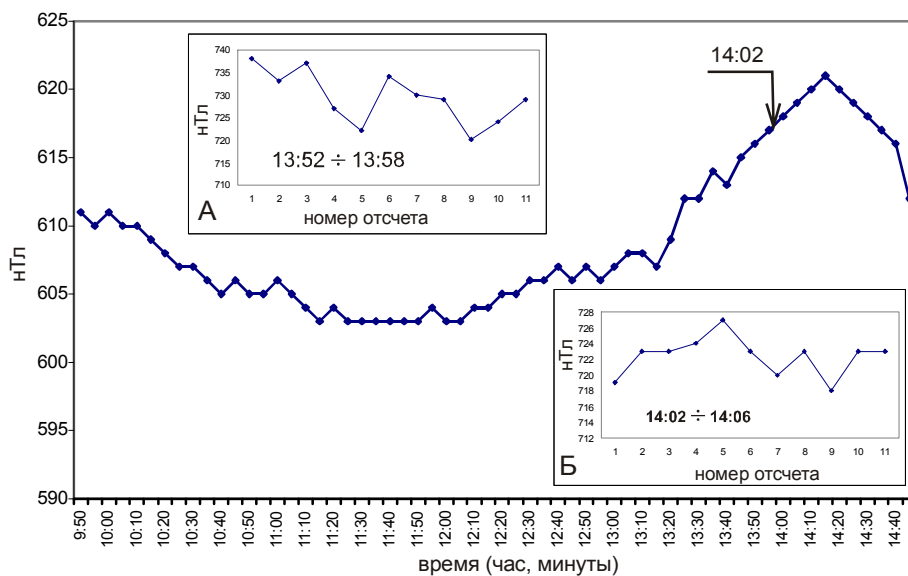


Рис. 7. Графики вариаций геомагнитного поля 13 сентября 2004 г.

ния на Южно-Луговском полигоне можно считать информативными только на профиле № 1. Здесь относительные максимумы геомагнитного поля визуально коррелируются как с относительными температурными максимумами, так и с максимумами разностей наблюдаемого гравитационного поля, а локальные минимумы ΔT_a соответствуют точкам смены характеристик других геофизических полей. Таким образом, распределение аномалий ΔT_a подчеркивает особенности гравитационного и термального полей и в целом подтверждает неоднородности изучаемого объекта.

Очевидных временных изменений геомагнитного поля, как-либо характеризующих плановое положение залежи газа, на данном этапе работ не обнаружено. На этом основании роль магнитометрии в решении задачи выработки поисковых критериев определяется как вспомогательная.

Более значимые результаты получены магнитометрией при решении задачи выявления предвестников сейсмических событий. Так, при производстве рядовых магнитометрических наблюдений на профиле 1 и одновременной записи вариаций геомагнитного поля в период проявления сейсмической активности 13 сентября 2004 г. получены результаты, позволяющие считать, что изменение напряженности геомагнитного поля в значительной мере зависит от степени напряженности земной коры. На графике вариаций (рис. 7) отчетливо видно, что резкое увеличение напряженности поля ΔT_a началось в 13 ч 25 мин, т.е. за 37 минут до сейсмического события. При этом само событие (время 14 ч 02 мин, показано стрелкой на графике) не выражено на фоне линейно возраста-

ющих значений геомагнитного поля при регистрации значений через 5 минут на опорном пункте. Однако при производстве рядовых наблюдений на профиле, в этом же промежутке времени, были записаны серии показаний второго магнитометра на пикетах 90–96 (рис. 7А, Б). Интервалы времени между записями показаний в каждой серии равны стандартному времени становления отсчета, т.е. 10–15 с. Графики ΔT_a , построенные по сериям наблюдений, показывают, что характер кратковременных изменений геомагнитного поля резко неоднороден. Скорее всего, он имеет неравномерно пульсирующий режим, в котором периоды кратковременной (~20 – 25 с) стабилизации поля сменяются периодами резкого увеличения и резкого спада напряженности. Наиболее амплитудные колебания поля (до 20 нТл) зафиксированы в интервале времени 13 ч 52 мин–13 ч 58 мин (рис. 7А).

Записанные эпизоды вариаций геомагнитного поля в период сейсмического события пока не позволяют проследить какие-либо закономерности. Тем не менее, исходя из полученных данных, можно предположить следующее.

1. Форма зарегистрированной вариационной аномалии не соответствует форме аномалий, обычно вызываемых кратковременными периодами повышения солнечной активности. Возможно, аномалия обусловлена наведенной индукцией, которая возникает при прохождении достаточно мощного электрического импульса. Последний, в свою очередь, мог возникнуть в результате пьезоэлектрического эффекта (или сейсмоэлектрического эффекта второго рода), возникающего при быстрых деформациях в земной коре.

2. Интервальные эпизоды магнитных вариаций (рис. 7А, Б), позволяют рассчитывать на то, что при непрерывной записи с точностью не ниже $\pm 0.1 \text{ нТл}$, могут быть обнаружены изменения геомагнитного поля, фиксирующие подготовку сейсмического события от начальной до конечной стадий.

3. При регистрации вариаций геомагнитного поля, одновременно с колебаниями суммарной величины вектора T , очень важным дополнением может быть регистрация колебаний его составляющих Z и H , а так же регистрация колебаний естественного электрического поля.

ВЫВОДЫ

1. В ходе работ установлено, что плановое положение залежи углеводородов, даже при незначительной ее мощности, устойчиво фиксируется комплексом многократных высокоточных гравиметрических и температурных наблюдений. При этом очевидно, что принадлежность залежи к какому-либо определенному типу ловушки существенного значения не имеет, как не имеет существенного значения и тип углеводородов, присутствующих в ловушке. Поскольку нефти Дальнего Востока, как правило, характеризуются газовым фактором (газосодержанием) до $200 \text{ м}^3/\text{м}^3$ и более, то, следовательно, эти нефти также имеют достаточно высокие коэффициент сжимаемости (не менее 5 ГПа^{-1}) и упругоэластичность.

2. Уверенными признаками наличия залежи углеводородов на исследуемом объекте можно считать: а) нестабильность гравитационного поля в определенных пространственных ограничениях, достигающая величины $\pm 0.05 \text{ мГал}$ и более; б) наличие относительных температурных максимумов, совмещенных в плане с участками аномальной нестабильности гравитационного поля; в) наличие на исследуемом объекте участков с синхронно меняющимися во времени значениями гравитационного и термального полей.

3. Наиболее амплитудные изменения геофизических полей над залежью газа фиксируются в период прохождения сейсмического импульса. В этот период происходит изменение уровня газовой контактной температуры и давления в контуре залежи, как следствие, изменение плотности газонасыщенных пластов, т.е. изменяется геодинамическое состояние залежи.

4. Решение задач прогноза нефтегазоносности и прогноза сейсмических событий, в данном случае, взаимосвязаны. С одной стороны, залежь наиболее ярко обнаруживает себя в процессе прохождения сейсмического импульса, с другой – изменение гео-

физических полей над залежью может дать возможность проследить процесс подготовки сейсмического события.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимова А.А., Волгина А.И. О результатах совместных гравиметрических и газометрических наблюдениях // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1990. № 3. С. 83–85.
2. Амирханов Х.И., Сардаров С.С. Способ прогнозирования землетрясений. Описание изобретения к авторскому свидетельству. М.: ВИНТИ, 1976. Бюл. № 2.
3. Балавадзе Б.К., Картвелишвили Н.К. Изменение амплитуд приливных волн в связи с близкими землетрясениями // Геофизический журнал. 1995. Т. 17, № 2. С. 33–36.
4. Буланже Б.А. Влияние изменения во времени гидрогеологических факторов на силу тяжести // Повторные гравиметрические наблюдения. М., 1986. С. 4–23.
5. Волгина А.И., Кононков В.Ф. Особенности изменения силы тяжести во времени над нефтегазовыми месторождениями // Геология и геофизика. 1987. № 7. С. 138–143.
6. Волгина А.И. О влиянии миграции флюидов на изменение силы тяжести // Повторные гравиметрические измерения. М., 1988. С. 181–185.
7. Волгина А.И. Результаты временных изменений гравитационного поля // Геология нефти и газа. 1990. № 3. С. 36–37.
8. Геотермические поиски полезных ископаемых / В.И. Лялько, М.М. Митник, Л.Д. Вульфсон, З.М. Шпортюк. Киев: Наук. думка, 1979. 148 с.
9. Думанский С.Г., Кульничский Д.И. Геотермические характеристики нефтяных и газовых месторождений Предкарпатского прогиба и применение геотермического метода разведки для поисков глубинных структур // Региональная геотермия и распространение термальных вод в СССР. М., 1967. С. 75–84.
10. Завгородняя О.В., Гордиенко В.В. О возможном полевом варианте определения теплового потока Земли методом редуцирования температурных волн // Докл. АН УССР. Сер. Б. 1976. № 6. С. 493–497.
11. Зорин Ю.А., Лысак С.В. О количественной интерпретации геотермических аномалий // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1972. № 9. С. 68–73.
12. Лялько В.И. Тепло- и массоперенос в подземных водах юго-запада Русской платформы: Автореф. дис... д-ра геол.-минер. наук. Киев: ИГН УССР, 1972. 36 с.
13. Осадчий В.Г. Оценка перспектив нефтегазоносности по геотермическим данным // Нефтяная и газовая промышленность. 1965. № 3. С. 6–8.
14. Осадчий В.Г. Использование геотермии в нефтяной геологии // Материалы по геологии и нефтегазоносности Украины. М., 1968. С. 303–311.
15. Осадчий В.Г., Лурье А.И., Ерофеев В.Ф. Геотермические критерии нефтегазоносности недр. Киев: Наук. думка, 1976. 142 с.
16. Осадчий В.Г. Геотермия зон нефтегазоаккумуляции: Автореф. дис... д-ра геол.-минер. наук. Новосибирск, 1990. 32 с.
17. Осика Д.Г. Флюидный режим сейсмически активных областей. М.: Наука, 1981. 203 с.
18. Паровышный В.А., Веселов О.В., Сеначин В.Н. Времен-

- ные изменения геофизических полей над газонасыщенными геодинамическими системами. (Препринт). Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2005. 50 с.
19. Рикитаке Т. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1979. 390 с.
 20. Справочник по климату СССР. Вып. 34. Сахалинская обл. Часть III. Температура воздуха и почвы (Изд-ние 2-е). Л.: Гидрометеониздат, 1970. 200 с.
 21. Тарков А.П. Глубинное строение Воронежского массива по геофизическим данным. М.: Недра, 1974. 172 с.
 22. Чекалюк Э.Б. Термодинамика нефтяного пласта. М.: Недра, 1965. 408 с.
 23. Чекалюк Э.Б., Федорцов И.М., Осадчий В.Г. Полевая геотермическая съемка. Киев: Наук. думка, 1974. 104 с.
 24. Электрические и магнитные предвестники землетрясений / Ред. В.П.Головков. Ташкент: ФАН, 1983. 136 с.
 25. Simmons G. Interpretation of heat anomalies // Rev. Geophys. 1967. V. 5, N 1. P. 43–52.

Рекомендована к печати А.Н. Диденко

V.A. Parovyshny, O.V. Veselov, V.N. Senachin, V.S. Kirienko

Temporal changes in the geophysical fields above the gas deposit (Sakhalin I.)

The paper considers results of multiple geophysical observations of the South Lugovskoy gas deposit (southern Sakhalin) carried out from 2003 till 2006. It is shown that the gas deposit is a natural indicator of geodynamic processes taking place both in the deposit proper and beyond its bounds.

The package of methods and the practice of observations are suggested for estimation of the degree of efficiency of the sites involved in prospect drilling and as a basis for further development of methods of short-term prediction of seismic events by geophysical methods since sharp changes in the parameters of geophysical fields above the gas-bearing structure occur during the advancing of the seismic impulse, which spreads from the outer source.

Key words: gravimetry, thermometry, magnetometry, earthquake precursors, geodynamics, gas deposit, prospect indicators of oil-and-gas deposits, Sakhalin.