

УДК 553.078.2

СТРОЕНИЕ ВОСТОЧНО-ПАУЖЕТСКОГО ТЕРМАЛЬНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВАНИИ КОМПЛЕКСНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С.О. Феофилактов, Ю.Ю. Букатов, И.А. Нуждаев, А.А. Нуждаев, Д.К. Денисов

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский,
683006; e-mail: serg415@kscnet.ru*

Проведено детальное изучение Восточно-Паужетского термального поля на основании использования комплекса методов: магнитометрии, электроразведки (ВЭЗ и ЕП), высокоточной гравиметрии и термометрии грунтов. Выделена система субгоризонтальных и вертикальных блоков пород, контролирующая водоупорные горизонты, минеральные рудные зоны, паро- и водонасыщенные области, участки разгрузки восходящих гидротермальных растворов.

Введение

Геотермальные месторождения представляют повышенный интерес для фундаментальной науки в связи с тем, что они формируются на особых участках земной коры: в зонах сочленения региональных тектонических блоков, над глубинными разломами, в апикальных частях интрузивных тел, в крупных кальдерах. В структуре Паужетского геотермального месторождения (Южная Камчатка) выделяются приподнятые тектонические (тектоно-магматические ?) блоки, с которыми связана разгрузка парогидротерм на дневной поверхности [10]. К одному из таких блоков, овально-кольцевых в плане диаметром ≥ 500 м, приурочено Восточно-Паужетское термальное поле (т/п). Оно расположено на удалении до 1-2 км от эксплуатационных участков месторождения, что отразилось на степени его изученности. На площади поля проводились термометрические и различные геохимические исследования, в т.ч. режимные наблюдения, поле выделяется аномальными значениями ΔZ и другими геофизическими характеристиками (см. ниже), но сведений о его глубинном строении практически нет. Вместе с тем, выделение системы тектонических нарушений, контролирующей потоки восходящих гидротермальных растворов, получение данных о положении и природе источников тепла и деформационных напряжений в структуре блока – все это имеет не только теоретическое значение, но и весьма актуально в последние годы для Паужетского месторождения в связи со снижением параметров теплоносителя (Р, Т) на эксплуатационных участках. Отмеченное определило интерес авторского коллектива к исследованию Восточно-Паужетского т/п комплексом геофизических методов.

Восточно-Паужетское т/п: изученность, местоположение

Впервые это т/п было обнаружено в 1950 г. В.В. Ивановым и Г.А. Гонсовской [2], а описание сделано С.И. Набоко, которая дала ему не совсем корректное название «Гидросольфатары Дикого гребня» [3] (безусловно, к экстрезии Дикий Гребень это термопроявление никак-

го отношения, пространственного или генетического, не имеет). В следующей работе эта разгрузка парогидротерм названа «Древне-сульфатарным полем» и описывалась как выходы маломощных паровых струй с температурой до 100 °С на небольшом участке, расположенном за пределами Паужетской гидротермальной системы [9]. Изучение Паужетского месторождения и постановка режимных геотермических исследований под руководством В.В. Аверьева и В.М. Сугрובה показали, что эта термоаномалия входит в структуру Паужетской гидротермальной системы. Ей было дано название «Восточно-Паужетское термальное поле» [1], используемое и в настоящее время.

Геофизические исследования на площади Паужетского геотермального месторождения относятся к 1960-м годам. Под руководством И.М. Зайцева выполнены площадные температурные, магнитометрические, электроразведочные и гравиметрические работы в масштабе 1:10 000 (результаты исследований приведены только в фондовых материалах **). Район Восточно-Паужетского т/п выделяется повышенными температурами грунтов и локализованной положительной аномалией ΔZ . Область низких значений ΔZ и высоких температур прослежена по долине ручья Быстрый от Верхне- к Восточно-Паужетскому термальным полям. По результатам ВЭЗ горизонт низкого сопротивления 3-10 Ом*м, соответствующий обводненным псефитовым туфам, увеличивает свою мощность до 500 м в районе Восточно-Паужетского т/п. Е.А. Вакиным и Ю.М. Хаткевичем под руководством В.М. Сугрובה выполнены гидрогеотермические режимные наблюдения на т/п**. Одним из важнейших результатов этих работ является заключение об отсутствии влияния эксплуатации геотермального месторождения на разгрузку парогидротерм в районе т/п.

Восточно-Паужетское т/п относится к флангу Паужетской гидротермальной системы и одноименного геотермального месторождения, получивших мировую известность благодаря строительству первой в СССР ГеоЭС [1, 5]. Оно приурочено к западному склону Камбального вулканического хребта, который описывается как резургентное тектоно-магматическое поднятие в Паужетской кальдере четвертичного возраста [10]. Т/п локализовано на пологом склоне в долине рч. Лучший (правый приток рч. Быстрый) на абсолютных отметках 270 – 300 м (рис. 1). Центральный участок размером 120 × 60 м выделяется парящими грунтами, прогретыми до 105 °С на глубине 0.5 – 0.8 м; парогазовыми струями (до 98 – 100 °С на устьях); грязе-водными кипящими котлами и мелкими теплыми озерами [8]. На удалении 150 – 300 м от участка вниз по ручью отмечаются отдельные термальные площадки с грязе-водными котлами, общий размер поля составляет около 150 × 500 м. Разгружающиеся термальные воды кислые сульфатные и гидрокарбонатно-сульфатные с широким катионным составом, общая минерализация не превышает 0.5 – 0.8 г/л. Конденсат пара имеет близкий химический состав. Т/п (изучен Центральный участок) перекрыто единым чехлом гидротермальных глин мощностью от 1.5 до ≥ 4.0 м [8], но мощность глин может быть больше за пределами активной разгрузки парогидротерм (на остывших участках).

* Зайцев И.М. Отчет о комплексных геофизических исследованиях в районе Паужетского геотермального месторождения в 1969 г. Территориальный фонд геологической информации по Дальневосточному федеральному округу. Петропавловск-Камчатский, 1970. 116 с.

** Сугробов В.М., Вакин Е.А., Хаткевич Ю.М. Режимные наблюдения на Паужетском месторождении парогидротерм в 1968-1970 гг. Фонды ИВиС ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 1971. 28 с.

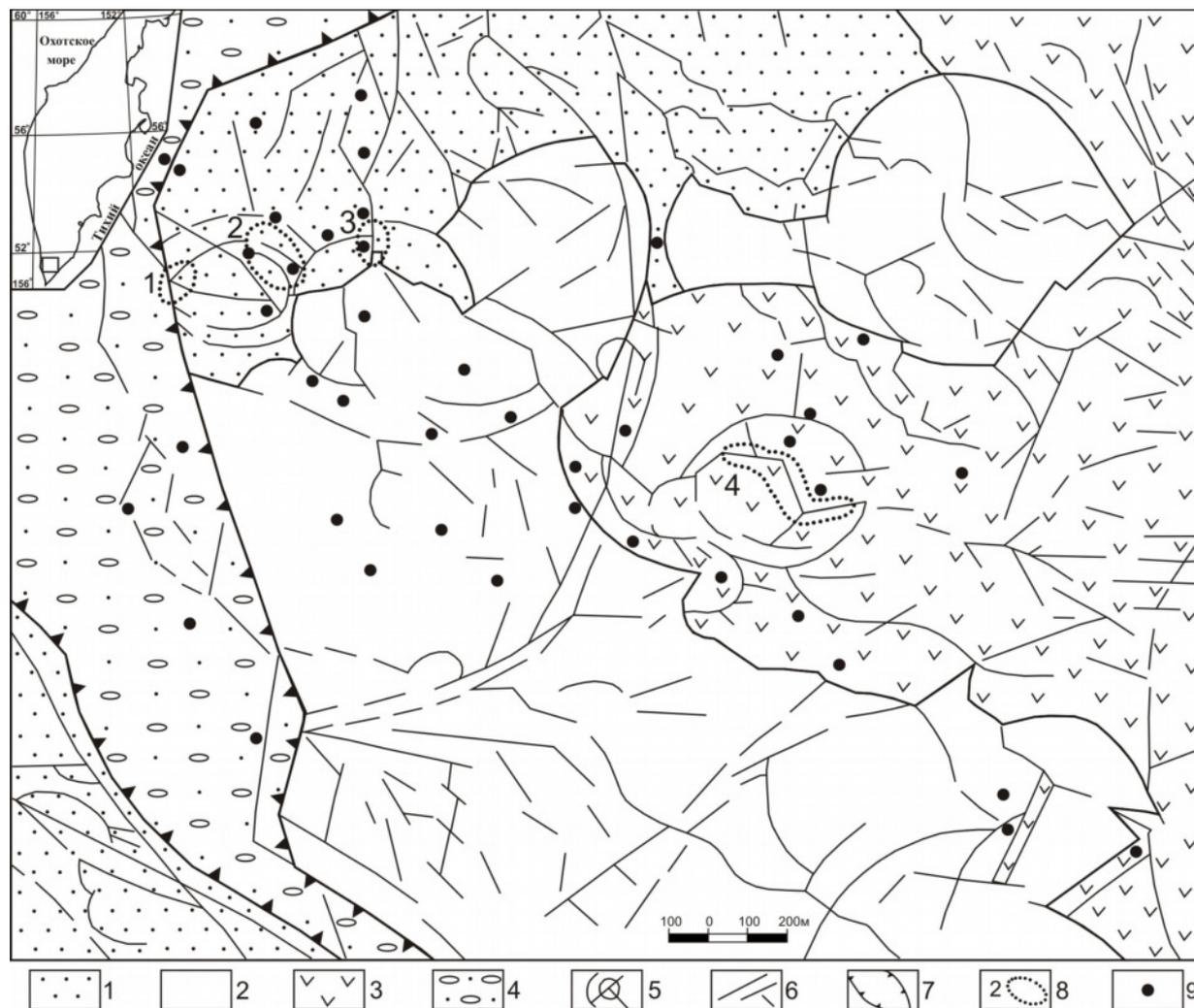


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Паужетской гидротермальной системы. Составлена С.Н. Рычаговым на основании обобщения данных поисково-разведочных работ и тематических научных исследований. 1 – туффи́ты и туфы Верхне-Паужетской подсвиты верхний неоген-нижнечетвертичного возраста; 2 – лаво-экструзивный комплекс пород кислого состава среднечетвертичного возраста; 3 – андезиты и андезибазальты среднечетвертичного возраста; 4 – аллювиальные валунно-галечные отложения; 5 – кольцевые тектонические нарушения; 6 – линейные тектонические нарушения; 7 – Паужетский грабен верхнечетвертичного возраста; 8 – термальные поля: 1 – Южно-Паужетское, 2 – Верхне-Паужетское, 3 – Нижне-Паужетское, 4 – Восточно-Паужетское; 9 – скважины

В последние годы сотрудниками ИВиС ДВО РАН с коллегами из других организаций в рамках Южнокамчатско-Курильской экспедиции проводятся различные тематические исследования Паужетской гидротермальной системы [6, 7, 11]. Ниже приведены основные результаты изучения строения Восточно-Паужетского т/п геофизическими методами.

Методика геофизических исследований

Электроразведочные работы проводились в центральной части Восточно-Паужетского т/п методами ВЭЗ и ЕП в марте 2015 г.

Вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ) выполнялись симметричной четырех-электродной расстановкой AMNB. Величина разноса ограничивалась глубиной снежного покрова. Максимальный полуразнос питающей линии (AB/2) в центральной части составил 52 м, в крайних пунктах измерения – 20 м. На каждом пункте зондирования было проведено от 8 до 12 измерений, что позволило получить достаточно детальную кривую зондирования. В связи с хорошими условиями проводимости поверхностного глинистого чехла термальной площадки все наблюдения выполнялись на минимально возможном токе 10 мА и одной приемной линии (MN) 2 м. Необходимые измерения проводились многофункциональным электроразведочным измерителем МЭРИ-24, с помощью электроразведочного генератора ВП-1000 и инверторного генератора Yamaha EF2000iS.

Зондирования выполнены в 9 точках по простиранию поля (показано треугольниками на рис. 2а) с шагом 10 м. Длина профиля составила 80 м и является максимально возможной в зимний период. Пунктирной линией на рисунке обозначена видимая граница термальной разгрузки. Расчеты и нормировка кривых зондирования проводились в пакете Excel. Построение геоэлектрического разреза проводилось в специализированном программном пакете IPI2win.

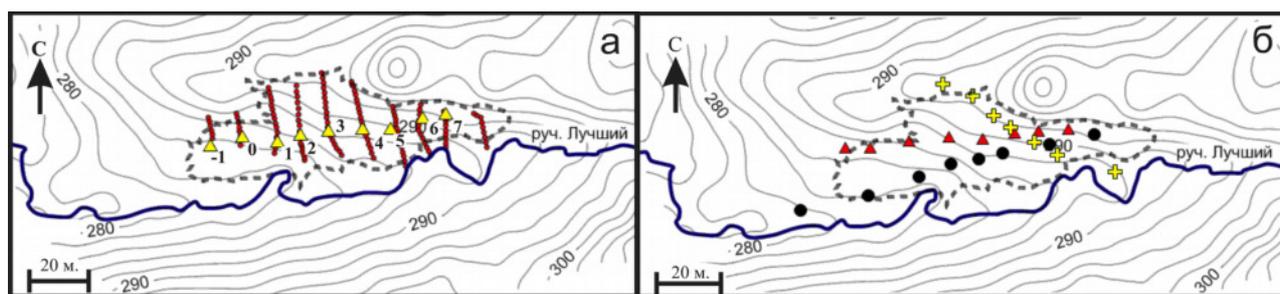


Рис. 2. Схема расположения точек ВЭЗ и профилей ЕП (а) и схема расположения профилей высокоточной гравиметрической съемки (б). Пунктиром обведена наиболее прогретая часть термопроявления, выделенная по отсутствию растительности и примерно совпадающая с 20-градусной изотермой на глубине 1 м

Измерения методом *естественного электрического поля (ЕП)* выполнялись потенциал установкой по профилям. Вся территория, не покрытая снегом, была покрыта съемкой из 10 профилей с интервалом 10 м и шагом измерений по профилю 2.5 м (показано точками на рис. 2а). Для проведения измерений, использовалось два неполяризующихся электрода, один находился все время стационарно, а второй перемещался по точкам наблюдения. Время выстаивания электрода на точке измерения определялось стабильностью разности потенциалов на измерителе МЭРИ-24 и составляло не менее 2 минут. Определенные сложности возникали при измерениях в непосредственной близости выходов паровых струй и на сильно прогретых участках: приходилось дольше выстаивать электроды на точках. В северной части поля лунки для измерений затапливало водой, добавлялся грунт. Результаты измерений заносились в память измерителя и дублировались в полевом журнале. Контрольные измерения были выпол-

нены в количестве 25 %. Средняя разность между основными и повторными наблюдениями составила 2.44 мВ для всего планшета съемки. Обработка материалов проводилась в пакете Excel. Подготовленный массив данных использовался для геофизических построений в программе Surfer.

Высокоточная гравиметрическая съемка проводилась по профилям в 2014 и 2015 гг. Работы велись высокоточным гравиметром CG-5 Autograv канадской фирмы Scintrex. Прибор представляет собой автоматический микропроцессорный гравиметр, диапазон измерений которого превышает 7000 мГал, а разрешающая способность при снятии показаний составляет 0,001 мГал. Показания в системе Autograv получаются путем постоянного усреднения замеров, взятых в течение секунды. На площади Восточно-Паужетского т/п было пройдено 3 профиля, общее количество точек - 22.

Шаг по первому профилю 2014 г. составил 20 м (на рис. 2б показан кружками), по второму и третьему профилям 2015г. – 10 м (на рис. 2б показаны крестиками и треугольниками, соответственно). Для контроля качества измерений выполнены дополнительные измерения в количестве 25%. Среднеквадратичная ошибка измерений по первому профилю составила 0.085 мГал, по остальным профилям – 0.005 мГал.

Геодезическое обеспечение осуществлялось двумя GPS станциями Leica GR 10 с антеннами AR 10. Для GPS станции Leica GR 10 допускаемая СКП измерений в режиме «Статика» составляет: в плане $5 + 0,5 \times 10^{-6} \times D$ мм; по высоте $10 + 0,5 \times 10^{-6} \times D$ мм; где D - измеряемое расстояние в мм. Одна станция использовалась как базовая, другая перемещалась по профилям. Время записи на точка составляло не менее 15 мин. В результате для всех профилей получены каталоги координат и высот. Ошибка определения высоты по данным GPS составляет 3-7 см.

Все необходимые расчеты и моделирование проводились с использованием программного комплекса Geosoft.

Температурная съемка выполнена в 2014 г. по нерегулярной сети в 254 точках (рис. 3а). Измерены температуры грунтов на площади 300 x 150 м, на глубине 60-70 см. Для измерений использовался портативный мультиметр и комплект заводских термопар, которые калибровались регулярно. Точность измерений находится в пределах 0.5 °С и не зависит от окружающей среды, времени суток и т.д. Для привязки пикетов на местности использовался GPS-навигатор, точность определения координат которого составляет 3-5 м.

Магнитометрическая съемка была проведена летом 2013 г. [4]. Съемка выполнялась двумя современными магнитометрами на эффекте Оверхаузера GEM GSM-19W v7.0. Один прибор использовался в качестве магнитовариационной станции, вторым проводились рядовые измерения. В центральной части термоаномалии был выделен опорный профиль (вкрест основным профилям), на котором проводились измерения каждые 2 часа. Профиля съемки располагались с интервалом 10 м перпендикулярно простиранию термальной площадки. Шаг по профилю составил 2 м. В центральной части термальной разгрузки были добавлены дополнительные профили так, что сеть измерений составила 5 x 2 м (рис. 3б). Контрольные из-

мерения выполнены в объеме 15 % от общего количества точек, среднеквадратическая погрешность съемки составила ± 11.5 нТл. Обработка всех материалов проводилась в пакете Excel, а графические построения в программе Surfer.

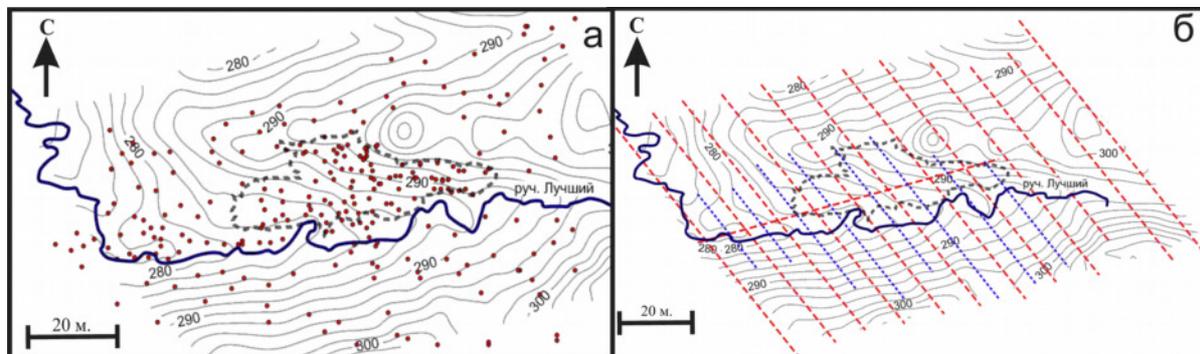


Рис. 3. Схема расположения точек, в которых проводились замеры температур грунтов (а) и схема расположения профилей площадной высокоточной магнитометрической съемки (б). Крупным пунктиром показаны основные профили съемки, мелким – дополнительные

Фактический материал исследований

По результатам *электроразведочных работ методом ВЭЗ* построен геоэлектрический разрез на глубину до 25 м. Разрез характеризуется кривой типа Н ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$). Используя материалы послойного изучения глинистой толщи на Восточно-Паужетском термальном поле с помощью проходки глубоких шурфов [8], более детально разделена верхняя часть геоэлектрического разреза до глубины 5 м. Сверху вниз выделяются следующие контрастные по удельному сопротивлению (у.с.) слои геоэлектрического разреза (рис. 4):

а – верхний слой с у.с. 30-50 Ом*м, имеет мощность порядка 1 м и выклинивается к поверхности в районе точки 4. Эта область характеризует горизонт глин сернокислотного выщелачивания.

б – горизонт с у.с. 10-12 Ом*м, его мощность колеблется от 0.5 до 1 м. Этот слой характеризует влажные тугопластичные глины.

в – горизонт с у.с. 2.5 Ом*м, мощностью от 0.5 до 1.5 м. Характеризует прослой более плотных и более сухих глин. Такие низкие значения у.с. можно объяснить вероятным пропариванием горизонта под действием высокой температуры до 86 °С. Также этот горизонт характеризуется высокой минерализацией субстрата – здесь установлены фосфатно-алюмосиликатно-сульфидная и кремнисто-карбонатно-сульфидная минеральные ассоциации в основной массе глин [8].

г – горизонт с у.с. 4-6 Ом*м, его мощность колеблется от 3-4 м в центральной части разреза, до 7 м в западной; в восточной части он погружается на глубину более 20 м. Этот слой, вероятно, характеризуется достаточно высокой степенью обводненности горных пород минерализованными термальными водами.

д – подстилающий горизонт с у.с. 10-20 Ом*м, верхняя кровля которого залегает на глубине 6 м в центральной части разреза с погружением к периферии: в западной части - до 7 м, в восточной части - более 20 м. Горизонт в меньшей степени обводнен.

По результатам измерений *методом ЕП* построена площадная карта распределения естественного электрического поля для центральной части Восточно-Паужетской термоаномалии (рис. 5). Выделяется три области высоких значений потенциала. Максимальное значение имеет область, расположенная в северной части поля - до 30 мВ. Выделенные аномалии хорошо коррелируют с высокотемпературными участками (до 101 °С по данным температурной съемки 2014 г.). По-видимому, аномалии потенциала связаны с прогретыми участками, где идет интенсивное просачивание и испарение влаги. Выделенная область низких значений потенциала соответствует участку пород, на котором не наблюдаются разгрузки парогидротерм.

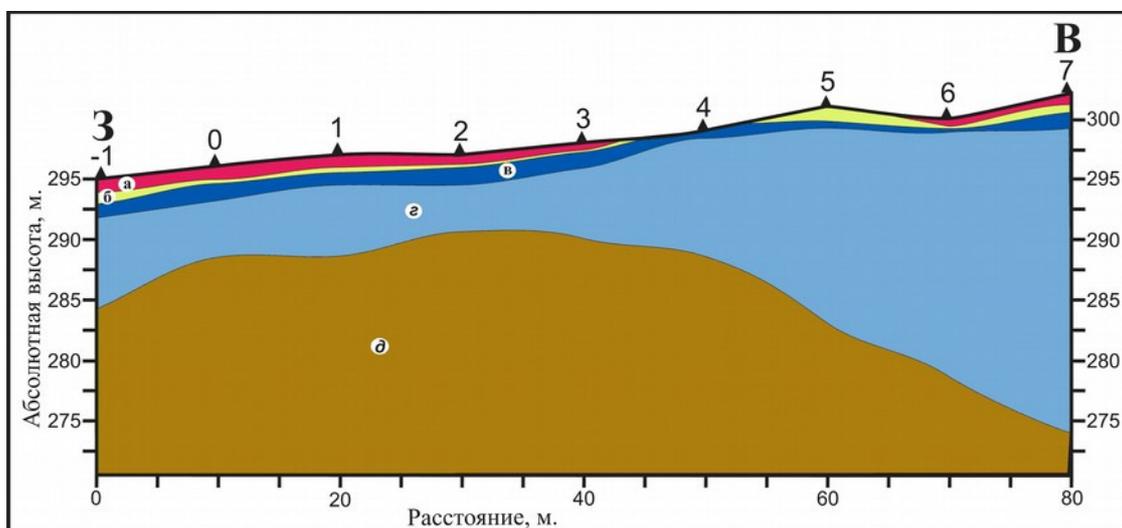


Рис. 4. Геоэлектрический разрез Восточно-Паужетского термального поля

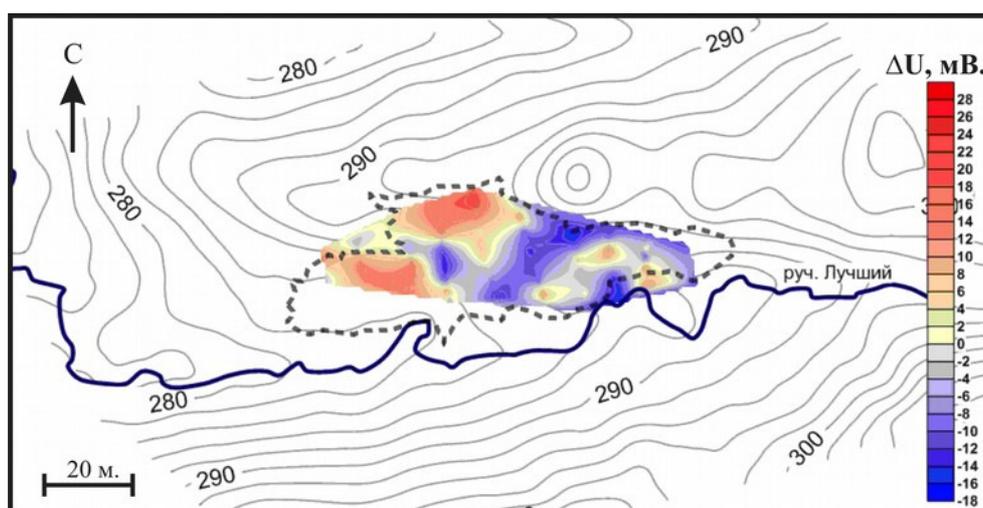


Рис. 5. Карта изолиний распределения естественного электрического поля

По результатам *температурной съемки* оконтурены границы термального поля по 20-градусной изотерме (рис. 6). Наибольшие температуры наблюдаются в центральной части разгрузки - до 101 °С. К ней приурочена большая часть термальных выходов – парогазовых струй и кипящих котлов, отмеченных точками на схеме. По периферии выделяются локализованные прогретые участки с температурами до 70 °С. Выполненные в 1960-х годах измерения температур грунтов Восточно-Паужетского т/п под руководством В.М. Сугрובה отличаются меньшей детальностью, но распределение положительных аномалий принципиально схоже (за исключением отдельных участков на периферии поля, вероятно, не замеченных ранее). Поэтому можно уверенно констатировать, что температурный режим т/п, в целом, не изменился за прошедшие 50 лет, что имеет принципиальное значение для изучения структуры т/п.

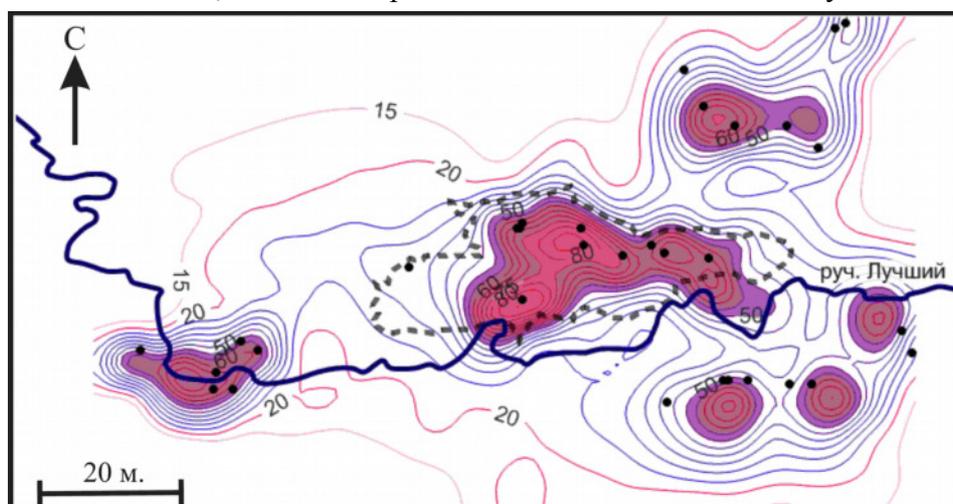


Рис. 6. Распределение температур грунтов в пределах Восточно-Паужетского т/п по данным на 2014г.

По результатам *магнитометрической съемки* на общем фоне отрицательных значений ΔT_a в центральной части т/п выделяется крупная положительная магнитная аномалия со значениями до +505 нТл (рис. 7). Мы полагаем, что положительная магнитная аномалия в центре термального поля может свидетельствовать в пользу наличия на небольшой глубине субинтрузивного тела основного или среднего состава, кровля которого приближена к дневной поверхности. Вероятно, с внедрением этого тела на данном участке может быть связано и образование относительно поднятого блока и, соответственно, самого Восточно-Паужетского т/п. Обширная область отрицательных значений ΔT_a вокруг этой положительной аномалии может указывать на наличие скрытой разгрузки гидротермальных растворов.

По *гравиметрическим данным* для каждого профиля получены графики аномального гравитационного поля в редукции Буге для плотности промежуточного слоя 2.0 г/см³. Плотность промежуточного слоя определялась аналитическим точечным способом и составила 2.0 г/см³, а также статистическим способом Неттлетона. Построены графики корреляции аномального гравитационного поля в редукции Буге для диапазона плотностей 1.5-3.0 г/см³ с рельефом местности. Наименьшая корреляция наблюдается при значении плотности 2.0 г/см³.

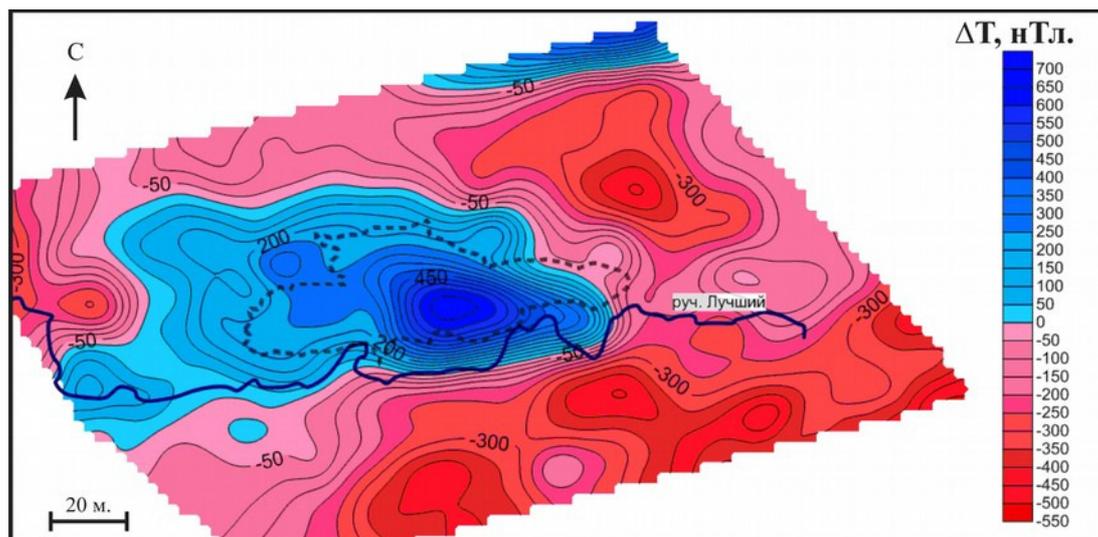


Рис. 7. Карта распределения значений аномального магнитного поля ΔT_a на В-Паужетском т/п

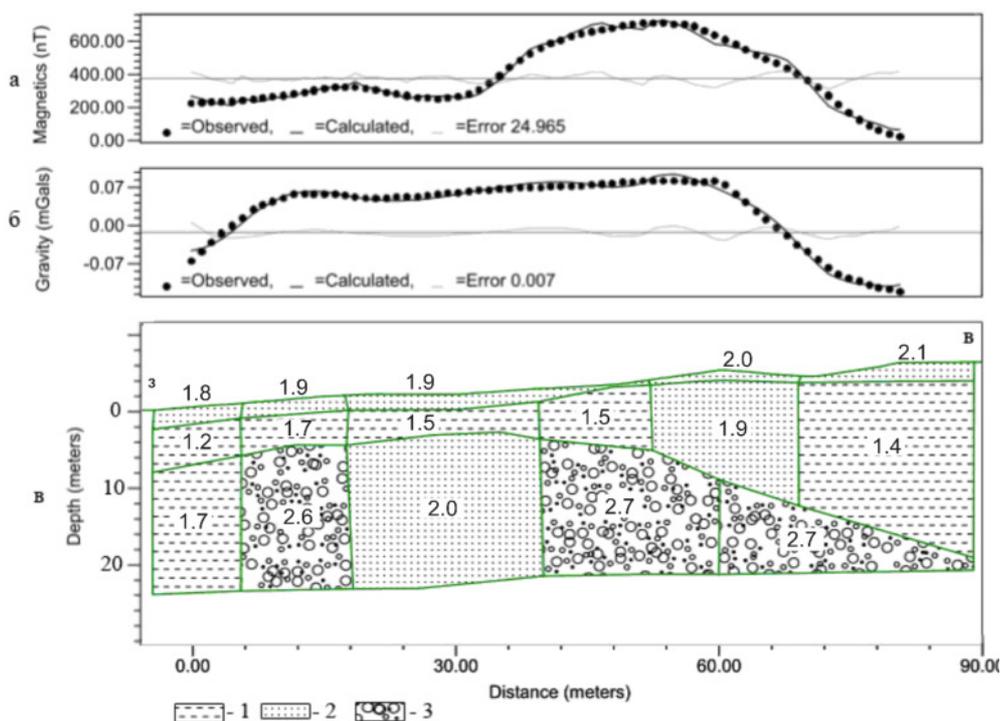


Рис. 8. Результаты моделирования структуры Восточно-Паужетского т/п по гравимагнитным исследованиям с использованием литологических данных. Выделены группы блоков (слои) с плотностью: 1 – 1.2-1.8 г/см³, 2 – 1.8-2.1 г/см³, 3 – 2.6-2.7 г/см³. Цифрами на модели отмечены плотности каждого блока

Проведено моделирование с использованием имеющихся данных электроразведки и магниторазведки. На рис. 8 показаны практические кривые магнитного (а) и гравитационного (б) полей и теоретические кривые, соответствующие параметрам блоковой модели. На графиках

также указана кривая ошибки между теоретической и практической кривыми. В результате получена блоковая плотностная модель по профилю 3 (показан треугольниками на рис. 2б), состоящая из 16 блоков (см. рис. 8в).

Все блоки можно разделить на 3 группы (слоя). Верхняя группа состоит из 5 блоков. Они имеют плотность 1.8-2.1 г/см³, магнитную восприимчивость 0.0008-0.0002 СГС, совпадают с электроразведочными слоями «а, б», имеющими удельное электрическое сопротивление 10 - 40 Ом*м. Данная группа блоков характеризует приповерхностную толщу глин двух горизонтов - сернокислотного выщелачивания и влажных тугопластичных. Это подтверждается данными геологического разреза [8].

Средняя группа состоит из 6 блоков. Эти блоки имеют плотность 1.2-1.8 г/см³, магнитную восприимчивость 0.00006-0.002 СГС, совпадают с электроразведочным слоем «в, г», имеющим удельное электрическое сопротивление 2.5-6 Ом*м. Данная группа блоков характеризует, по-видимому, парогазонасыщенную толщу аргиллизированных пород, включающих также отдельные минерализованные рудные зоны в горизонте «сухих» гидротермальных глин. Здесь выделяется контрастный блок с плотностью 1.9 г/см³, который, возможно, является барьером для движения гидротерм.

Нижняя группа состоит из 5 блоков. Они имеют плотность 2.6-2.7 г/см³, магнитную восприимчивость 0.0057- 0.007 СГС, совпадают с электроразведочным слоем «д», имеющим удельное электрическое сопротивление 10-20 Ом*м. В слое выделяются два блока: плотностью 1.7 г/см³ в западной части модели и 2.0 г/см³ в центральной части. Это может свидетельствовать о наличии на этих участках в основании разреза разуплотненных зон, проницаемых для гидротермальных растворов.

Обсуждение результатов

На основании магнитометрических данных выделяется крупная неоднородность в центральной части Восточно-Паужетского т/п. Предполагается, что она может быть обусловлена внедрением субинтрузивного тела основного или среднего состава с образованием приподнятого блока пород, контролирующего положение Восточно-Паужетского т/п. Вероятно, разгрузка парогидротерм приурочена к приближенной к дневной поверхности кровле этого остывающего магматического тела.

На основании анализа электроразведочных данных и распределения температур грунтов выделяются зоны повышенной проницаемости для гидротермальных растворов и паро-газовой смеси вблизи дневной поверхности. Они имеют сложное строение и образуют 4 группы: центральную, западную, северо-западную и северо-восточную. Наиболее мощная из этих зон - центральная с температурами грунтов до 101 °С и значениями ЕП до 30 мВ. Сопоставление результатов наших температурных съемок с выполненными ранее показало, что температурный режим Восточно-Паужетского т/п фактически не изменился за прошедшие 50 лет. Это, в свою очередь, свидетельствует об отсутствии влияния эксплуатации геотермального месторождения на данный участок Паужетской гидротермальной системы, в то время, как в цен-

тральной части месторождения только за период с 1966 по 1992 гг. температуры паро-газовой смеси в скважинах упали на 20-25 °С [10].

Комплексное геофизическое моделирование и увязка данных с литологическим разрезом показало, что Восточно-Паужетское т/п до глубины ≥ 25 м имеет слоистую структуру, обусловленную чередованием контрастных по физическим свойствам пород: влажных гидротермальных глин в верхней части; минерализованных рудоносных зон в горизонте «сухих» глин при переходе от глинистой толщи к жестким грунтам (коренным породам); трещиноватых пород, насыщенных солеными растворами (паро-газовой смесью ?); менее обводненных пород в основании разреза. Выделяется также система вертикальных блоков пород, наиболее разуплотненные из которых, по-видимому, контролируют разгрузку парогидротерм.

Авторы благодарят зав. лаб. геотермии ИВиС ДВО РАН д.г.-м.н. С.Н. Рычагова за постановку задачи и практическую помощь в выполнении работы. Выражаем искреннюю признательность всем сотрудникам Южнокамчатско-Курильской экспедиции ИВиС ДВО РАН, а также О.В. Толстых и О.Н. Семеновой за содействие исследованиям.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-05-00007а) и Президиума ДВО РАН (проект 15-1-2-065).

Список литературы

1. Белоусов В.И., Сугробов В.М., Сугрובה Н.Г. Геологическое строение и гидрогеологические особенности Паужетской гидротермальной системы // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 23-57.
2. Гонсовская Г.А. Состояние вулкана Кошелева летом 1951 г. // Бюлл. Вулк. станций. 1954. № 21. С. 14-18.
3. Набоко С.И. Гидросольфатары Дикого гребня // Бюлл. Вулк. станций. 1954. № 22. С. 59- 64.
4. Нуждаев И.А., Феофилактов С.О. Зимние магнитометрические исследования на Паужетском геотермальном месторождении: методика, краткие результаты // XII Региональная молодёжная научная конференция « Исследования в области наук о Земле». 25 ноября 2014г. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2014. С. 75-84.
5. Паужетские горячие воды на Камчатке. М.: Наука, 1965. 208 с.
6. Рычагов С.Н., Давлетбаев Р.Г., Ковина О.В. и др. Миграция катионов в гидротермальных глинах: к вопросу о металлоносности газо-гидротермальных флюидов геотермальных месторождений Южной Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2012. № 4. С. 23-36.
7. Рычагов С.Н., Нуждаев А.А., Степанов И.И. Поведение ртути в зоне гипергенеза геотермальных месторождений (Южная Камчатка) // Геохимия. 2009. № 5. С. 533-542.
8. Рычагов С.Н., Сергеева А.В., Чернов М.С., Философова Т.М. Глобули различного состава в толще гидротермальных глин Восточно-Паужетского термального поля (Южная

Камчатка): к вопросу об источниках фосфора и транспорте металлов // Материалы ежегодной конференции, посвящённой Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2015. С. 282-285.

9. *Святловский А.Е., Иванов В.В., Нехорошев А.С.* Гидротермы района вулканов Кошелева и Камбального на южной Камчатке. Отчет геотермической экспедиции. М.: Академия наук СССР лаб. Вулканологии, 1956. С 187-277.
10. Структура гидротермальной системы. М.: Наука, 1993. 298 с.
11. *Таусон В.Л., Рычагов С.Н., Акимов В.В. и др.* Роль поверхностных явлений в концентрировании некогерентных элементов: золото в пиритах гидротермальных глин термальных полей Южной Камчатки // *Геохимия*. 2015. № 11. С. 1000-1014.