

УДК 550.360+550.814

Горный В.И.¹, Селезнев Г.А.², Тронин А.А.¹ (1 — НИЦЭБ РАН, 2 — ООО «ПодземБурСтрой»)

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ПОИСКОВ СЛАБОТЕРМАЛЬНЫХ ВОД

*Рассмотрена гидростатическая модель формирования слаботермальных вод И.И. Никшича. Показано, что при скоростях подъема подземных вод >10–7 м/с на поверхности над разломами формируются нагретые на первые градусы линейные зоны. Сделан вывод о том, что тепловая космическая съемка облегчает поиски слаботермальных вод и расширяет географию использования геотермальной энергии Земли за пределы регионов с современной вулканической активностью. На этой основе и по данным съемок спутниками Terra (MODIS) и Landsat TM (ETM+) на Южном Урале были пробурены мелкие скважины, давшие достаточные притоки слаботермальных вод. **Ключевые слова:** геотермальная энергия, тепловой насос, термальные воды, генезис, восходящие флюиды, тепловая космическая съемка.*

Gornyy V.I.¹, Seleznev G.A.², Tronin A.A.¹ (1 — SRCES RAS, 2 — PodzemBurStroi)

APPLICATION OF INFRARED-THERMAL SATELLITE FLOW SURVEY ON THE LOW TEMPERATURE THERMAL WATER EXPLORATION

*The I.I. Nikshich hydrostatic model of low temperature hot water springs formation is used. We demonstrated that underground waters, uplifting along tectonic faults with the speed higher than 10–7 m/s, could heat a surface up to few degrees of Centigrade. Thus, the infrared-thermal satellite flown survey provides possibility to explore effectively the low temperature thermal water resources outside of regions of modern volcanic activity. As a result, specially drilled shallow boreholes at the territory of South Ural Mountain Ridge produced enough output of low temperature thermal waters. **Key words:** geothermal energy, heat pump, thermal waters, genesis, uplifting fluids, infrared-thermal satellite survey.*

Снижение прироста запасов традиционных топливно-энергетических видов полезных ископаемых вызывает интерес к нетрадиционным, экологически чистым видам энергии. С 2000 по 2004 г. в мире наблюдался почти 13%-ный годовой рост использования геотермальной энергии. В результате установленная тепловая мощность этого вида энергии составила почти 30 000 МВт. При этом 33 % всего объема добытой геотермальной энергии было израсходовано для отопления домов, оборудованных тепловыми насосами [1]. Это указывает на чрезвычайную актуальность разработок, направленных на повышение эффективности тепловых насосов.

Известно, что геотермальная энергия на территории России распределена крайне неравномерно [7]. Наибо-

лее обеспечены этим видом энергии районы современного вулканизма, имеющие значительные запасы перегретых и высокотермальных вод, например, Камчатка, Курилы, Кавказ. На остальной территории России могут быть выявлены и использованы только слаботермальные воды, температура которых не превышает +40 °С.

При обогреве домов тепловыми насосами часто используются грунтовые и подземные воды из неглубоких скважин. При этом, чем ближе температура воды, забираемой тепловым насосом из скважины, к оптимальной температуре отопляемого помещения (в зимнее время года +20 ÷ +22 °С), тем выше коэффициент эффективности теплового насоса, под которым понимается соотношение количества вырабатываемой тепловой энергии к потребляемой электрической. Поэтому отопление домов подземными водами с температурой даже на несколько градусов большей, чем у подземных вод на уровне нейтрального слоя, сулит повышение конкурентоспособности тепловых насосов. Например, если для обогрева полов в доме необходима температура теплоносителя +35 °С и среднегодовая температура подземных вод на уровне нейтрального слоя в регионе составляет +5 °С, то слаботермальные воды с температурой +10 °С повысят коэффициент эффективности теплового насоса с 3,8 до 4,5. При этом проблема заключается в том, что на большей части территории России подземные воды чаще всего имеют температуру, близкую к температуре пород на уровне нейтрального слоя. Поэтому для повышения эффективности тепловых насосов либо требуется бурение глубоких скважин, либо необходим поиск мест разгрузки слаботермальных вод. Но отопление домов слаботермальными водами тормозится недостаточной научной проработкой поисково-разведочных комплексов. В связи с этим целью настоящей статьи является научное обоснование экономически эффективного метода поисков слаботермальных вод на территориях, где отсутствует современная вулканическая активность.

1. Предпосылки поисков слаботермальных вод в тектонически стабильных регионах

1.1. Модель формирования слаботермальных вод. Хотя Н.М. Фроловым отмечалось, что в земной коре вода является самым эффективным теплоносителем и подземные воды играют ведущую роль в формировании температуры приповерхностных отложений, формирование термальных вод чаще связывают с остывающими интрузиями. Это ограничивает ареал использования геотермальной энергии районами современной вулканической активности. Например, по данным исследований, проведенных в середине XX в. [3], на всей территории Восточно-Европейской платформы и Западно-Сибирской плиты глубина залегания изотермической поверхности +20 °С варьирует от 250 до 1000 м, что указывает на необходимость бурения относительно глубоких скважин для отопления слаботермальными водами домов в этих регионах. Тем не менее на севере

Европейской части России, в Большеземельской тундре (урочище Пымвашор) недавно описаны источники слаботермальных вод с температурой от +18,0 до +28,5 °С [5]. В связи с этим встает вопрос о механизме формирования слаботермальных вод в стабильных в тектоническом плане регионах.

Еще в 1920-х годах И.И. Никшичем были изучены термальные водоисточники предгорного разлома Копетдага, температура которых варьирует от +19,5 до +36 °С. Результатом этих исследований явилась гидростатическая модель формирования подземных вод [4]. И.И. Никшичем было отмечено, что приподнятые над предгорной равниной трещиноватые известняки Копетдага являются областью просачивания метеорных вод. Эти воды, опускаясь на значительную глубину, нагреваются и мигрируют в сторону Копетдагского предгорного разлома, поднимаясь по нему под действием гидростатического давления, соответствующего разнице высот областей просачивания на хребте и мест разгрузки в зоне предгорного разлома (рис. 1). Многочисленные проявления этих слаботермальных вод вскрыты сетью кяризов (наклонных подземных галерей), входивших в исторические времена в ирригационную систему. В зоне Копетдагского предгорного разлома известно подземное оз. Кюв-Ата в Бахарденской пещере, температура воды которого составляет +36,7 °С [4].

К сожалению, в течение продолжительного времени работы И.И. Никшича недооценивались. Тем не менее к такой же модели недавно пришли немецкие специалисты при объяснении механизма образования термальных вод Шварцвальда [11]. В.А. Голубевым на основании измерений придонной температуры и других характеристик вод Байкала также принята гидростатическая модель формирования термальных вод в северной части озера.

Результаты этих исследований явились поводом для проведения теоретического обоснования и экспериментальной верификации возможности применения тепловой аэрокосмической съемки для поисков слаботермальных вод.



Рис. 1. Гидростатическая модель формирования линии термальных источников Копетдага. По И.И. Никшичу [4]. 1 — Предкопетдагский разлом (линия термальных источников); 2 — водоупор (кварцевые песчаники); 3 — известняки сильно трещиноватые; 4 — воды метеорные; 5 — потоки подземных вод; 6 — потоки восходящих слаботермальных вод. h — высота над уровнем Предгорной равнины

1.2. Основные закономерности нагрева дневной поверхности подземными водами, восходящими по зонам разломов. В земных недрах действуют два основных физических процесса передачи тепла — кондуктивная теплопередача и тепломассоперенос. При этом в одномерном случае плотность теплового потока q может быть представлена в виде [10]:

$$q = (1 - \mu) q_{cd} + \mu(q_f + q_{conv}); \quad (1)$$

$$q_{cd} = -\lambda dT(h)/dh;$$

$$q_f = c\rho vT(h);$$

$$q_{conv} = -\lambda_{eff} dT(h)/dh,$$

где q_{cd} — кондуктивный тепловой поток, Вт/м²; q_f и q_{conv} — тепловые потоки, вызванные соответственно вынужденной и свободной конвекцией, Вт/м²; $T(h)$ — температура на глубине h , К; h — глубина измерений, м; λ — коэффициент теплопроводности породы, Вт/(м К); ρ и c — соответственно плотность (кг/м³) и удельная теплоемкость (Дж/(кг К)) флюида; v — скорость подъема флюида, м/с; μ — удельная площадь связанной пористости, доли ед.; λ_{eff} — эффективный коэффициент теплопроводности, обусловленный свободной конвекцией, Вт/(м·К), который определяется как

$$\lambda_{eff} = \varepsilon \lambda_f,$$

где ε — коэффициент свободной конвекции ($\varepsilon = f(Gr, Pr)$, где Gr и Pr — безразмерные комплексы Грасгофа и Прандтля); λ_f — коэффициент теплопроводности флюида. Для подземных вод в тектонических зонах растяжений коры с характерными размерами порядка $k \cdot 100$ м (k — первые единицы) $\varepsilon = n \cdot 10$ ($10 > n > 1$) [6]. В этом случае $\lambda_{eff} \gg \lambda_f$.

Граничное условие в форме теплоотдачи на земной поверхности выбираем в форме закона Ньютона. Это отличает нашу постановку краевой задачи от постановки, как правило, применяемой в глубинной геотермии, когда на земной поверхности используется краевое условие первого рода, т.е. температура поверхности фиксируется. В реальности же на земной поверхности действует баланс потоков тепла, который в первом приближении и описывается законом Ньютона. Тогда, если $h = 0$ (земная поверхность), то $q(0) = \alpha[t_a - T(0)]$, где α — коэффициент теплообмена, Вт/(м² К); t_a — температура воздуха, К. В случае вертикального подъема флюидов их стационарная температура описывается следующим дифференциальным уравнением [10]:

$$d^2 T/dh^2 - (\rho cv/\lambda_{eff}) dT/dh = 0. \quad (2)$$

В рамках гидростатической модели И.И. Никшича (рис. 1) предположим, что подземные воды поднимаются к дневной поверхности по проницаемой зоне разлома с глубины $h = H$. При этом $T_0(H)$ — температура горных пород на глубине H . Если $t_a = 0$, то решение уравнения (2) имеет вид [10]:

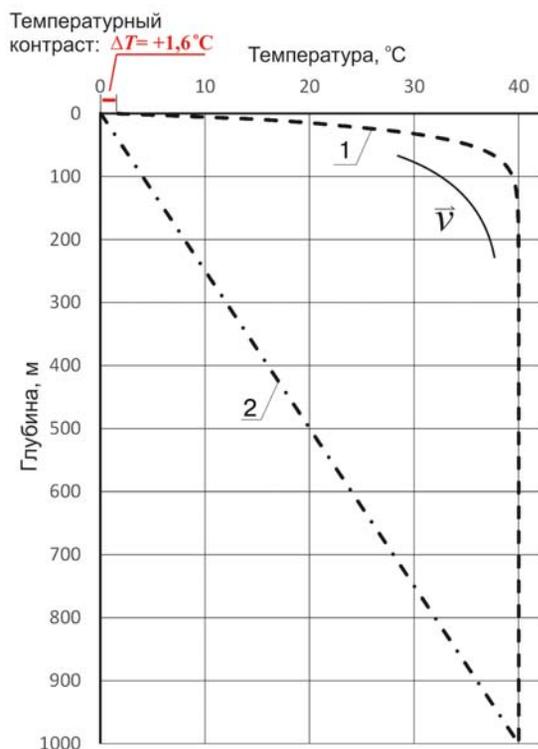


Рис. 2. Результаты расчета вертикального распределения температуры пород при различных режимах движения подземных вод. Условия расчета: $t_a = 0\text{ }^\circ\text{C}$; температура недр на глубине 1000 м $T_g = 40\text{ }^\circ\text{C}$; $\lambda_{\text{eff}} = 10\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $\alpha = 10\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$. 1 — скорость восходящего потока подземных вод v ($v = -1\cdot 10^{-7}\text{ м/с}$); 2 — кондуктивная теплопередача при отсутствии тепло-массопереноса

$$T(h) = T_g[1 - p \cdot \exp(\beta h)]/[1 - p \cdot \exp(\beta H)], \quad (3)$$

где $p = (1+1/St)$; $\beta = \rho c v / \lambda_{\text{eff}}$; $St = \alpha / \rho c v$ — критерий подобия Стентона.

Анализ уравнения (3) показывает зависимость степени нагрева земной поверхности от скорости подъема подземных вод. Температура земной поверхности будет выше в местах, где в коре наблюдается более высокая скорость подъема подземных вод. Над местами с интенсивным теплопереносом при скоростях подъема подземных вод порядка 10^{-7} м/с и выше на земной поверхности следует ожидать наличие положительных температурных контрастов по отношению к окружающим территориям, достигающих первых градусов (рис. 2). При этом кривая вертикального распределения температуры в коре будет выпуклой (1 на рис. 2).

Современные съемочные системы дистанционного зондирования Земли, работающие в инфракрасном тепловом диапазоне спектра электромагнитных волн, такие как спутрорадиометр MODIS или ТМ(ETM+), установленные соответственно на спутниках Terra/Aqua и Landsat, имеют температурную чувствительность не хуже $0,2\text{ К}$. Если в рамках гидростатической модели скорость восходящих по открытым разломам потоков подземных вод превышает 10^{-7} м/с (кривая 2 на рис. 2), то следует ожидать, что над такими разломами тепловая космическая съемка должна регистрировать линейные термальные зоны, нагретые на несколько градусов по отношению к окружающей территории. Соответствен-

но подземные воды в таких зонах могут считаться слаботермальными. Это открывает возможность разработки технологии экономически эффективного поиска слаботермальных вод в районах, где геологическое строение и рельеф дневной поверхности позволяют реализовать гидростатическую модель формирования термальных вод.

2. Материалы и методы

Для доказательства распространенности слаботермальных подземных вод за пределами районов современной вулканической активности были использованы материалы тепловой космической съемки спутниками NOAA(AVHRR) и Terra/Aqua(MODIS). Основными техническими характеристиками этих съемочных систем являются: температурная чувствительность порядка $0,10\text{--}0,15\text{ К}$; при съемке в надире геометрическое разрешение на местности в тепловых каналах $\sim 1,1\text{ км}$; ширина полосы съемки $2300\text{--}2700\text{ км}$. Эти спутники выполняют съемку каждой точки поверхности Земли не менее 2 раз в сутки. Восстановление температуры поверхности выполнялось с помощью алгоритма разделенных окон, позволяющего учесть поглощение инфракрасного излучения в атмосфере.

Для выявления предполагаемых локальных мест развития слаботермальных вод на Южном Урале использованы тепловые снимки спутника Landsat 7. Температурная чувствительность и геометрическое разрешение на местности датчиков инфракрасного теплового канала сканера, установленного на спутнике, составляет соответственно $0,2\text{--}0,3\text{ К}$ и 90 м при ширине полосы съемки 185 км . Для минимизации экзогенных помех (переменных температурных контрастов, вызванных солнечным нагревом земных покровов с различной тепловой инерцией) и более надежного картирования мест постоянного эндогенного нагрева дневной поверхности восходящими слаботермальными подземными водами были подобраны тепловые космические снимки, полученные в периоды весенней и осенней инверсий переменных температурных контрастов.

Наземная заверка результатов тепловой космической съемки Предкопетдагского разлома выполнялась инфракрасным радиационным термометром ПИР-1 конструкции ЛЭТИ, смонтированным на автомобиле Газ-66Т (топопривязчик). Температурная чувствительность датчика — не хуже $0,1\text{ К}$. Датчик радиационного термометра был закреплен с правой стороны на стреле на расстоянии 2 м от борта автомобиля. Высота крепления датчика обеспечивала диаметр поля зрения радиометра в 2 м . Регистрация велась на каротажный самописец Н381. Скорость движения автомобиля по профилю подбирались таким образом, чтобы время съемки не превышало 20 мин . После завершения маршрута автомобиль возвращался в начало профиля и измерялся временной уход температуры, который затем линейно выбирался из результатов измерений по профилю.

Для измерений вертикального распределения температуры воды в водоемах Челябинской области использовался электротермометр ТСЭм-d-200 с чувствительностью измерения $0,1\text{ }^\circ\text{C}$.

3. Верификация теоретических предпосылок применения тепловой космической съемки для поисков слаботермальных вод

Для проверки теоретических предпосылок поисков слаботермальных вод тепловой космической съемкой были подобраны ночные тепловые космические изображения Предкопетдагского разлома, Рейнского грабена, Южного Урала. Для минимизации температурных контрастов, вызванных годовыми тепловыми ритмами использованы снимки осеннего времени года. Далее по ним были построены карты температур земной поверхности.

3.1. Предкопетдагский разлом. На карте ночной температуры земной поверхности Копетдагского хребта и предгорной равнины (рис. 3) линейной зоной повышенной температуры индицируется Предкопетдагский разлом. На космическом тепловом снимке температурный контраст между зоной разлома и окружающими областями достигает $+3 \div 4$ °С. Известно, что в ночное время суток кроме геотермальных областей положительными температурными контрастами характеризуются земные покровы, обладающие высокой тепловой инерцией. К таким объектам относятся, например, пласты галита в сухих соляных озерах, залегающие на дне Карашорской впадины (3 на рис. 3А), водоемы (4 на рис. 3А). Линейная форма зоны повышенной на $+3 \div 5$ °С температуры земной поверхности по отношению к температуре предгорной равнины позволяет опознать Предкопетдагский разлом на фоне других положительных температурных контрастов, индицирующих объекты с высокой тепловой инерцией. Автомо-

бильная тепловая съемка по профилю I-II (врезка на рис. 3Б), подтвердила результаты космической тепловой съемки. Земная поверхность над Предкопетдагским разломом в районе Ашхабада нагрета на $+3,5$ °С выше, чем на окружающих территориях. Это значение положительного температурного контраста находится в интервале, полученном по результатам спутниковых наблюдений (2 на рис. 3А).

Таким образом, комплексный анализ вышеизложенных теоретических представлений с результатами спутниковых и наземных наблюдений температуры земной поверхности позволяет сделать вывод о том, что в соответствии с гидростатической моделью формирования Копетдагской линии термальных источников Предкопетдагский разлом индицируется положительным температурным контрастом в $+3 \div 4$ °С.

3.2. Верхнерейнский грабен. Этот грабен при ширине 30–40 км протягивается с юга на север на расстояние около 300 км до тройного сочленения с Нижнерейнским и Гессенским грабенами. Грабен заполнен послемеловыми осадочными породами и вулканитами мощностью до 3500 м. Максимальная амплитуда опускания фундамента в его центральной части достигает 4500 м. Поверхность Мохо приподнята под днищем этой структуры до 24 км. Считается, что под днищем грабена имеется магматический очаг [9]. С грабеном ассоциирует район четвертичного вулканизма. Последнее крупное извержение в районе Эйфеля произошло около 13 000 лет тому назад.

С бортов грабен ограничен системой разломов (рис. 4Б), по которым известны проявления слаботер-

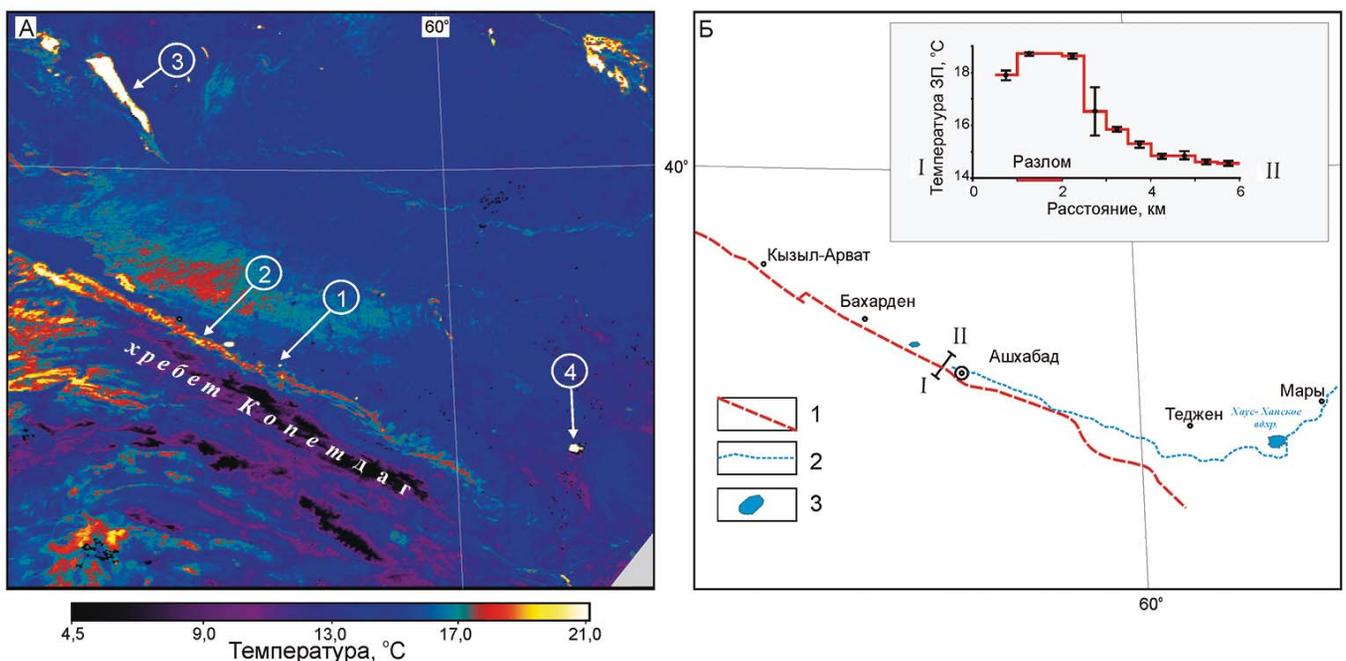


Рис. 3. Проявление линии термальных источников Копетдага в температуре земной поверхности: А — карта ночной температуры земной поверхности территории Копетдага и предгорной равнины, полученная по результатам съемки спутником Terra (MODIS), выполненной 19.09.2012 г.: 1 — г. Ашхабад; 2 — Предкопетдагский разлом в месте расположения Бахарденской пещеры с подземным озером, заполненным слаботермальными водами; 3 — Карашорская впадина, заполненная галитовым сухим озером; 4 — Хауз-Ханское водохранилище. Б — схема расположения Предкопетдагского разлома: 1 — Предкопетдагский разлом [8]; 2 — Каракумский канал; 3 — водохранилища. На врезке приведены результаты автомобильной ИК-тепловой съемки по профилю I-II, пересекающему Предкопетдагский разлом

Таблица 1
Результаты измерений при откачках подземных вод из скважин

Время откачки, мин	Температура воды, °С	
	скв. 102	скв. 127
1	+9,9	+9,2
2	+10,0	+9,4
3	+10,6	+9,8
4	+10,4	+9,6
5	+10,2	+9,4
10	+10,1	+9,2
∞	+9,9	+9,2
Без откачки	+9,2	+9,9

Примечание. Параметры скв. 102 и 127 соответственно: глубина забоя — 102 и 127 м; диаметр — 104 и 114,3 мм; расход воды при откачке — 2,3 и 1,8 м³/мин

мальных вод, например в районе Шварцвальда [11]. Борта грабена подняты в рельефе дневной поверхности на ~500 м. Клаузером [9] рассмотрены три механизма формирования термальных вод в Верхнерейнском грабене. В районах с низкой проницаемостью пород — до порога возникновения свободной конвекции — слаботермальные воды образуются под влиянием вынужденной конвекции, т.е. в соответствии с гидростатической моделью. Такие воды, как правило, разгружаются по разломам. При проницаемости пород в разломах выше указанного порога начинается свободная конвекция [6]. За пределами зон проницаемых разломов возможна только свободная конвекция. При высокой проницаемости пород во всем горном массиве свободная конвекция возникает по всей площади, а не ограничивается только зонами разломов. И. Стобер выполнено детальное гидрогеологическое изучение природы термальных вод Шварцвальда [11]. Модель формирования слаботермальных вод Шварцвальда по профилю I-II (рис. 4Б), предложенная И. Стобер, ничем не отличается от гидростатической модели И.И. Никшича, разработанной на примере Предкопедгагского разлома (рис. 1). Температура слаботермальных вод на устьях гидрогеологических скважин, пробуренных в ограничивающих с востока грабен разломах, составила +27 °С [11].

Таким образом, Верхнерейнский грабен выбран в качестве тестового участка для оценки возможностей применения тепловой космической съемки для поисков слаботермальных вод, так как в его пределах возможны все три механизма их формирования: нагрев остывающими интрузиями; свободная конвекция в осадочном комплексе; вынужденная конвекция в открытых разломах под

действием перепада высот между областями просачивания и разгрузки.

Анализ карты ночной температуры земной поверхности в районе Рейнского грабена (рис. 4А) показывает, что ограничивающие грабен разломы индицируются линейными положительными температурными контрастами, достигающими +4 °С, а температура земной поверхности на самых нагретых участках, например, в районе известных термальных источников Баден-Бадена (показаны стрелкой на рис. 4А) и Шварцвальда (профиль I-II на рис. 4Б), ночью составляла +22 °С. Это согласуется с тем, что температура слаботермальных вод Шварцвальда, разгружающихся на устьях скважин, расположенных вдоль разреза I-II, составляет +27 °С [11], т.е. воды с такой температурой вполне могут дополнительно нагревать земную поверхность на +4 °С. Линейная же форма температурных контрастов на земной поверхности указывает на ее нагрев слаботермальными водами, поднимающимися по разломам под действием вынужденной конвекции. При этом наблюдается почти полное совпадение линейных положительных температурных контрастов (рис. 4А) с разломами, ограничивающими грабен (рис. 4Б). Других положительных температурных контрастов (за исключением «тепловых островов» над крупными городами — Страсбургом, Франкфуртом) не наблюдается.

Таким образом, тепловая космическая съемка показывает, что если свободная конвекция и развита в Рейнском грабене, то либо она имеет явно подчиненное значение по сравнению с вынужденной, либо размеры конвективных ячеек меньше геометрического

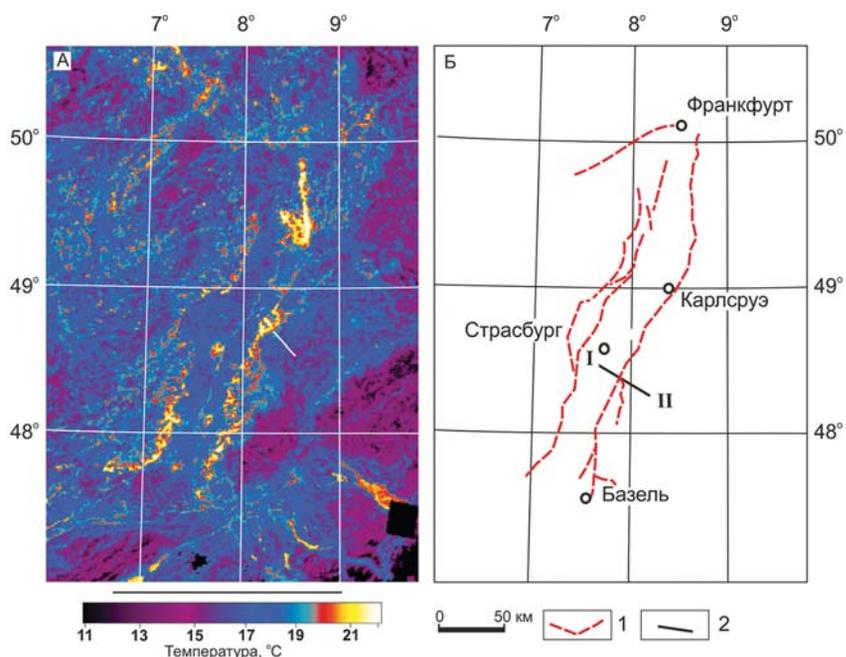


Рис. 4. Проявление тектонических элементов Рейнского грабена в температуре земной поверхности: А — карта ночной температуры земной поверхности территории грабена, полученная по результатам съемки спутником Terra (MODIS), выполненной 05.09.2013 г. (стрелкой показана область термальных источников Баден-Бадена). Б — схема разломов грабена [13]: 1 — крупнейшие разломы; 2 — линия гидрогеологического разреза по профилю I-II [11]

разрешения материалов тепловой космической съемки (около 1 км). На этом основании можно сделать вывод о том, что гидростатическая модель, разработанная на примере Предкопетдагского разлома, адекватно описывает механизм формирования слаботермальных вод, разгружающихся по ограничивающим Рейнский грабен разломам.

3.3. Южный Урал. Регион выбран для практической проверки возможности поисков слаботермальных вод на территориях, удаленных от областей современной вулканической активности. В практическом плане нахождение слаботермальных вод в районе Южного Урала позволило бы укрепить топливно-энергетический баланс региона путем использования тепловыми насосами этих вод для отопления домов.

Физико-географические и тектонические условия Южного Урала позволяют предположить возможность реализации механизма образования слаботермальных вод, описываемого гидростатической моделью. Во-первых, в регионе имеется достигающий 0,5 км перепад высот между осевой зоной Уральского хребта и предгорными областями. В пределах горной области выпадает до 700 мм осадков в год, что вполне достаточно для формирования значительных запасов подземных вод в зоне просачивания. Во-вторых, в регионе известна система глубинных разломов (рис. 5Б), включающая и Главный Уральский разлом, которые потенциально могут служить каналами для подъема и разгрузки слаботермальных вод.

Среднегодовая температура горных пород на уровне нейтрального слоя в этом регионе колеблется от +3 °С в горной области до +5 °С в районе Челябинска, глубина залегания нейтрального слоя меняется от 5 до

15 м [3]. Соответственно подземные воды на этих глубинах имеют температуру +3 ÷ +5 °С. Поэтому, как уже отмечалось, нахождение слаботермальных вод позволило бы повысить эффективность системы отопления домов.

Анализ карты ночной температуры земной поверхности (рис. 5А) позволяет выявить несколько нагретых линейных зон, температурный контраст которых по отношению к окружающей территории достигает +5 °С. Сравнение карты ночной температуры земной поверхности со схемой разломов в фундаменте показывает хорошее их пространственное совпадение. Например, Главный Уральский разлом в районе Златоуста индицируется линейной зоной положительного температурного контраста (отмечено черными стрелками на рис. 5Б). При этом совпадение отмечается не только с Главным Уральским разломом, но и с региональными и даже с зональными разломами. Это особенно отчетливо прослеживается на примере зональных разломов на западном краю исследуемой территории (зеленые стрелки на рис. 5Б). Наиболее нагретой линейной зоной отмечается участок регионального разлома, проходящий между Златоустом и Челябинском (коричневая стрелка на рис. 5Б).

Для выполнения наземной заверки результатов тепловой космической съемки была выбрана территория Челябинского грабена (рис. 5Б). Для более точного выбора участков для наземных исследований были использованы результаты весенней и осенней тепловых съемок, выполненных спутником Landsat TM (рис. 6). На тепловые снимки была наложена контуры озер, снятых с карты, и температура анализируется только в пределах акватории озер. Как следует из рис. 6, все

озера могут быть разбиты на две группы. Первая — озера, у которых в течение года наблюдается закономерная инверсия температур, т.е. если осенью их поверхность более прогрета по сравнению с остальными, то весной они являются более холодными, и наоборот (отмечены белыми стрелками на рис. 6). Инверсия температурного контраста указывает на то, что основной источник тепла — экзогенный (внешний нагрев солнечным излучением) и озера обладают различной тепловой инерцией. В результате они в разное время нагреваются весной и остывают осенью. Если же как весной, так и осенью поверхность озер характеризуется более высокой по сравнению с остальными водоемами температурой, то это является признаком поступления в такие озера эндогенного те-

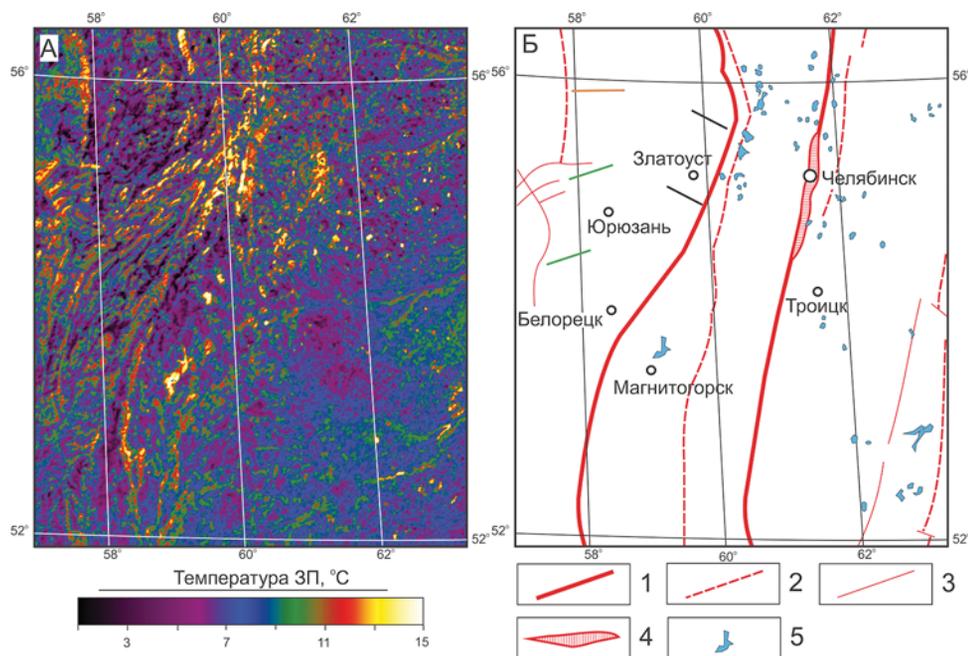


Рис. 5. Проявление тектонических элементов Южного Урала в температуре земной поверхности: А — карта ночной температуры земной поверхности на территории Южного Урала, полученная по результатам съемки спутником Terra(MODIS), выполненной 19.09.2010 г.; Б — схема расположения разломов фундамента на этой территории (по Тектонической карте..., 1969): 1–3 — разломы: 1 — платформные, 2 — региональные, 3 — зональные; 4 — Челябинский грабен [8]; 5 — крупные водоемы

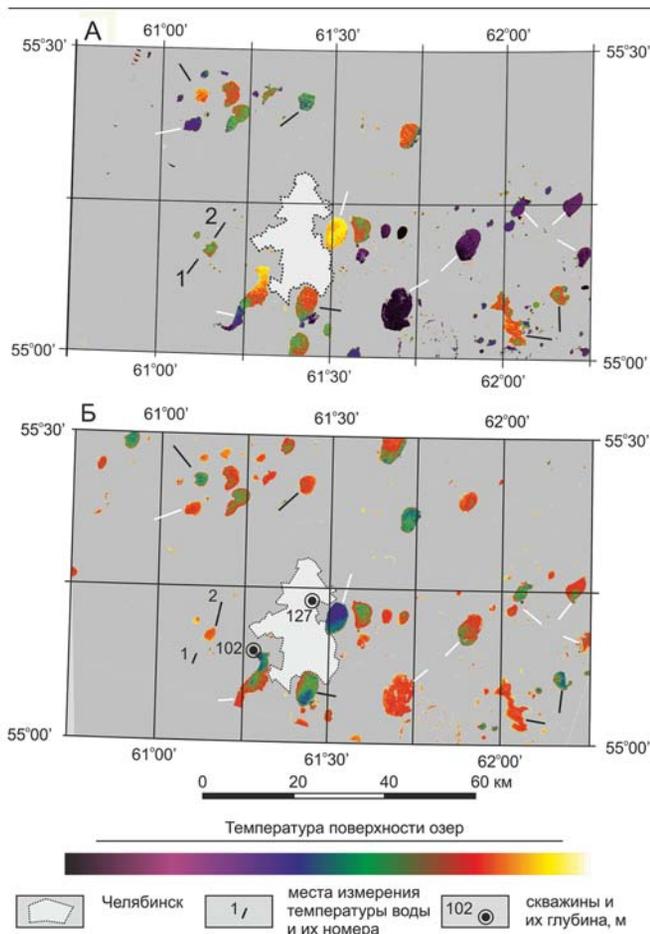


Рис. 6. Температура поверхности озер в районе Челябинска по данным осенней (А — 07.10. 2004 г.) и весенней (Б — 11.05.2011 г.) съемки спутником Landsat TM(ETM+)

пла, переносимого восходящими по разломам слабостермальными водами (показаны черными стрелками на рис. 6). Для измерения температуры вод в таких озерах был выбран гранитный карьер глубиной 21 м, заполненный водой (1 на рис. 6), и оз. Кременкуль с максимальной глубиной около 6 м (2 на рис. 6). Поверхность воды в карьере весной и осенью более нагрета по сравнению с оз. Кременкуль, а лед в карьере сходит на 16 дней раньше, чем в озере.

Измерения и анализ вертикального распределения температуры воды в карьере показали, что в верхней части до глубины 3 м имеется слой воды, имеющий более высокую температуру, чем на той же глубине в оз. Кременкуль, а у самого дна карьера температура воды начинает повышаться. Подобный же нагретый слой воды в верхней части озер нами наблюдался ранее на Большом Соловецком острове в районе Ботанического сада. Там же на теплых озерах отмечен и опережающий, по сравнению с другими озерами, сход ледового покрова. Поэтому было изучена динамика схода ледового покрова на выделенных водоемах. 15.03.2014 г. на искусственном водоеме, расположенном недалеко от карьера, толщина льда была 16 см, а на оз. Кременкуль она оказалась 72 см; 23.04.2014 г. фотографированием задокументировано уже полное отсутствие льда в указанном искусственном водоеме,

в то же время оз. Кременкуль было покрыто крепким сплошным ледяным покровом, на котором рыбаки ловили рыбу. На этом основании было сделано предположение, что в пределах Челябинского грабена в ряде озер существует субаквальная разгрузка слабостермальных вод, которые в период, свободный от льда, поднимаются к поверхности и формируют слой воды с повышенной температурой. Для проверки этого предположения были пробурены две скважины (102 и 127, рис. 6Б). В результате, полученные значения температуры воды почти на 5 °С выше, чем температура пород на уровне нейтрального слоя, что позволяет отнести такие воды к слабостермальным, так как стандартно в районе Челябинска температура подземных вод на глубине 125 м составляет +7,5 °С [3]. Соответственно при использовании для обогрева дома теплового насоса коэффициент его эффективности повысится с 3,8 до 4,5 по сравнению со случаем грунтовых вод, имеющих температуру нейтрального слоя.

При откачках получены дебиты вод, достаточные для обогрева домов тепловыми насосами. Так, при дебите около 2 м³/мин и при превышении температуры вод на 5 °С по сравнению с грунтовыми или по сравнению с отбором тепла из почвы может быть дополнительно подано в систему обогрева около 700 Вт тепловой энергии.

Исходя из результатов испытаний скважин, следует отметить, что тепловая космическая съемка вместе с натурными наблюдениями за сходом ледового покрова на водоемах позволяет выявлять места восходящих потоков слабостермальных подземных вод.

4. Обсуждение результатов

Результаты бурения и испытания скважин подтвердили универсальность гидростатической модели формирования слабостермальных вод, которая реализуется даже в регионах, где не наблюдается современная вулканическая и интрузивная активность.

Высокие дебиты, полученные при бурении опытных скважин, указывают на еще одно преимущество такого подхода. Ведь основным недостатком при использовании тепловых насосов, питаемых обычными подземными водами, является быстрое падение съема тепла из горного массива из-за значительного превышения объема откачки вод тепловым насосом над объемом подземных вод, поступающих в горный массив под действием обычной фильтрации. В зонах же разломов скорости фильтрации на порядки выше [11, 12], чем в ненарушенных осадочных породах. Поэтому при использовании слабостермальных вод для отопления домов тепловыми насосами не следует ожидать значительного падения отъема тепла из горного массива.

Практическое же применение материалов тепловой космической съемки при поисках слабостермальных вод кардинально снижает стоимость работ. В настоящее время материалы тепловой космической съемки спутниками серий EOS (NOAA(AVHRR), Terra/Aqua(MODIS)) и Landsat TM(ETM+) доступны в открытых архивах. Поэтому затраты на применение этих материалов для поисков слабостермальных вод

включают только стоимость их обработки и анализа, что кардинально снижает затраты на поисковом этапе. В результате снижается себестоимость энергии, поставляемой тепловыми насосами для отопления помещений.

Следует отметить, что при поисках слаботермальных вод аэрокосмическая тепловая съемка обладает явным преимуществом перед методами приповерхностной геотермии, так как выполняет съемку практически мгновенно и с высоким и однородным геометрическим разрешением на местности. Как следует из вышеизложенного, температурные контрасты, которые формируются на земной поверхности восходящими слаботермальными водами, невелики и составляют первые градусы. В связи с этим их выявление на фоне значительно больших экзогенных тепловых помех (солнечный нагрев) в условиях неоднородности тепловых свойств земной поверхности является трудной задачей для стандартных методов прикладной геотермии. Как показывает наш опыт, только аэрокосмическая тепловая съемка позволяет решить эту задачу с наименьшими затратами.

Важным является вопрос: насколько широко в географическом плане могут быть распространены условия для формирования слаботермальных вод? Ответ может быть получен на основе анализа следующих факторов, необходимых для реализации гидростатической модели формирования слаботермальных вод: проницаемость геологической среды; наличие перепада высот между областями просачивания и разгрузки подземных вод; наличие водоупоров, перекрывающих водоносный горизонт.

Согласно теоретическим исследованиям (см. раздел 1.2), для того чтобы земная поверхность над разломами, по которым имеются восходящие потоки подземных вод, нагревалась на первые градусы по отношению к окружающим территориям, скорость этих по-

токов должна превышать 10^{-7} м/с. При данном условии такие потоки могут быть обнаружены тепловой космической съемкой. При достаточном гидравлическом напоре скорости подъема подземных вод по тектоническим нарушениям могут превышать 10^{-7} м/с, так как, например, в породах фундамента высокие коэффициенты фильтрации наблюдаются не столь уж редко (табл. 2).

Превышения рельефа дневной поверхности в несколько сотен метров и более между областями просачивания и разгрузки, которые обеспечивают реализацию гидростатической модели, отмечаются повсеместно. Отсюда следует вывод о том, что благоприятные геологические условия для образования в приповерхностных отложениях слаботермальных подземных вод встречаются часто, что подтверждается анализом материалов тепловой космической съемки, выполненной во многих регионах. Например, линейными зонами положительных температурных контрастов индицируются крупные тектонические элементы, такие как предгорные разломы Гималаев и Сулеймановых гор, в пределах которых известны источники термальных вод, разломы, ограничивающие Байкальский рифт и Таримскую впадину [2].

Полученные в Челябинском грабене незначительные превышения температуры подземных вод не исчерпывают возможностей предлагаемой технологии повышения эффективности тепловых насосов в системах отопления. Судя по результатам тепловой космической съемки всего Южного Урала (рис. 5) можно предположить, что при приближении к Главному Уральскому разлому температуры подземных вод в пределах термальных линий будут повышаться.

Все вышеприведенное определяет расширение возможности и повышает эффективность применения тепловых насосов в жилищном хозяйстве путем использования геотермальной энергии слаботермальных вод.

Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

В зонах разломов подъем под действием гидростатического давления нагретых в земных недрах вод со скоростями выше 10^{-7} м/с может приводить к повышению температуры дневной поверхности на несколько градусов и формированию «термальных линий».

Тепловая космическая съемка спутниками NOAA (AVHRR), Terra/Aqua (MODIS), Landsat TM (ETM+) является экономически эффективным методом обнаружения слаботермальных вод, разгружающихся на уровне грунтовых вод или в виде водоисточников. Это

Таблица 2

Коэффициенты фильтрации пород кристаллического фундамента в различных регионах мира [11, 12]

Регион	Глубина скважины, м	Породы	Логарифм коэффициента фильтрации $\lg K$
Южная Швеция	<450	Граниты	-10 ÷ -8
Центральная Швеция	<1232		-11 ÷ -8
Олкилутто, Финляндия*	<1000	Слюдистые гнейсы, подчиненно — граниты	-9 ÷ -8, местами до -5
Корнуолл, Великобритания	<2200	Граниты	До 700 м: -9 ÷ -5 (не зависит от глубины); ниже 700 м: -8 ÷ -7
Северо-запад Канадского щита	<550		-9 ÷ -7, возможно снижение с глубиной
Юг Канадского щита	<1000		-13 ÷ -4, репрезентативное: -7
Юг Германии	<4444	Гнейсы	-9
Бавария, Германия	<4000	Амфиболиты	-8
Шварцвальд, Германия	<1000	Граниты, гнейсы	-9 ÷ -4
Эльзас, Франция	<5000	Граниты	-13 ÷ -6
Южная Калифорния, США	<2077	Гнейсы	-12 ÷ -9, репрезентативное: -11

*Жирным шрифтом выделены регионы, в пределах которых отмечены значения логарифмов коэффициентов фильтрации, равные или превышающие -7.

обеспечивает существенное расширение географии практического использования геотермальной энергии.

Восходящие по разломам потоки слаботермальных вод могут быть использованы в качестве источника тепловой энергии в домах, оборудованных системами обогрева на основе тепловых насосов для повышения их эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богуславский Э.И., Смирнова Н.Н. Гидрогеотермальные приповерхностные теплонасосные установки индивидуального теплоснабжения // Горный информац.-аналит. бюл. — 2006. — № 9. — С. 284–293.
2. Вилор Н.В., Абушенко Н.А., Тащилин С.А. и др. Применение данных дистанционного зондирования при исследовании инфракрасного излучения земной поверхности в областях интенсивного движения блоков литосферы Центрально-Азиатского складчатого пояса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2007. — Т. 4. — № 2. — С. 134–140.
3. Гидрогеотермический атлас СССР (зона активного водообмена) / Под ред. Н.М. Фролова. — Л.: ВСЕГЕИ, 1983.
4. Никшич И.И. Копетдагская линия термальных источников // Вестник ирригации. — 1925. — № 7. — С. 65–82.
5. Полякова Е.В., Гофаров М.Ю., Скютте Н.Г., Игловский С.А. Спутниковые и подспутниковые методы исследований наземных гидротермальных экосистем (на примере субарктического термального урочища Пымвашор в Большеземельской тундре) // Современные про-

блемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2013. Т. 10. — № 2. — С. 115–128.

6. Сардаров С.С. (мл.), Савина Е.В. Геотермическое поле разлома // ДАН СССР. — 1984. — Т. 276. — № 5. — С. 1091–1094.

7. Смыслов А.А., Богуславский Э.И., Вайнблат А.Б. и др. Геотермический атлас России. — СПб.: СПГИ, 2000.

8. Тектоническая карта нефтегазоносных областей СССР. Масштаб 1:2 500 000 / Под ред. Л.Н. Розанова. — М., 1969.

9. Clauser C., Griesshaber E., Neugebauer H.J. Decoupled Thermal and Helium Anomalies — Implications for the Transport Regime in Continental Rift Zones // JGR, Solid Earth. — 2002. -November.

10. Gorny V.I. Convective Heat Flow of European Russia According to the Remote Geothermal Method / The Earth's Thermal Field and Relative Research Methods: Proceedings of the International Conference. — М.: 1998. — P. 107–109.

11. Stober I., Richter A., Brost E., Bucher K. The Ohlsbach Plume — Discharge of deep saline water from the crystalline basement of the Black Forest, Germany // Hydrogeology Journal. — 1999. — N 7. — P. 273–283.

12. Stober I., Bucher K. Hydraulic properties of the crystalline basement // Hydrogeology Journal. — 2007. — V, 15. — P. 213–224.

13. Zeis S., Gajewski D., Prodehl C. Crustal structure in southern Germany from seismic refraction data // Tectonophysics. — 1990. — V. 176. — P. 59–86.

© Горный В.И., Селезнев Г.А., Тронин А.А., 2016

Горный Виктор Иванович // v.i.gornyuy@mail.ru
Селезнев Геннадий Анатольевич // gaseleznev@mail.ru
Тронин Андрей Аркадьевич // a.a.tronin@gmail.com

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 549.08

Ожогин Д.О. (ФГУП «ВСЕГЕИ»), Ожогина Е.Г. (ФГУП «ВИМС»)

НЕОБХОДИМОСТЬ И ВОЗМОЖНОСТЬ СОЗДАНИЯ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ ФАЗОВОГО СОСТАВА И СВОЙСТВ МИНЕРАЛОВ

*Стандартные образцы фазового состава и свойств минералов предназначены для проверки, калибровки, градуировки средств измерений, метрологической аттестации методик выполнения измерений. Показаны современное состояние службы стандартных образцов для минералогических исследований и проблемы их изготовления. **Ключевые слова:** стандартный образец фазового состава и свойств минералов, руда, порода, однородность, количественный минералогический анализ.*

Ozhogin D.O. (VSEGEI), Ozhogina E.G. (VIMS)

NEED AND POSSIBILITY OF CREATION OF STANDARD SAMPLES OF PHASE STRUCTURE AND PROPERTIES OF MINERALS

*Standard samples of phase composition and properties of minerals are intended for verification, calibration, calibration of measuring instruments and metrological evaluation of measurement procedures. State-of-the-art service of standard samples for mineralogical studies and problems of their manufacture are explained. **Key words:** standard sample of phase composition and properties of minerals, ore, rock, homogeneity, quantitative mineralogical analysis.*

Минералогические исследования являются неотъемлемой частью геологоразведочных работ и непосредственно влияют на их эффективность и достоверность. Следовательно, минералого-аналитические исследования должны обеспечивать достоверную, метрологически оцененную и имеющую юридическую силу информацию о морфоструктурном, в том числе минеральном составе горных пород и руд.

Интенсивное развитие и совершенствование физических методов минералогического анализа, позволяющих получить количественные данные о минеральном, гранулярном составе руд и пород, реальном составе минералов, их морфометрических характеристиках и свойствах, привело к необходимости метрологического обеспечения всех видов определений, выполняемых в практике лабораторных работ геологической и смежных отраслях. При этом необходима градуировка измерительных систем по стандартным образцам фазового состава, в которых содержание определяемых фаз (минералов) установлено с высокой степенью надежности.

Не менее важным вопросом является разработка методик количественного минералогического анализа различных видов сырья. Традиционные химические (фазовые) методы анализа до сих пор могут быть применимы не ко всем рудам и породам. Так, при подсчете запасов нерудного сырья (талька, волластонита, асбеста, вермикулита и пр.) они не пригодны. Поэтому количество методик минералогического анализа полезных ископаемых будет постоянно увеличиваться, что обусловлено необходимостью минералогического из-