УДК 550.836+470.55 http://doi.org/10.31084/2619-0087/2018-1-3

ГАЗОГИДРО-ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ГОРЫ ЯНГАНТАУ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

© 2018 г. В. Н. Пучков, Р. Ф. Абдрахманов, А. Ю. Кисин, С. Н. Шанина

Реферат. На основе обширного архивного материала и новой геологической информации обсуждается природа газо-геотермальных явлений горы Янгантау (Башкирия), на которой располагается известный курорт. Несмотря на длительную историю изучения, феномен Янгантау все еще является предметом дискуссии. Помимо наиболее популярной гипотезы подземного горения высказывались предположения о том, что это результат разогрева при шарьировании, проявление окисления сульфидов, следствие внедрения молодой интрузии и даже реакции радиоактивного распада. Впервые обнаруженные здесь «черные блоки» (участки, обогащенные сажистым веществом) позволили провести аналогию между горой Янгантау и горящими угольными терриконами, а особенности состава термальных газов и их вариации — однозначно поддержать гипотезу горения углеводородов в качестве причины их выделения. Изучение находки самородного чугуна, найденного при строительных работах на курорте «Янган-Тау», позволило подкрепить этот вывод и получить дополнительные сведения о температурах и составе термальных газов на начальной стадии горения. Хроматография чугуна и стекла с его поверхности в интервале температур 600–1000°С показала в составе выделившихся газов высокие содержания монооксида углерода. Сделан вывод, что на горе Янгантау имел место природный доменный процесс. Очаг горения расположен в осадочных отложениях на небольшой глубине. Рудой послужили, вероятно, поверхностные скопления бурого железняка. Предложена модель процесса в очаге как многофазной системы, в которой взаимодействуют горные породы, метеорные осадки, воздух, проникающий по трещинам, битумы, содержащиеся в янгантауской свите и (предположительно) газообразные углеводороды. В настоящее время температура очага быстро снижается, что ставит перед администрацией курорта непростые вопросы о путях его дальнейшего развития.

Ключевые слова: углеводороды, подземное горение, геотермальные явления, черные блоки, природный доменный процесс, многофазная система

GASHYDRO-GEOTHERMAL PHENOMENA OF YANGANTAU MOUNTAIN (SOUTHERN URALS)

V. N. Puchkov, R. F. Abdrakhmanov, A. Yu. Kissin, S. N. Shanina

Abstract. Based on a wide archive material and new geological information, a problem of nature of gashydro-geothermal nature of phenomena of Yangantau Mountain (Bashkiria), a place of a famous resort, is revisited. Notwithstanding a long history of study, the phenomenon of Yangantau is still a topic of a discussion. Apart of the most popular hypothesis of an underground fire, assumptions that it is a result of frictional heating at a tectonic thrust, of sulfide burning, heat of a young igneous intrusion or even a result of a radioactive decay were suggested. The «black blocks», discovered here for the first time (places, enriched by a carbonaceous substance) permitted to find an analogy between the mountain and burning coal refuse heaps, and a specifics of compositions of geothermal gases and their variations – to support the hypothesis of burning of hydrocarbons as the reason of their discharge. The study of a find of a native cast iron, discovered during constructional works in the resort, permitted to support this conclusion and acquire additional information on a temperature and composition of thermal gases at an early stage of burning. Chromatography of the iron and glass from its surface in the temperature interval of 600–1000 °C have shown high concentrations of CO. A conclusion was made that it was a natural blast-furnace proces that was taking place in the Yangantau mountain. The center of burning is situated in the sedimentary rocks at a shallow depth. The ore was, probably, bog iron. A model was suggested for the burning as a multi-phase system where rocks, meteoric waters, air penetrating through fractures, bitumen contained by shales of Yangantau Formation and (probably) gaseous carbohydrates were present. At present time the temperature of burning is descending quickly, and this brings a problem before the administration of the resort how to plan its development in future.

Key words: hydrocarbons, underground burning, geothermal phenomena, black blocks, multiphase system

Введение

На территории горы Янгантау, расположенной у восточных отрогов невысокого горного хребта Каратау близ границы Башкортостана и Челябинской области (в Салаватском районе республики) находится знаменитый курорт, возникший благодаря наличию уникального природного геотермального явления — выходов из-под земли горячих газовых и газово-паровых струй. Курорт пользуется большой популярностью, планомерно развивается, ведется строительство новых корпусов [Хурамшин, 2007]. Однако, несмотря на более чем 200-летнюю историю, в изучении феномена Янгантау еще не поставлена точка и до сих пор высказываются разноречивые мнения по поводу его природы. Помимо наиболее популярной гипотезы подземного горения высказывались предположения о том, что это результат разогрева при шарьировании, проявление окисления сульфидов, следствие внедрения молодой интрузии и даже — радиоактивного распада. Такое положение не может не беспокоить: оно таит в себе определенную опасность, поскольку препятствует однозначному прогнозу продолжительности существования феномена в будущем, что в свою очередь ставит под вопрос перспективы капитального строительства и расширения курорта. Наши исследования, как мы надеемся, позволили сделать шаг к решению обозначенной проблемы. Первоначально результаты наших исследований по означенной проблеме были опубликованы в двух статьях [Пучков, Абдрахманов, 2003; Пучков и др., 2012]. В настоящее время мы пользуемся возможностью расширить эти публикации в рамках единой статьи, представив их в переработанном и дополненном виде, сделав необходимые уточнения и снабдив их цветными иллюстрациями.

Краткое геологическое описание

Геология территории описана в целом ряде работ [Дзенс-Литовский, 1935; Наливкин, 1939; Вахрушев и др., 1968; Нигматулин и др., 1998 и др.]. Здесь ее описание дается в кратком, обобщенном виде.

Территория геотермального месторождения Янгантау расположена над крутым 100-метровым уступом правого берега р. Юрюзань (рис. 1). Уступ этот представляет собой крутой склон долины реки; здесь располагается большая часть сооружений курортного комплекса, от которого к урезу воды спускается крутая железная лестница. В нижней части уступа обнажаются моноклинально залегающие с падением аз. 70–120°, ∠ 10–20° темные линзовидно-слоистые массивные и сланцеватые битуминозные мергели янгантауской свиты, мощностью до 260 м. Свита принадлежит бурцевскому горизонту артинского яруса нижней перми (рис. 2). Подстилается она конгломератами и песчаниками бальзякской свиты (стерлитамакский – бурцевский

Рис. 1. Высокая терраса правого берега р. Юрюзань, известная как гора Янгантау. Слева чуть видны крыши зданий курорта, справа — выходы красноватых «гореликов». *Фото здесь и далее (рис. 3–6, 15, 16, 18, 25, 26, 28) — В.Н. Пучкова*

Fig. 1. The high terrace of the right bank of Yuryzan river, known as Yangan-Tau mountain. On the left, roofs of the resort buildings are hardly seen. On the right, there are reddish outcrops of burnt rocks — «gorelics». *Photos here and then (figs. 3–6, 15, 16, 18, 25, 26, 28) — by V. Puchkov*

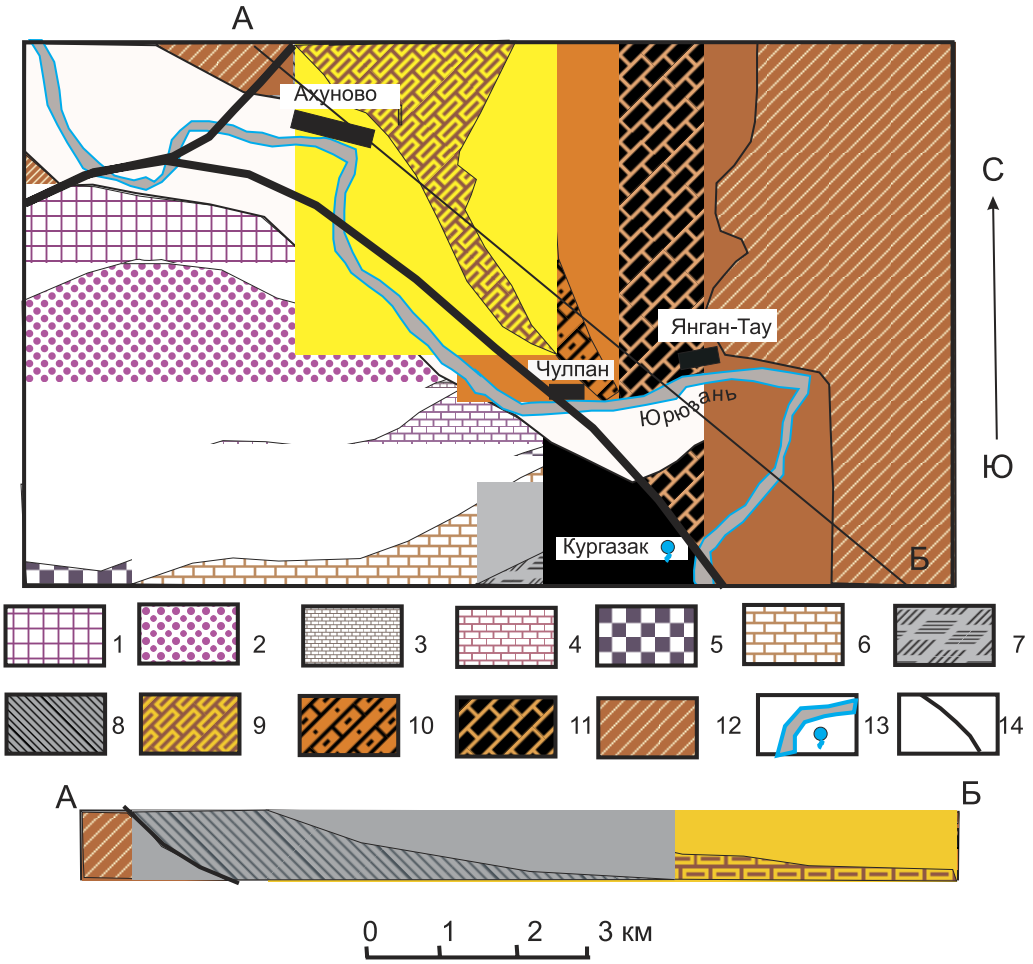

Рис. 2. Схематическая геологическая карта территории курорта «Янган-Тау» (по В.Д. Наливкину и Г.А. Дмитриеву, с изменениями)

Условные обозначения: 1–5 — докембрий: 1— зона дробления; 2 — верхний рифей, зильмердакская свита, песчаники, алевролиты, сланцы, и катавская свита, пестроцветные мергели; 3 — верхний рифей, инзерская свита: песчаники, алевролиты; 4 — миньярская свита — преимущественно известняки и доломиты; 5 — венд, ашинская серия, песчаники; 6 — девон, песчаники, известняки; 7 — нижний карбон, известняки; 8 — верхний карбон; глинистые сланцы и известняки; 9 — верхи карбона – низы перми, мергели и известняки; 10 — стерлитамакский горизонт сакмарского – низы артинского яруса нижней перми, песчаники, глинистые сланцы и известняки (бальзякская свита); 11 — артинский ярус, битуминозные сланцы янгантауской свиты; 12 — артинский ярус, тандакская свита: глинистые сланцы, мергели, песчаники, олистостромы; 13 — белое поле — рыхлые четвертичные отложения, русло р. Юрюзань — сине-серое; 14 — границы стратиграфических подразделений.

Fig. 2. Schematic geological map of the area of «Yangan–Tau» resort (after V.L. Nalivkin and G.A. Dmitriev, modified)

Legend: 1–5 — Precambrian: 1 — crushing zone; 2 — Upper Riphean? Zilmerdak Formation, sandstones, siltstones, shales, and Katav Formation, mostly variegated marls; 3 — Upper Riphean, Inzer Formation, sandstones and siltstones; 4 — Upper Riphean, Minyar Formation, mostly limestones and dolomites; 5 — Vendian Asha Series, sandstones; 6 — Devonian, sandstones and limestones; 7 — Lower Carboniferous, limestones; 8 — Upper Carboniferous, shales and limestones; 9 — Upper Carboniferous – Lower Permian, marls and limestones; 10 — Sterlitamak horizon of the Sakmara Stage – Lower Artinskian stage of the Lower Permian: sandstones, shales and limestones (Balzyak Formation); 11 — Artinskian Stage, bituminous shales and marls of Yangantau Formation; 12 — Artinskian Stage, Tandak Formation: shales, marls, sandstones, olistostrome; 13 — white field — loose Quaternary sediments; grey-and-blue — Yuryuzan riverbed; 14 — boundaries of stratigraphic units.

горизонты), перекрывается песчаниками, глинистыми сланцами и кремнистыми известняками тандакской свиты иргинского горизонта. Тандакская свита наблюдалась нами преимущественно в искусственных выработках на всей восточной части территории курорта. Нам удалось описать и сфотографировать котлован глубиной 7 м и радиусом 10–15 м, вырытый летом 2001 г. под строящуюся КНС (канализационно-насосную станцию) на восточном краю территории курорта. В котловане под пачкой сильно обохренных глинистых и алевритистых сланцев, мощностью 3 м, обнажается олистостромовая толща, которую ранее никто из геологов не описывал. Олистострома состоит из

тесно прижатых друг к другу блоков известняков, с закругленными краями, в слабо выраженном глинисто-алевритистом матриксе. Известняк стально-серый, почти неслоистый, тяжелый, плотный на свежем сколе; глинистый, доломитизированный. К поверхности глыб карбонат становится более рыхлым, выветрелым, и меняет цвет до желтого и красного, переходя в глину матрикса, часто без четко различимых границ с ним. Размер блоков — чаще первые десятки см, но есть глыба диаметром около 2 м (рис. 3). В глыбах на поперечном сколе наблюдается изогнутая слоистость, подчеркивающая их внутреннюю эллипсоидальную структуру, что вызвано скатыванием обломков вниз по подводному склону в неполностью литифицированном состоянии; в некоторых случаях такую глыбу можно назвать роллом, поскольку она, наподобие снежного кома, полностью окружена налипшей глиняной оболочкой (рис. 4).

Развитая в районе Янгантау моноклиналь, сложенная артинскими отложениями, является частью пологого крыла асимметричной Месягутовской антиклинали, ядро которой, сложенное более интенсивно дислоцированными верхнекаменноугольными известняками, глинистыми сланцами, мергелями и песчаниками, наблюдается в 4–5 км западнее, в районе сел Ахуново, Шарипово, Месягутово (см. рис. 2). Антиклиналь имеет северо-восточное простирание и осложнена надвигом, поверхность которого полого падает на юго-восток. Юго-западное продолжение антиклинали срезается в долине р. Юрюзань правосторонним сдвигом, сочлененным на западе с Каратауским надвигом. Эти разломы ограничивают с востока Каратауское поднятие, сложенное породами, имеющими возрастной диапазон от позднего рифея до карбона. Близость этого поднятия, вероятно, сказывается на структуре моноклинали Янгантау, что выражено в повышенной трещиноватости развитых здесь пород. Наиболее важным является наличие здесь открытых субмеридиональных и северо-северо-восточных близвертикальных трещин, по которым идет проникновение воздуха в толщу пород массива (рис. 5). Другой важнейшей особенностью структуры горного массива Янгантау является предполагаемое наличие трещин бортового отпора, проходящих по субширотному логу, расположенному к северу от территории курорта и изолирующих массив от водоносных горизонтов более северной территории. Наличием этих двух систем трещин объясняется дренированность, осушенность пород: постоянное поглощение жидкости, отмечавшееся при бурении скважин, и очень низкий уровень грунтовых вод, приближающийся к уровню поймы,

Рис. 3. Крупная глыба известняка — олистолит в олистостроме тандакской свиты
Fig. 3. Big boulder of limestone – an olistolith in the olistostrome of the Tandak Formation

где выходит серия родников (рис. 6). Эти условия осушенности и трещиноватости весьма благоприятствовали возникновению изучаемого феномена, тогда как излишняя обводненность породного массива могла бы препятствовать горению.

Термальная история объекта

П.С. Паллас [1989] (рис. 7), посетивший г. Янгантау в 1770 г. во главе академической экспедиции, писал, что подземный пожар возник незадолго

Рис. 4. Глыба — «ролл» в олистостроме
Fig. 4. A boulder of «roll» type — in the olistostrome

Рис. 5. Открытые трещины в массивных плитчатых битуминозных мергелях янгантауской свиты (слева — чл. корр. РАН В.Н. Пучков, справа — профессор Р.Ф. Абдрахманов)
Fig. 5. Open fractures in massive platy bituminous marls of Yangantau Formation (on the left — a corresponding member RAS V.N. Puchkov, on the right — professor R.F. Abdrakhmanov

Рис. 6. Один из многочисленных родников у меженного уреза воды р. Юрюзани
Fig. 6. One of numerous springs near mean water level of Yuruzan river

до его приезда. По словам живших там башкир, одиннадцать или двенадцать лет до того в большую сосну на вершине горы ударила молния, и пламя передалось горе. К этому свидетельству необходимо отнестись с полной серьезностью, поскольку речь идет не о легенде, а о событии, происшедшем на глазах живых свидетелей. Таким образом, с большой долей вероятности можно сказать, что процесс теплогенерации начался в 1760–1761 гг. и продолжается уже почти 260 лет. Вначале выделение тепла было очень интенсивным. Паллас писал, что из открытых трещин постоянно поднимались дрожащие на солнце струи пара, к которым невозможно было прикоснуться рукой. Температура струй была настолько высока, что брошенная в трещину береста или щепка вспыхивали меньше чем за минуту; загоралась и опущенная в трещину деревянная лопата.

Температуры газов в трещинах П.С. Палласом не замерялись. Если исходить из нарисованной им картины, это было настоящее открытое горение, со значительным поступлением кислорода, и температуры в этом случае локально могли достигать на поверхности многих сотен градусов. Правда, забегая вперед, заметим, что доступ кислорода в недра горы не был беспрепятственным: он зависел от направления ветра относительно системы

Рис. 7. П.С. Паллас (1741–1811), член Петербургской Академии Наук, автор первого научного описания феномена Янгантау
Fig. 7. P.S. Pallas (1741–1811), member of Petersburg Academy of Sciences, the author of the first scientific description of Yangantau phenomenon

трещин (от интенсивности поддува) и не обеспечивал, особенно в начале процесса, полного сгорания: шло образование обильного угарного газа, а затем, когда горение ослабло — в горячем газе повышалось содержание двуокиси углерода относительно состава атмосферного воздуха. Температурные замеры начали делать только с конца XIX в, и значения поверхностных температур по наблюдениям, сделанным до 1933 г., колебались в пределах от 30 до 150°С [Дзенс-Литовский, 1935]. В конце 50-х годов начали изучать и состав выходящих газов; замеры температуры поверхностных выходов газов в это время составляли 40–120°С [Пилипенко, 1966]. Позже, начиная с 80-х годов, дебит и температуры газов замерялись регулярно лабораторией при курорте, что позволило построить графики их изменения за 20 лет (рис. 8).

Средняя температура газов на устьях скважин и каптированной трещины в период 1980–2001 гг. составляла 60–80°С, причем в большинстве случаев, хотя и с определенными отклонениями, происходило ее понижение со средней скоростью 0,5°С в год. Это в 5 раз больше, чем расчетная скорость [Нигматулин и др., 1998], полученная без учета конвективного воздушного теплопереноса по трещинам.

Остывание горы видно и невооруженным глазом. А.И. Дзенс-Литовский в 30-х годах XX в. писал, что зимой, когда долины и горы Южного Урала покрываются снегом, на горе Янгантау снег не лежит. Сейчас гора поросла лесом, на ней зимой ложится снег, процесс затухает (рис. 9, 10). Вероятно, не только снизилась интенсивность процесса, но и сам его центр переместился вглубь горы.

Эта тенденция подтверждается и измерениями поверхностных температур пород. По данным термальной съемки К.А. Миловидова, сделанной в 1948 г., В.В. Штильмарк [1960] составил

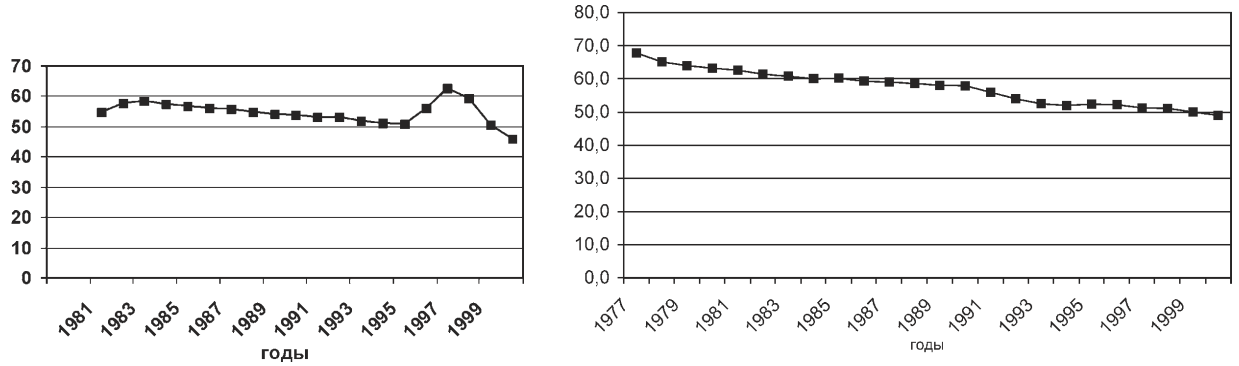

Рис. 8. Динамика изменения температур на устье каптированной трещины и скважины 4к (примеры). Обработка данных наблюдения — Р.Ф. Абдрахманова

Fig. 8. The dynamics of temperature changes at the mouth of captated fracture and the 4k borehole, as examples

Рис. 9. Паровая лечебница летом

Fig. 9. Steam clinic in summer

Рис. 10. Паровая лечебница зимой

Fig. 10. Steam clinic in winter

и опубликовал схему (рис. 11), на которой термальная зона, прослеживаемая на поверхности изотермой в 20°С, образовывала сплошную полосу шириной 100–200 м и длиной 1 км. При этом на выделенных в 1892 г. А.Я. Гордякиным термальных площадках А+В, С, Е она составляла свыше 25°С (площадка D не проявилась) В результате работ следующего этапа, проведенных в 1955–1960 гг. Г.Ф. Пилипенко [1966], была составлена новая схема, на которой 20-градусная изотерма уже распалась на 3 участка, по площади и расположению примерно соответствовавших 25-градусным изотермам схемы, опубликованной В.В. Штильмарком, а вместо 20-градусной изотермы появилась 15-градусная (рис. 12). И тут мы вновь видим остывание на 5°С примерно за 10 лет!

Данные о температуре главного тепловыделяющего очага более противоречивы. По данным В.В. Штильмарка [1960], максимальная температура в скважине 5У измерена на глубине 80 м и составляла плюс 378°С. По данным Г.Ф. Пилипенко [1966], в той же скважине на глубине 80 м 25.11.1961 г. зафиксирована температура 400°С. По данным же измерений курортной лаборатории, в 2001 г. максимальная температура в этой скважине на глубине 84 м составила всего лишь 152°С. Помимо приведенных материалов, позволяющих определенные экстраполяции в прошлое (их читатель может попытаться сделать и самостоятельно), имеется еще целый ряд данных, свидетельствующих о том, что первоначально поверхностные температуры местами могли достигать многих сотен градусов, причем возможно температура убывала экспоненциально, с замедлением и некоторыми всплесками, указывающими на нестационарность процесса.

Данные о ранней термальной и химической истории очага, полученные в результате изучения так называемого «метеорита Янган-Тау»

Самым неясным и интригующим во всей этой истории поначалу был момент, связанный с находкой металлического слитка, названного «метеоритом Янган-Тау». В дальнейшем ему была специально посвящена наша статья [Пучков и др., 2012]. Примерно 25 лет тому назад на территории курорта «Янган-Тау» при строительстве здания плавательного бассейна на дне вырытого под него котлована, на глубине примерно 7 м в коренных отложениях

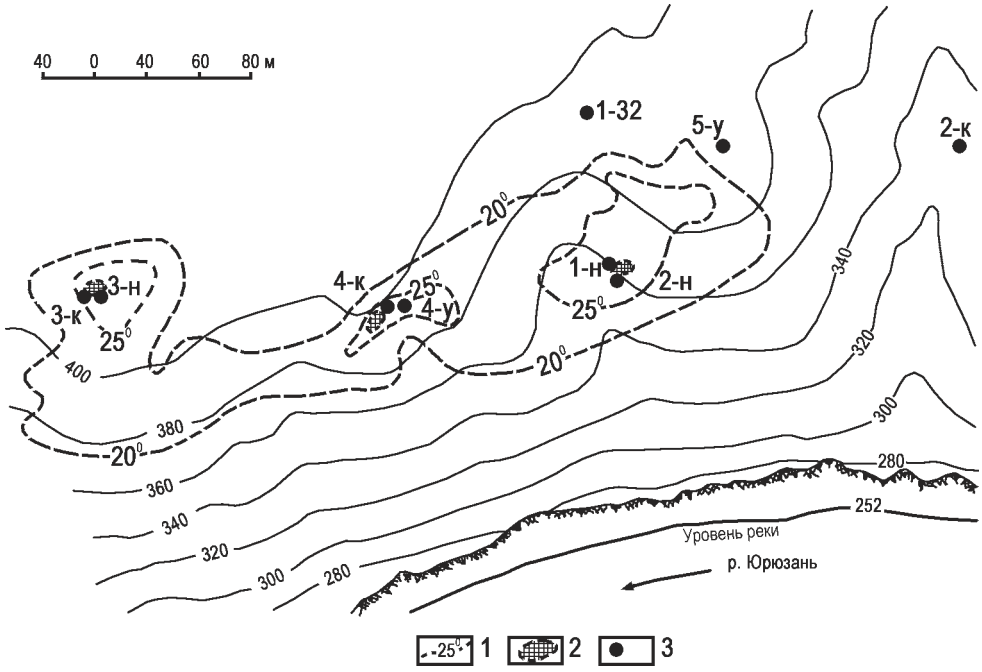

Рис. 11. Карта поверхностных проявлений тепла на горе Янгантау [Штильмарк, 1960], с упрощениями

Условные обозначения: 1 — изолинии температуры кровли коренных пород от 20°С и выше; 2 — участки с температурой кровли коренных пород выше 40°С; 3 — номер скважины и абсолютная отметка устья.

Fig. 11. The map of surficial heat manifestations on the Yangantau mountain (Stilmark, 1960), simplified

Legend: 1 — isopleths of temperatures at the roof of solid rocks, 20°C and higher; 2 — areas with temperatures higher than 40°C; 3 — borehole, its number and true altitude of the mouth.

тандакской свиты перми, был найден большой слиток железа (рис. 13). Большая часть образцов, отколотых рабочими-строителями от этого слитка, утрачена, а сам он, весом в несколько центнеров (?), был оставлен в земле и зарыт в ходе строительства; в настоящее время он находится

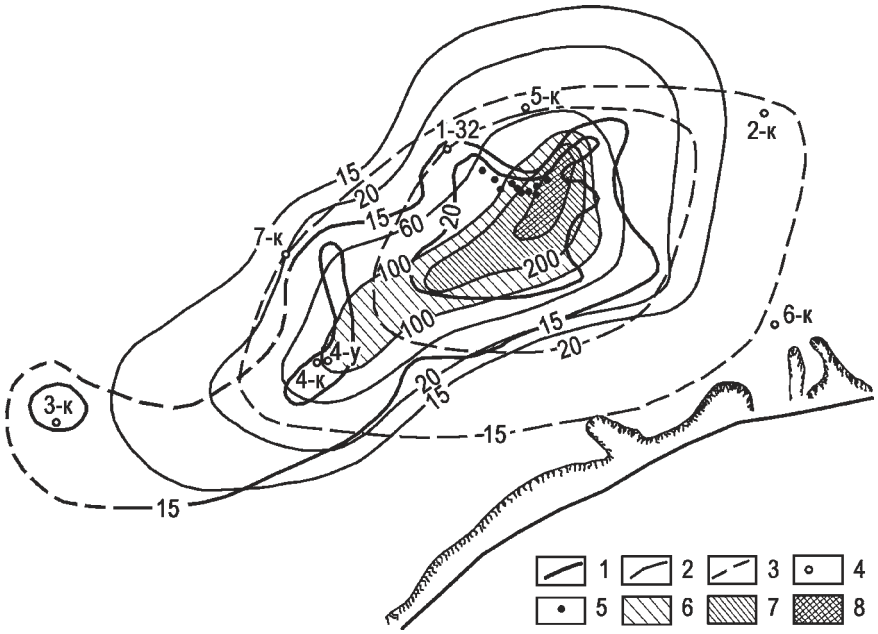

Рис. 12. Схематическая геотермическая карта тепловой аномалии горы Янгантау [Пилипенко, 1966]

Условные обозначения: 1 — изотермы поверхности (на глубине 1 м); 2 — изотермы на уровне максимального прогрева (отметка 265 м); 3 — изотермы на уровне водоносного горизонта; 4 — скважины разведочного бурения (1955–1961 гг.); 5 — эксплуатационные скважины. Температурные аномалии: 6 — от 100 до 200°С; 7 — от 200 до 300°С; 8 — выше 300°С.

Fig. 12. Schematic geothermic map of the heat anomaly of the Yangantau mountain (Pilipenko, 1966)

Legend: 1 — Thermal isopleths at surface (1 m deep), 2 — thermal isopleths at a depth of maximal heating (265 m altitude); 3 — isopleths at the level of the aquifer; 4 — boreholes of a prospecting drilling (1955–1961 years); 5 — exploitational boreholes. 6–8 — temperature anomalies: 6 — 100–200°C; 7 — 200–300°C; 8 — above 300°C.

Рис. 13. Фотография стены здания бассейна недалеко от места находки слитка (7 м глубже)

Fig. 13. The wall of the swimming pool close to the place where the iron ingot was found (7 m deeper)

непосредственно под краем фундамента здания, и в принципе его можно было бы вскрыть без ущерба для строения. Первоначально приходилось пользоваться очень небольшими образцами, которые удавалось получить от свидетелей и участников находки, однако затем, после смерти С.Г. Фаттахутдинова, вполне представительный образец весом около 3 кг перешел в руки Э.З. Гареева и затем был передан В.Н. Пучкову.

Как уже было сказано, первоначально предполагалось, что это метеорит (таково было мнение С.Г. Фаттахутдинова). Однако анализы (в том числе сделанные В.Н. Пучковым в начале 90-х гг. в Институте стали и сплавов и несколько позже Э.З. Гареевым — по его устному сообщению — в Институте проблем сверхпластичности материалов РАН) не подтвердили этого.

В 2001 г. контрольный анализ был сделан в ИМИН РАН. Состав (мас. %): Fe — 96,08; Mn — 1,08; Cr — 0,29; V — 0,13. Сумма 97,58. Микрозондовый анализ. Аналитик Чурин Е.И. Институт минералогии УрО РАН, Миасс; см. также табл. 1 (ан. 4) и табл. 3. Такой состав полностью исключает метеоритную природу.

По заключению сотрудника ИМИН РАН Т.П. Нишанбаева, структура слитка отвечает чугуну (рис. 14). Характер поверхности слитка, частично покрытой шлаком (стеклоподобной оболочкой), ноздреватой, с канальцами, дающими возможность предположить прохождение газов через расплав (рис. 15), позволял сразу усомниться в его неземном происхождении. Но и прямых свидетельств его рукотворности также не выявлено.

Нами впервые высказана гипотеза о том, что указанный слиток — следствие уникального природного процесса выплавки железной руды, связанного с термальными явлениями Янгантау на ранней их стадии. Чтобы подтвердить или опровергнуть ее, необходимы были дополнительные исследования. В частности, надо было решить, какова была руда. Приповерхностные слои тандакской свиты и перекрывающие их рыхлые осадки на глубине 1–3 м сильнейшим образом ожелезнены и содержат прослои охры до 5 см мощностью (рис. 16), так что, возможно, это была болотная руда. Местами в окрестностях Янгантау описаны небольшие болотца. Для естественного плавления в восстановительных условиях требуется темпера-

Рис. 14. Структура слитка, характерная для чугуна. Заключение Т.П. Нишанбаева. Фотография среза, сделанная в ИМИН РАН

Fig. 14. The structure of the ingot, characteristic of a cast-iron. The conclusion of T.P. Nishanbaev. The photo is made in IMIN RAS

Рис. 15. Представительный обломок чугунного слитка с веерообразно расположенными каналами. Угадывается наличие осевого канала движения газов

Fig. 15. A representative fragment of the cast-iron ingot with a fan-like position of channels. An axial channel of gas movement can be guessed

тура свыше 600°С, что не так далеко от оценок максимальных температур, которые получены по косвенным данным (см. ниже).

В пользу нашей гипотезы о природном характере плавления говорят такие данные, как полное отсутствие каких-либо исторических указаний на развитие железоделательной металлургии в районе Янгантау, а также факт нахождения слитка железа среди пермских коренных пород непосредственно под рыхлыми отложениями, но не в слое наносов, которые отвечали бы какой-либо исторической эпохе. Имеется свидетельство старожила (А.Т. Юсупов) о том, что после войны (ВОВ) непосредственно к востоку от территории курорта местные жители рыли колодец и вынули на поверхность два куска железа. Он же сообщил о том, что после войны местные жители на склоне борта долины под зданием паровоздушных ванн добывали гашеную известь (температура диссоциации кальцита — основного минерала известняка — свыше 650°С). А.И. Дзенс-Литовский [1935] отмечает среди пород, подвергшихся термальному воздействию, присутствие белесого порошка полугашеной извести. Мы изучили указанный участок, расположенный на береговом обрыве р. Юрюзань в 100 м восточнее железной лестницы на высоте около 50 м от уреза воды. Известь сейчас отсутствует; наоборот, здесь были вскрыты черные блоки (см. ниже), а известь исчезла, видимо, вследствие подмывания обрыва рекою. Сравнение состояния склона в 2001 и 2002 гг., когда мы производили наблюдения, позволяет сделать вывод, что размывание и обрушение обрыва в периоды паводков идет очень быстро.

Таким образом, уже на раннем этапе исследований для нас стало достаточно ясно, что мы имеем дело с редким природным явлением — естественным металлургическим процессом. В дальнейшем В.Н. Пучков, в сотрудничестве с минералогом и аналитиком, вернулся к этому вопросу, и указанные выводы были подтверждены аналитическим путем ([Пучков и др., 2012] и далее в данной статье).

Материалы и методы

Итак, в нашем распоряжении имелся образец металла весом около 3 кг. Часть поверхности образца естественная (внешняя, природная), а часть представлена сколами и спилами. Для исследований от него был отпилен небольшой фрагмент весом около 50 г, одна сторона которого представлена природной поверхностью на контакте с вмещающей породой. Такие размеры образца позволили изучить его под бинокулярным микроскопом

Рис. 16. Шурф на плоской поверхности террасы г. Янгантау, вскрывший прослои охристых пород (показаны стрелками)

Fig. 16. A pit at a flat surface of the terrace of the Yangantau mountain, opened two layers of ochre-like substance (ore?), shown by arrows

МБС-10 при увеличениях до ×56. Для микрозондовых исследований было изготовлено 2 полированных пластинки. Исследования выполнены в Институте геологии и геохимии УрО РАН (г. Екатеринбург) на микроанализаторе Cameca SX 100 с пятью волновыми спектрометрами. Морфология естественных поверхностей исследована сканирующим электронным микроскопом JSM-6390LV фирмы Jeol, оснащенным энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments.

В Институте геологии Коми НЦ УрО РАН методом газовой хроматографии изучались состав и содержание газов, выделяющихся из проб стекол и металла с горы Янгантау при нагревании. Измерения выполнены на газовом хроматографе Цвет-800, соединенном с пиролитической приставкой, по известной методике [Петровский и др., 2008]. Пиролиз образцов проводился в кварцевом реакторе при поинтервальном нагреве навески [Миронова и др., 1992]. В качестве газа-носителя использовался гелий. Обработка хроматографических сигналов осуществлялась с помощью программы TWS–*Maxi Chrom*. В ходе анализа навеска исследуемого вещества помещалась в кварцевый реактор и продувалась потоком гелия при температуре 100°С в течение 60 минут для удаления сорбированного воздуха со стенок пробирки и воды, сорбированной на поверхности образца. Затем реактор нагревался до заданной температуры, а форколонка охлаждалась жидким азотом. По окончании пиролиза (3 мин) накопленные газовые компоненты поступали в рабочую колонку хроматографа. Анализ выполнялся в режиме программирования температуры термостата колонок от 40 до 115°С, со скоростью 15°С/мин. Скорость газа-носителя гелия составляла 18 мл/мин, температура детектора по теплопроводности — 150°С, ток — 140 мА, температура пламенно-ионизационного детектора — 150°С.

Данная методика позволяет определять следующие газовые компоненты: H_2, N_2, CO, CH_4, C_2H_4, C_2H_2, C_2H_6, C_3H_6, C_3H_8, изо-C_4H_{10}, C_4H_8, н-C_4H_{10}, CO_2, H_2O, H_2S и SO_2. Определение содержаний газов проводилось с использованием калибровочного коэффициента. Ввод стандартной газовой смеси в реактор осуществлялся с помощью кранадозатора. В выбранных условиях минимально определяемое содержание по основным компонентам составляет (мкг/г): для катарометра: $5\cdot10^{-3}$ — для N_2 и CO, $8\cdot10^{-3}$ — для CH_4 и CO_2, 1,1 — для H_2O и $2\cdot10^{-2}$ — для H_2; для ДИП: CH_4 — $8\cdot10^{-5}$, C_2H_4, C_3H_6 — $1\cdot10^{-4}$, C_2H_2, C_2H_6, C_3H_8 — $7\cdot10^{-5}$, C_4H_{10}, изо-C_4H_{10} — $2\cdot10^{-5}$. Самый низкий порог определения имеет водород. Это связано с тем, что детектор по теплопроводности обладает низкой чувствительностью по водороду при использовании гелия в качестве газа-носителя. Калибровка по воде проводилась по стандартной пробе СГД-1а (габбро эссекситовое ГСО). Вероятная относительная погрешность метода 16%.

Результаты исследований

В образце металла наблюдается несколько трубчатых червеобразных каналов диаметром до 1–2 мм, образующих веерообразные или бессистемные скопления (рис. 15, 17). Форма каналов округлая, сечение непостоянное. При выходе на поверхность металла они принимают воронкообразную форму, увеличиваясь в диметре в 2–3 раза.

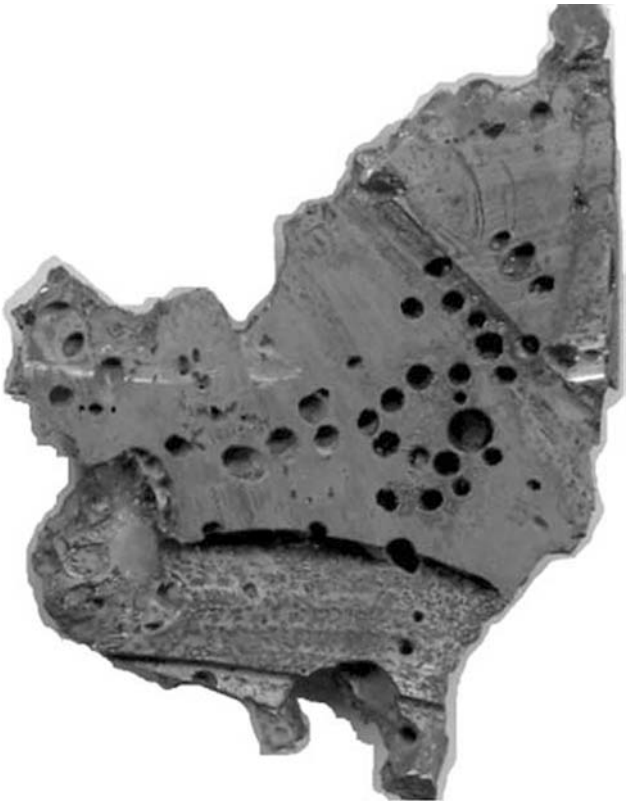

Рис. 17. Трубчатые каналы на спиле образца металла субпараллельного поверхности соприкосновения с вмещающей породой (обратная сторона образца). Наибольшее измерение образца 30 мм

Fig. 17. Pipe-like channels at a cut surface of the metal sample, subparallel to the suface of a contact between the ingot and the enclosing rock (the opposite side of the sample). The maximal dimension of the sample — 30 mm

Стенки каналов сглаженные, поверхность шагреневая. В некоторых случаях наблюдаются резко выраженные в рельефе параллельные гребневидные выросты металла, ориентированные вдоль канала. Морфология такой поверхности указывает на эрозию стенок канала в результате тока горячей газовой струи. В металле часто наблюдаются естественные щелевидные микротрещинки растяжения, борта которых иногда чуть смещены. Стенки неровные. Хорошо видна структура металла: субизометричные зерна 0,5–1,0 мм в поперечнике. Сечение по форме близко к квадратному. Границы зубчатые. Поверхности зерен плоские и выглядят как спайность, чем сильно напоминают скол мрамора или галенитовой руды. Около стенок каналов размеры зерен обычно уменьшаются в 2–3 раза. В качестве особенностей отметим, что в природных условиях металл коррозии не подвергался, но после распиливания образца ржавчина появилась уже через несколько часов. Поверхности скола были значительно более устойчивы к окислению, но и они потускнели в течение многих лет.

Вмещающие породы, наблюдаемые в образце, представлены глинистыми несортированными песками (или песчаниками). Среди минералов песчаной размерности преобладает кварц различной степени окатанности. В качестве единичных зерен отмечены ставролит, темная слюда, рутил. На контакте металла с глинистыми песками наблюдается слой сильно вспененного стекла толщиной до 1 мм. Стекло бесцветное или слегка желтоватое, иногда образует капли (рис. 18). Контакт стекла с глинистыми песками наблюдается редко. Чаще он представлен обломками стекла, сцементированными песчано-глинистым материалом.

На одном участке природной поверхности металла наблюдается очень тонкий слой черного непрозрачного стекла (?), распределенного пятнами. На устьях каналов это стекло образует конусовидные нашлепки, похожие на миниатюрные вулканы, вершины которых осложнены кратерами (рис. 19 и 20). Вероятно, температура газов выходящих из каналов была выше температуры, существовавшей на внешней поверхности металла, что привело к локальному плавлению находящейся в контакте субстанции. Другой вариант: конденсация материала из газовой струи, вышедшей из металла. Состав черной стекловидной массы непостоянный (табл. 1); резко преобладают Ti, Si, Mn, Mg, Fe, C. В черной стекловидной (шлаковидной)

Рис. 18. Природная поверхность контакта слитка с вмещающей породой. Видна стекловатая корка, отдельные капельки стекла на ней, в нижней левой части — канальцы, выходящие на поверхность и, возможно, угловатые отпечатки обломков вмещающей породы

Fig. 18. The natural surface of the ingot at the contact with the enclosing rock. One can see the glassy crust and separate drops of glass on it. In the lower part of the sample one can see channels and probably angular imprints of fragments of the host rock

массе распространены газовые пузыри изометричной формы. На стенках пузырей и в самой шлаковидной массе часто наблюдаются включения мелких шариков металла (рис. 21), по составу близких основной массе самородка (табл. 1).

Наиболее ценную информацию дала газовая хроматография (табл. 2). В стекле в интервале температур 100–600°С резко преобладают H_2O и CO_2; на третьем месте находится монооксид углерода (CO). В интервале температур 600–1000°С следуют

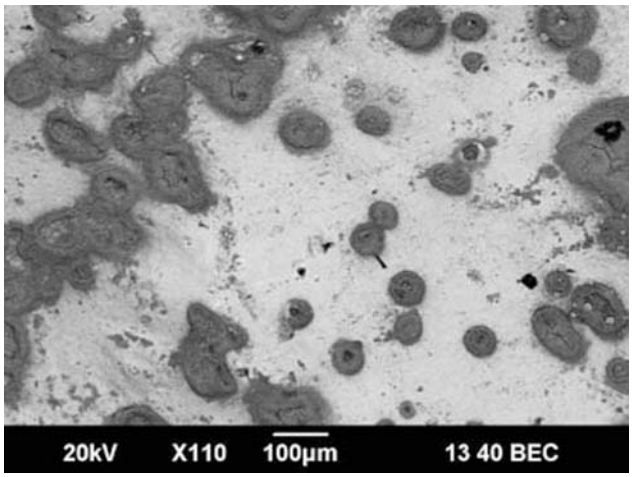

Рис. 19. Устья трубчатых каналов на естественной поверхности образца металла, к которым приурочены конусы черной стекловидной массы

Здесь и на рис. 20 . Электронный микроскоп JSM-6390LV. ЦКП УрО РАН «Геоаналитик».

Fig. 19. The orifices of pipe-like channels at the natural surface of the metal sample with cones of a glass-like mass

Here and at Fig. 20 — electron microscope JSM-6390LV. UrB RAS, “Geoanalitik” Lab.

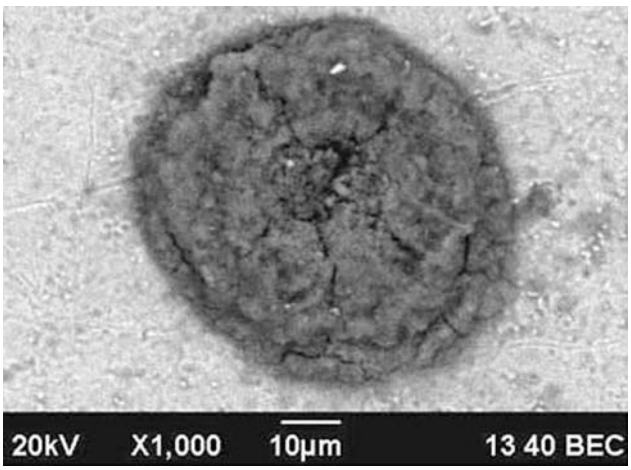

Рис. 20. Типичный вид конуса черной стекловидной массы на устье трубчатого канала (см. рис. 19). Хорошо видны радиальные трещины растяжения, концентрические валы и жерло

Fig. 20. Typical appearance of the orifice of pipe-like channel at the natural surface of the metal sample (see fig. 19). Radial tension fractures, concentric ridges and the central crater are clearly seen

Таблица 1

Химический состав черной стекловидной массы и металла

Table 1

Chemical composition of black vitreous mass and metal

Элемент	1		2		3		4	
	вес. %	атом. %	вес. %	атом. %	вес. %	атом. %	вес. %	атом. %
C	3,04	6,66	18,65	37,01			8,65	27,16
O	32,62	53,68	19,83	29,54	49.06	72,85	4,57	10,77
Mg	1,81	1,96	1,11	1,09	3,00	2,93		
Al	2,24	2,19	0,51	0,45	1,17	1,03		
Si	6,71	6,29	14,23	12,08	1,77	1,49	5,05	6,78
K	2,54	1,71			0,25	0,15		
Ca	5,79	3,80	0,75	0,45	0,47	0,28		
Ti	29,09	15,99	0,75	0,37	32,70	16,22		
Cr	0,68	0,35	4,68	2,14	3,21	1,47	1,65	1,20
Mn	10,11	4,84			3,60	1,56	1,26	0,86
Fe	5,37	2,53	39,49	16,86	4,78	2,03	78,82	53,23
Итого	100,00		100,00		100,00		100,00	

Примечание. Анализы выполнены в Институте геологии и геохимии УрО РАН на сканирующем электронном микроскопе JSM-6390LV фирмы Jeol, оснащенном энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments. Аналитик С.П. Галватских. 1–3 — черная стекловидная масса; 4 — металл. Повышенные содержания хрома обусловлены полировкой образца окисью хрома.

(в порядке убывания): CO_2, CO, H_2 и CH_4. Это восстановленные газы. В пересчете на CO и CO_2 соотношение составляет 30 и 70% соответственно. Еще более впечатляющие цифры состава газов получены по металлу, особенно в интервале температур 600–1000°C. В составе газов установлено 76% CO и 21% CO_2. Такой состав законсервированных в металле газов-восстановителей является ключом к определению процессов, результатом которых было образование самородного чугуна.

Обсуждение результатов исследований

На рис. 22 показана субграфическая (перлитная — в металлах) структура, наблюдаемая на полированной поверхности металла в отраженных электронах. Такая структура характерна для чугуна и обусловлена эвтектоидным распадом (перлитным превращением) аустенита на две фазы — феррит и цементит (Fe_3C, доля C до 6,67%). Микрозондовые анализы металла (табл. 3) подтвердили ранее сделанные выводы о том, что это чугун [Пучков, Абдрахманов, 2003]. Наличие на поверхности металла глинистых песков (или песчаников) с обычными терригенными минералами показывает, что самородок чугуна сформировался: 1) в природных условиях, 2) в рыхлых отложениях, лежащих на поверхности известняков (в выемке закартированы карбонатные породы). Таким образом, правомочность гипотезы В.Н. Пучкова полностью подтверждена. Встает вопрос о том, какие процессы привели к возникновению самородного чугуна.

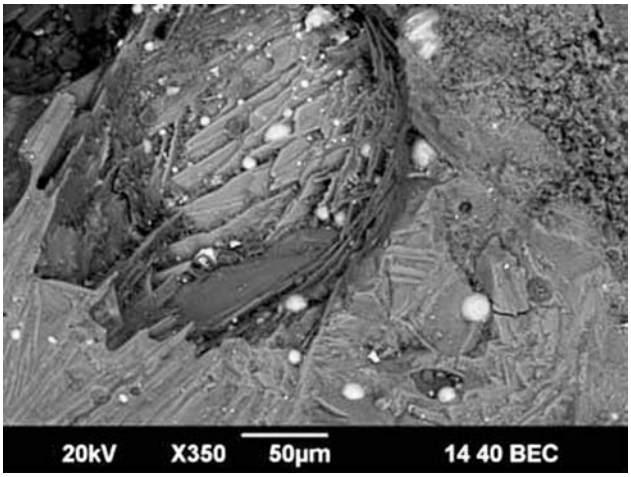

Рис. 21. Газовая полость и мелкие шарики металла в черной стекловидной массе

Fig. 21. Gas cavity and small metal globules in a black glass-like mass

Самородное железо описано во многих местах по всему миру (в Сибири, Индии, Сенегале, Германии, Гренландии, США и др.). Известно оно и на смежной к северо-западу площади Уфимского плато [Кисин и др., 2002]. Обычно оно почти чистое, малоуглеродистое, мягкое и ковкое. Самородный чугун встречается значительно реже. Как отмечает Н.А. Мезенин [1972], для его образования необходимы особые условия. Это может иметь место, например, вследствие контакта раскаленного углерода с железной рудой и получающимся из нее сплавом. В качестве примера Н.А. Мезенин

Таблица 2

Результаты хроматографического анализа газов из стекла и железа с горы Янгантау (в мкг/г и %)

Table 2

The results of chromatographic analysis of gases from glass and iron from the Yangantau mountain (in μg/g and %)

T, °C	H_2	N_2	CO	CO_2	H_2O	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	C_3H_6	C_3H_8	i–C_4H_{10}	C_4H_8	n–C_4H_{10}
Стекло (масса пробы 0.074 г)													
100–600	3,96	0,0	9,94	187,23	2568	1,25	0,54	0,10	0,71	0,14	0,01	0,56	0,07
600–1000	7,03 / 1,80%	0,0	115,31 / 29,47%	268,82 / 68,69%	0	0,16 / 0,04%	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Металл (масса пробы 0.1213 г)													
20–200	0,31	0,07	0,44	83,3	27378	0,27	0,02	0,21	0,06	0,50	0,00	0,01	0,07
200–600	29,63	0,00	130,26	355,0	14903	2,31	0,90	0,43	1,03	0,34	0,00	0,07	0,02
600–1000	3,98 / 0,05%	0,00	6548,5 / 76,01%	1838 / 21,3%	224 / 2,60%	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Примечание. Анализы выполнены в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар. Аналитик С.Н. Шанина.

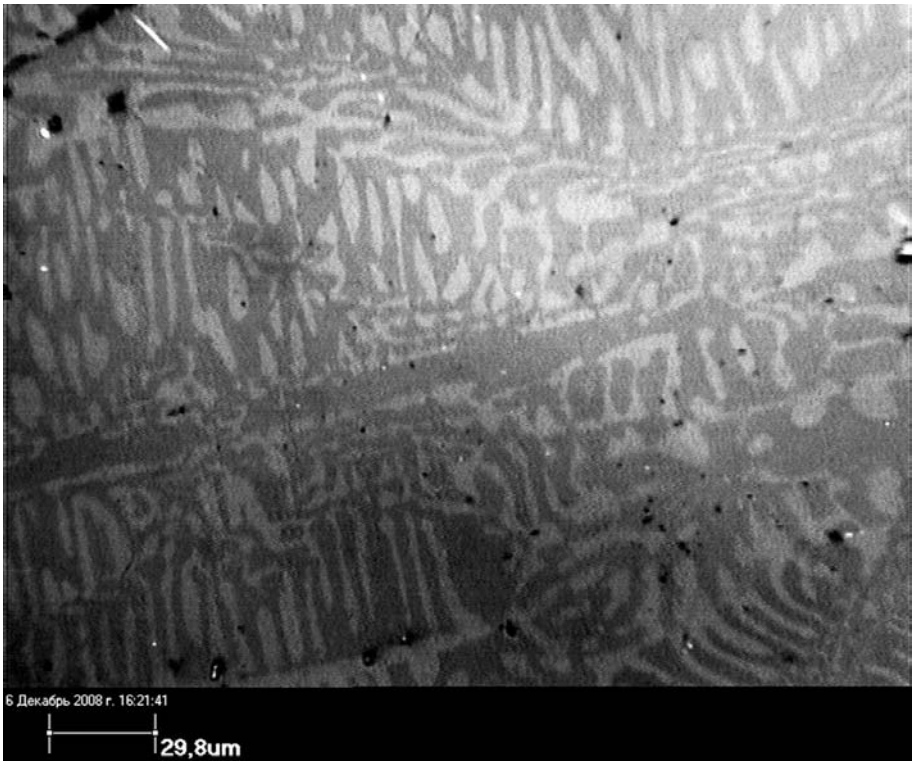

Рис. 22. Графическая структура металла, наблюдаемая под электронным микроскопом. По описанию она похожа на перлитную структуру, характерную для чугуна

Fig. 22. Graphic structure of metal, revealed by the electronic microscope

Таблица 3

Результаты микрозондовых анализов металла с г. Янгантау (вес. %)

Table 3

Results of microprobe analyses of metal from Yangantau (wt %)

№ анализа	Компоненты							
	C	Si	V	Cr	Mn	Fe	Ni	сумма
1	7,39	0,01	0,18	0,33	1,27	92,39	0,05	101,61
2	7,49	0,01	0,19	0,42	1,22	92,53	0,06	101,92
3	0,23	0,28	0,05	0,11	0,85	97,49	0,10	99,12
4	6,22	0,03	0,15	0,25	1,47	92,22	0,03	100,36
5	8,26	0,02	0,16	0,30	1,32	92,12	0,02	102,21
6	7,19	0,00	0,19	0,39	1,19	92,46	0,02	101,44
7	7,58	0,00	0,19	0,42	1,21	92,76	0,01	102,18
8	6,78	0,00	0,16	0,40	1,23	92,48	0,02	101,07
9	22,64	0,05	0,16	0,33	1,18	89,24	0,03	113,63
10	1,67	0,41	0,02	0,10	0,88	97,42	0,07	100,57
11	1,45	0,44	0,03	0,09	0,87	97,97	0,08	100,91
12	0,00	0,21	0,16	0,14	0,99	91,77	0,03	93,30
13	0,46	0,31	0,03	0,11	0,88	96,64	0,06	98,49
14	0,43	0,25	0,03	0,13	0,83	97,11	0,03	98,81
15	5,33	0,15	0,09	0,23	0,98	93,66	0,03	100,46
16	6,12	0,01	0,16	0,34	1,32	92,37	0,03	100,36
17	13,43	0,01	8,49	0,55	0,06	1,99	0,02	24,55
18	5,93	1,46	6,40	0,37	0,24	2,21	0,01	16,60

Примечание. 1, 2 — участки серого цвета (рис. 5); 3–8, 10–13 — светлые участки; 9, 17, 18 — мелкие светлые включения треугольного сечения; 14, 15 — железо. В спектрах анализов 17 и 18 имеется титан. Аналитик В. Гмыра.

описывает находку самородного чугуна А.А. Иностранцевым в 1905 г. в районе острова Русский на Дальнем Востоке. Здесь небольшие пластообразные скопления самородного чугуна залегали на глубине 30–40 м под скальными породами морского берега. В пробах самородного чугуна, подсеченного скважиной, оказалось около 3,2% углерода, 1,55% кремния, 0,66% марганца. По мнению А.А. Иностранцева, самородный чугун здесь образовался в результате извержения лавы кварцевого порфира на поверхность переслаивающихся пластов каменного угля и железной руды. Под влиянием высоких температур и без доступа воздуха из каменного угля произошло выделение углеводородов и окиси углерода, которые взаимодействовали с пластами железной руды.

Температура плавления железа 1539°С. Силикатные стекла плавятся при температурах около 1400°С. Но наблюдаемые местами на поверхности металла с горы Янгантау корки стекла и шлаков — очень тонкие, не более 1 мм. Это может свидетельствовать в пользу относительно низких температур, существовавших на момент формирования слитка, и/или о локальности такого нагрева.

Металлурги получают чугун в доменной печи. Е.Ф. Вегман и др. [2004] описывают доменный процесс в условиях избытка газа-восстановителя реакциями:

$$Fe_3O_4+mCO \rightarrow 3FeO+(m-1)\cdot CO+CO_2, \quad (1)$$
$$FeO+nCO \rightarrow Fe+(n-1)\cdot CO+CO_2. \quad (2)$$

При температуре 800°С равновесный состав газа реакции (2) составляет 70% CO и 30% CO_2. Для этого требуется, вместо 1 моля восстановителя, $3^1/_3$ моля. Для восстановления высших оксидов железа не требуются высокие содержания CO, но для восстановления FeO необходимы высокие концентрации монооксида углерода, возрастающие с ростом температуры. Результаты хроматографического анализа показали, что в самородном чугуне доля монооксида углерода составляет 76%. Возможно, это объясняется более высокими температурами восстановления FeO (более 800°С).

Е.Ф. Вегман и др. [2004] также отмечают, что наличие твердого углерода требует учитывать равновесие в системе C–CO–CO_2:

$$CO_2+C = 2CO-166{,}32 \text{ МДж} \quad (3)$$

Это реакция газификации углерода (3), которая зависит от давления: рост давления смещает равновесие влево, а снижение — вправо. Она протекает при высоких температурах и отличается высокой скоростью. Напротив, реакция распада CO протекает медленно и для достижения равновесия необходимо время.

На рис. 23 приведена совмещенная диаграмма равновесий в системе Fe–O–CO и C–CO–CO_2. В реальном газе при температурах ниже 700–800°С содержание CO выше, чем в равновесном, определяемом реакцией газификации. Диаграмма показывает, что в печи равновесный состав газа не достигался. Иначе при давлении 98 кПа и температуре ниже 650°С (кривая 2, точка *а*) не получить FeO из Fe_3O_4, как Fe из FeO при температуре ниже 685°С (кривая 2, точка *б*). А поскольку равновесие в реальном газе не достигается, то становятся возможными реакции косвенного восстановления Fe_3O_4 и FeO в условиях более низких температур.

Таким образом, состав газов из стекол и самородного чугуна однозначно указывает на природный доменный процесс, имевший место на горе Янгантау. Судя по примесям марганца и кремнезема, рудой для выплавки чугуна послужили слои бурого железняка, которые часто образуют скопления на закарстованной поверхности известняков.

Выводы по изучению образца металла

В результате проведенных исследований образца металла с термальной аномалии г. Янгантау подтверждено, что это самородный чугун. В составе газов из металла и стекла с его поверхности, выде-

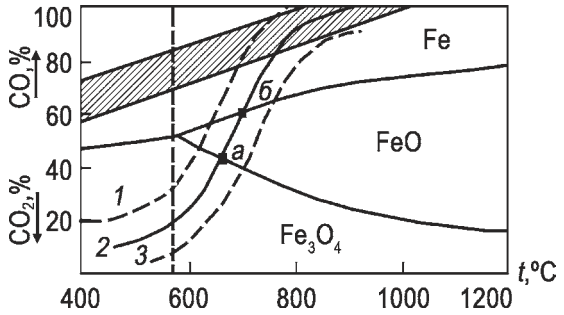

Рис. 23. Совмещенная диаграмма равновесий в системе Fe–O–CO и C–CO–CO_2 (по [Вегман и др., 2004])

Заштрихованная область — изменения реальных газов в доменной печи. Цифрами 1–3 обозначены кривые равновесия в системе C–CO–CO_2 (при давлениях 1 — 49, 2 — 98 и 3 — 147 кПа). Точка а — восстановление по реакции (1), а точка б — по реакции (2) при давлении 98 Кпа.

Fig. 23. A combined diagram of equilibrium in the sysnem Fe–O–CO and C–CO–CO_2 (after Vegman et al., 2004)

The hatched area — changes of real gases in a blast furnace. The numbers 1–3 show the curves of equilibria in the system Fe–O–CO and C–CO–CO_2 (under pressures: 1 — 49, 2 — 98 and 3 — 147 Kpa). Point a — reduction with the reaction (1), and point b — with the reaction (2) under pressure of 98 Kpa.

лившихся в интервале температур 600–1000°С, велика доля монооксида углерода, что указывает на имевший место природный доменный процесс. Рудой для образования чугуна послужили, вероятно, скопления бурого железняка, которые часто образуются на закарстованной поверхности известняков. Самородный чугун термальной аномалии г. Янгантау образовался в относительно недавнее время, но это может быть и 100, и 200 лет назад — ближе ко времени экспедиции Палласа, когда температура исходящих газов составляла сотни градусов, а в их составе преобладал угарный газ. Таким образом, изучение слитка чугуна позволило нам приблизиться к пониманию характера процессов (температуры и выделяемых газов) на ранних стадиях развития очага.

Палеотемпературы пород на поверхности земли

Изучение палеотемператур горных пород, проведенное А.С. Бобоховым по разработанной им методике изучения индекса термодегазации, выявило несколько поверхностных палеотермальных аномалий,— не только в районе Янгантау, где температуры местами достигали, по данным этого исследователя, 600°С (максимальной величины, измеряемой данным методом), но и в других местах,— например, до 200°С в ядре расположенной западнее Месягутовской антиклинали, осложненной одноименным надвигом (рис. 2), и до 400°С в лежачем крыле этого надвига [Нигматулин и др., 1998].

Таким образом, процесс выделения тепла шел по убывающей: первоначально температуры вблизи земной поверхности могли достигать сотен °С, но постепенно температура процесса снижалась, и он уходил вглубь горы. По Г.Ф. Пилипенко [1966], на период его наблюдений горячая зона находилась на глубине до 100 м под бровкой крутого борта долины р. Юрюзань, была вытянута в широтном направлении и имела гантелеобразную форму (рис. 12).

Для понимания природы процесса полезно было изучить более внимательно породы, подвергшиеся прокаливанию,— так называемые ***горелики***, развитые на поверхности в пределах вышеуказанных палеотермальных аномалий (рис. 24, 25).

Горелики

Эти породы красноватого (до кирпичного), белого, серого, голубовато-серого, розоватого, розовато-желтого цветов резко контрастируют с темно-серыми битуминозными мергелями янгантауской свиты, среди которых они находятся. В обнажениях уступа г. Янгантау, обращенного к реке, они отмечены на двух уровнях (рис. 24, 25). Верхний образует плоскостную зону, непосредственно связанную с тепловой «гантелей», и выходит вблизи бровки берегового склона. Сейчас склон сильно зарос по сравнению со временем, когда проводились наиболее подробные исследования, и вдобавок боковая эрозия реки и обрушения склона очень интенсивны, но выходы гореликов все же можно наблюдать, например, в 3 м ниже смотровой беседки на западном краю курорта. В более восточных районах они проявляют себя двумя шлейфами осыпей на крутых не заросших растительностью участках склона долины р. Юрюзань, а также встречаются в лесу на склоне, где они могут быть прослежены по остаткам выемок, сделанных десятилетия назад «дикими» курортниками, занимавшимися самолечением. Именно эти горелики, прослеживающиеся вблизи контакта между янгантауской и тандакской свитами, близки к предполагаемой зоне надвига, с трением по которой сторонники «тектонической», или «шарьяжной» теории связывали происхождение термальной аномалии. Однако горелики верхнего уровня не следятся по какой-то одной поверхности, которую можно было бы идентифицировать с поверхностью надвига. Горелики нижнего уровня, которые, по-видимому, также связаны с очагом,— с нижней частью его южного окончания (рис. 24), вообще выходят локально, имея вид протуберанца. Здесь нет никаких геологических оснований для того, чтобы предполагать еще один надвиг: вверх по восстанию слоев (аз. пд. 70°, ∠10°) горелики переходят в неизмененные мергели, отчетливо пахнущие битумом при ударе. Естественные обнажения горелых пород этого уровня находятся в крутом обрыве берега, в 100 м к востоку от железной лестницы и примерно в 10 м выше уреза воды (там, где старожилы указывали на высыпки извести). Среди развитых здесь разноцветных пород особое внимание обращают на себя кирпично-красные «звонкие» плитчатые сланцы.

Термограммы их, полученные на дериватографе, не дают пиков: по-видимому, это наиболее сильно обожженные разности. Красный цвет объясняется переходом закисного железа в окисное при обжиге. На поверхностях плиток найдены сохранившиеся отпечатки гониатитов — пелагической фауны, которая не встречается в природных континентальных красноцветах.

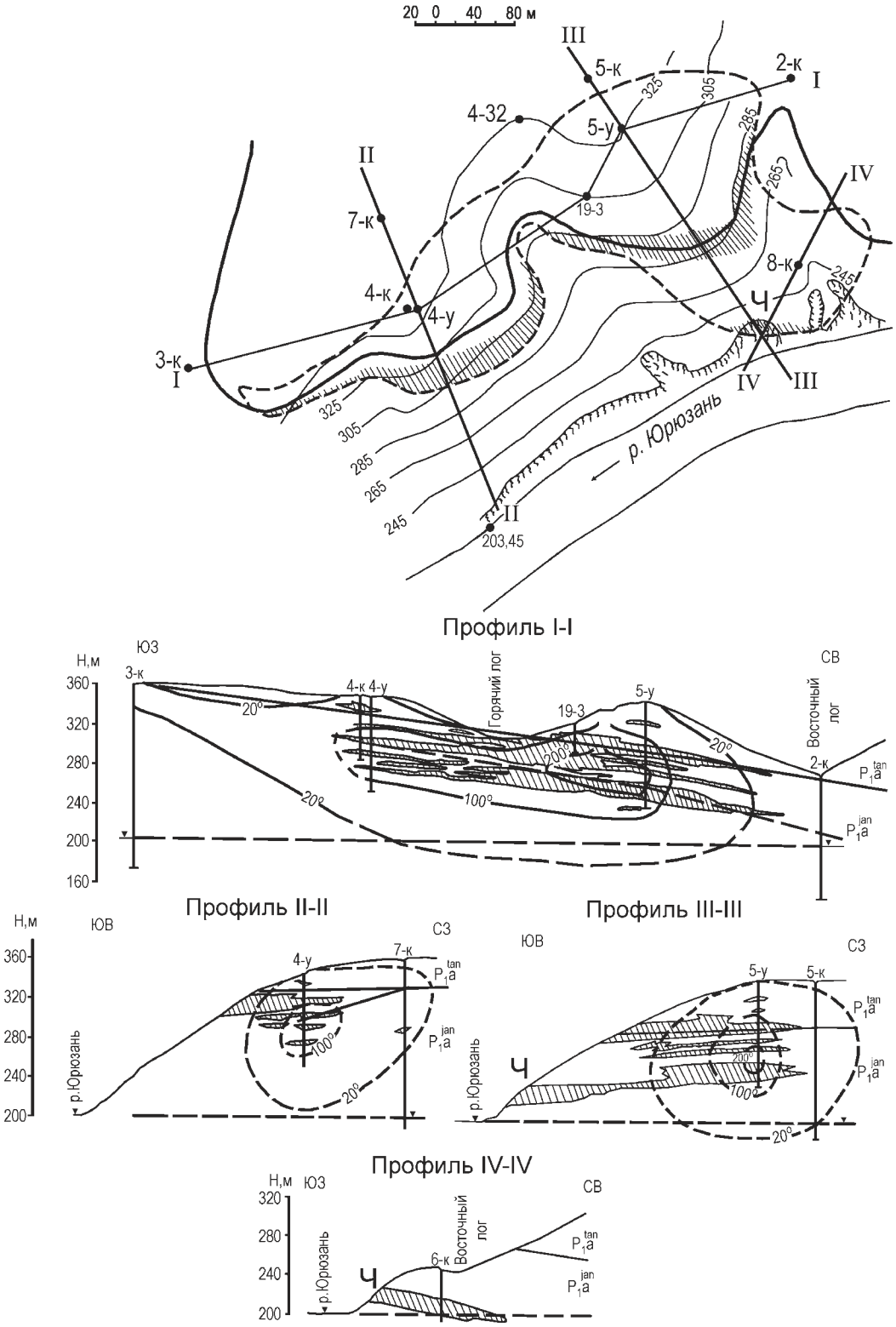

Рис. 24. Распределение горелых пород и связь их с тепловыми аномалиями. Горелые породы показаны косой штриховкой (по данным Г.Ф. Пилипенко и др.). Ч — примерное положение черного блока на плане и в пересечении профилей III–III и IV–IV

Fig. 24. A distribution of burnt rocks and their connection with the temperature anomalies. The burnt rocks are hatched (after data of G.F. Pilipenko et al.). Ч — approximate position of the «black block» on plan and on transection of profiles III–III and IV–IV

Важной деталью этого обнажения являются также впервые описанные на Янгантау «черные блоки» (рис. 26–28). Данный термин обычно используется специалистами по минералогии техногенеза, изучающими отвалы угольных бассейнов (терриконы), в которых, как известно, происходит самопроизвольное горение оставшегося угля. Черные блоки — это участки не прогоревших пород, сильно прокаленных без доступа кислорода. В них шли процессы, сходные с сухой перегонкой углистых и битуминозных веществ, в результате чего образуется вещество, близкое к саже или шунгиту, практически не содержащее летучих. «...Вся масса породы равномерно пропитывается значительным количеством углеродистого вещества типа газовой сажи и становится черной...» [Чесноков,

Рис. 25. Типичные горелики
Fig. 25. Typical burnt rocks (“goreliks”)

Рис. 26. Черный блок среди гореликов
Fig. 26. “Black block” among “gorelik”

Щербакова, 1991]. В нашем случае это небольшие, до 2 м в поперечнике участки, приближенные к нижней части горелой зоны. Анализы органики, произведенные в лаборатории ИОХ РАН (аналитик Г. Анпилогова), даются в табл. 4.

Из таблицы (табл. 4) анализов, сделанных в лаборатории ИОХ РАН, ясно, что углеводороды в черных блоках отсутствуют. Часть вещества могла уйти в виде CO_2 и других газов при прокаливании анализируемых проб.

Таблица 4
Table 4

№№ обр.	%C	%H	%N	% золы
Обр. 22б-1 П01	14,2	Отсутствует	Отсутствует	67,56
Обр. 22б-2 П01	13,7	Отсутствует	Отсутствует	67,56

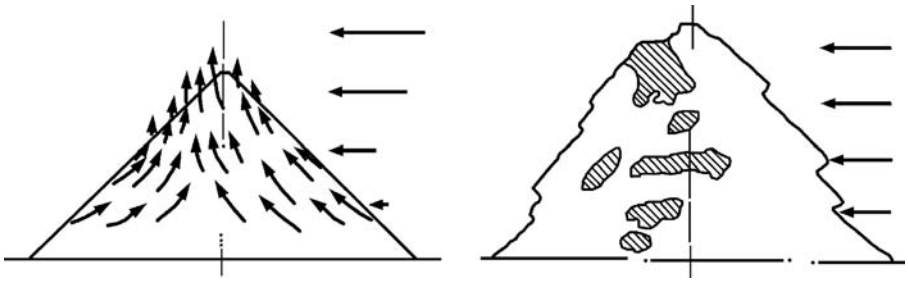

Рис. 27. Схема предполагаемого движения газов в термически активном терриконе и положение черных блоков, образующихся в случае недостаточного обеспечения процесса горения кислородом

Стрелки — направление ветра, заштриховано — черные блоки [Чесноков, Щербакова, 1991].

Fig. 27. The scheme of suggested movements of gases in thermically active coal refuse heap and a position of "black blocks", forming in case of insufficient supply of an oxygen

Arrows are the direction of wind; hatched are "black blocks" (Chesnokov, Scherbakova, 1991).

Рис. 28. Тот же черный блок, что на рис. 26, видный среди гореликов (слева вверху) с противоположного берега реки. Представление о масштабе дает фигурка рыбака справа у уреза воды

Fig. 28. The same "black block" of the fig. 26, among "goreliks" at the upper left of the outcrop seen from the left bank of the river. For the scale is a fisherman to the right below

В таблице обращает на себя внимание также значительное содержание углерода, что может служить свидетельством большего содержания горючего вещества (свыше 15–20%) в зоне горения по сравнению с фоновым содержанием битумов во вмещающих мергелях (1,96–3,7%). Объяснения этому давались разные: то ли это разрушенное *in situ* месторождение нефти, то ли постоянный, постепенно иссякающий подток углеводородов к природному очагу [Фаттахутдинов и др., 1982] — выбрать правильный вариант сейчас достаточно трудно, однако сам факт окисления органического вещества можно считать доказанным. В любом случае в баланс окислительных процессов и расчетов производимой тепловой энергии необходимо включать и фоновые значения битумов: ведь в измененных породах (гореликах) битумы отсутствуют, так как они были выжжены, или полностью окислены.

Мы предлагаем альтернативное объяснение обсуждаемому феномену: концентрация битумов выше фоновых значений могла быть связана с их возгонкой на краю горячей зоны с последующим отложением и концентрацией на ее более дальней периферии.

Причиной образования черных блоков в описанном случае, вероятно, является частичная изоляция от поддува той части склона, на которой они находятся, благодаря наличию в момент горения мощного глинисто-щебенчатого делювиального шлейфа, который мог быть впоследствии размыт рекой.

Баланс CO_2 и O_2 и процесс окисления/горения

О балансе кислорода и углекислого газа изучавший этот вопрос Г.Ф. Пилипенко [1966], как и его предшественник В.В. Штильмарк, говорят в своих публикациях предельно скупо, почти как о чем-то само собой разумеющемся, поскольку они уверены, что причиной образования термальных газов являются окислительные экзотермические процессы. «...Термальные газы отличаются от атмосферного воздуха повышенным содержанием CO_2 (до 15%) при соответствующем снижении количества O_2. На месторождении выделяются две зоны, резко отличающиеся друг от друга по режиму и составу газов: нижняя (термальное ядро) — замедленного газообмена (CO_2 больше 6,5%) и верхняя — интенсивной циркуляции и «продувания» (CO_2 меньше 6,5%)...» [Пилипенко, 1966]. Поскольку, однако, до сих пор существуют противники теории горения/окисления, предлагающие альтернативные концепции источника энергии (тепло трения, радиоактивного распада, вулканического очага и т.п.), мы приводим некоторые типичные графики замеров содержания CO_2 и O_2 в скважинах в зависимости от глубины, взятые из отчетов Г.Ф. Пилипенко (рис. 29, слева). Легко видеть, что графики содержания этих газов, соотнесенные с глубиной скважины, зеркально противоположны: вблизи очага кислород поглощается с образованием углекислого газа, а по мере движения к устью скважины термальный газ разбавляется воздухом; в результате содержание кислорода растет, а углерода — падает. Такая же зеркальная симметрия наблюдается между графиками концентраций O_2 и CO_2 при сезонных наблюдениях (рис. 29, справа), где главную роль играет интенсивность поддува воздуха и его изначальная температура.

Присутствие углекислого газа и часто почти полное отсутствие кислорода вблизи термального максимума указывают на то, что экзотермические реакции продолжались и в момент проведения наблюдений. Более того, в единичных случаях, как в скважине 13э, Г.Ф. Пилипенко в 1958–59 гг. фиксировались даже угарный газ — 0,1% и водород — 0,06% [Пилипенко, 1960]. Еще более убедительные данные о существовании продолжающегося в настоящее время окислительного процесса получены рабочей группой химиков ИОХ УНЦ РАН [Муринов и др., 2001 г.]. Проанализировав образцы газа и конденсатов паров скважин «22» и «27», они установили в пробах, наряду с повышенным содержанием углекислого газа, систематическое наличие угарного газа и водорода. Установленное в конденсате пара наличие предельных и непредельных углеводородов и соответствующих им окисленных соединений (спирты, кетоны, сложные эфиры, кислоты) также подтверждает гипотезу термоокислительной деструкции сланцев в очаге горения. Продукты термоокислительной деструкции углеводородов и углеводороды выносятся из очага горения в результате перегонки с водяным паром. Наблюдения показали, что содержание CO_2, CO и температура паронасыщенного газа значительно изменяются в зависимости от сезона и направления ветров (т.е. от температуры воздуха, интенсивности поддува и количества поступающей воды).

В 200–250 м от термального ядра на берегу р. Юрюзань из мергелей вытекают субтермальные (T до 20°C) источники, имеющие низкую M (0,7–

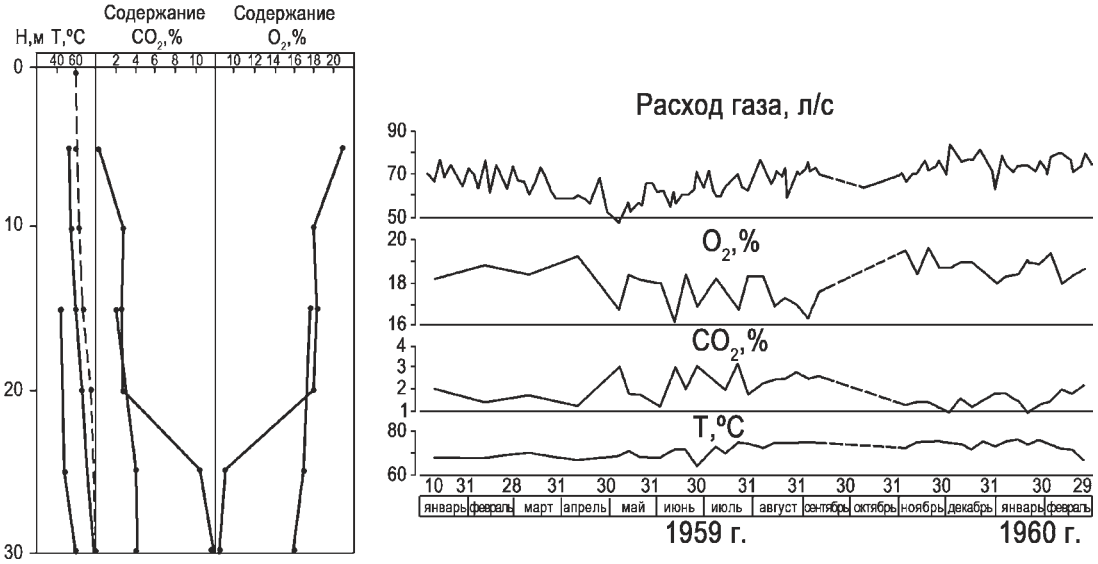

Рис. 29. Слева: соотношение температур, концентраций O_2 и CO_2 в каптажной скважине № 13-э на г. Янгантау. Цифры слева — глубины в м. Справа: соотношение дебита газа, температур, концентраций O_2 и CO_2 в зависимости от времени года (данные через каждые десять дней) в скважине № 4-К. По данным Г.Ф. Пилипенко и др., 1959 и 1961 гг.

Fig. 29. On the left: a relation of temperatures, concentrations of O_2 and CO_2 in captated borehole No 13-э inYangantau. The numbers on the left — depth in m. The picture on the right: a relation a gas discharge, temperatures, concentrations of O_2 and CO_2 in dependence of the season (the data after each 10 days) in the borehole No 4-K. After data of G.F. Pilipenko et al., 1959 and 1961.

0,8 г/дм^3) и HCO_3–SO_4–Mg–Ca состав. В газовом составе в высоких концентрациях (до 8,0 мг/л) присутствует O_2 (рис. 30).

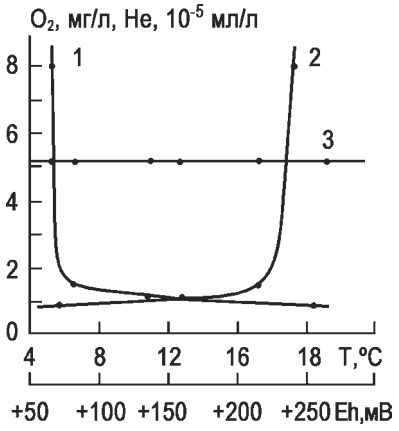

Рис. 30. Связь O_2 и He с T и Eh в водах Янгантауских источников
Линии: 1 — T, 2 — Eh, 3 — He.

Fig. 30. The relation of O_2 and He with T and Eh
The lines: 1 — T, 2 — Eh, 3 — He.

Низкие (фоновые) концентрации He в воде источников — (4,9–5,9)·10^{-5} мл/л — определенно свидетельствуют в пользу экзогенной природы уникальных газовых терм г. Янгантау [Абдрахманов, 2014]. На это также указывает и тот факт, что по мере роста T воды (6,0...18,5°C) наблюдается уменьшение содержания O_2 (8,0...1,5 мг/л) в связи с его расходованием на окислительные процессы. Легко видеть также, что He индифферентен к росту T, а кривые поведения T и Eh воды, соотнесенные с содержанием O_2, имеют зеркально противоположный характер: поглощение O_2 сопровождается закономерным снижением Eh (+240...+70 мВ).

Качественная модель феномена Янгантау

Несколько лет назад была предложена первая количественная модель феномена Янгантау, основанная на гипотезе образования тепла за счет трения в подошве шарьяжа, наличие которого предполагалось вблизи границы тандакской и янгантауской свит [Нигматулин и др., 1998]. Модель была рассчитана для однофазной системы (горная порода), исходя из предположения, что процесс надвигания продолжается в настоящее время (однако в реальности этого не могло быть, ибо в случае продолжения надвигания с предполагаемой скоростью 2 см в год стволы скважин, в которых производится мониторинг процесса, были бы срезаны). Расчеты производились из предположения о кондуктивном способе остывания, что при-

вело к очень оптимистическому прогнозу скорости остывания очага (0,1 градус/год) — и то в случае прекращения процесса надвигания. Приведенные выше данные не подтверждают столь упрощенной оценки процесса. Здесь имеет место многофазная система, в которой, помимо горных пород, участвуют и взаимодействуют также метеорные осадки, атмосферный воздух, водяной пар, смешанный с продуктами горения, битумы, содержащиеся в породе, и не только сгорающие, но и частично возгоняющиеся и переотлагающиеся в холодной зоне на периферии очага, а также, возможно, углеводороды, дополнительно подпитывающие горение (рис. 31). Создать математическую модель такой системы будет крайне затруднительно, так как в нее входят неизвестные компоненты (в частности, общий дебит газа и возможный подток углеводородов).

Аналогии с другими объектами

Уже говорилось о сходстве системы Янгантау с терриконами (Б.В. Чесноковым и его учениками [Чесноков, Щербакова, 1991 и др.] хорошо изучены терриконы Челябинского угольного бассейна). Температуры, возникающие при горении, здесь местами столь велики, что приводят к плавлению пород с образованием парабазальтов; плавятся и крупные железные детали, например, рельсы (эти явления демонстрируются в Минералогическом музее Ильменского Государственного Заповедника). Можно провести аналогии с районами естественного горения углей и горючих сланцев (Ангрен, Прибалтийский сланцевый бассейн и др.), с зоной экспериментальной газификации углей (Тула).

Горение неглубоко залегающих обогащенных органикой озерных отложений описано в районе Тимбукту в Северном Мали (Африка) [Svensen et al., 2003]. В этом районе процесс горения органического вещества, составляющего до 8% породы, идет при температурах до 830°С, вызывая плавление диатомита с образованием «даек», породообразующим минералом в которых является модификация кварца — кристобалит. Метаморфические породы условий высоких температур – низких давлений описаны также для многих случаев контактовых воздействий, когда образуются роговики [Ревердатто, 1970 и др.].

По своей геологической позиции горелики Янгантау близки также к формации Хатрурим Иудейской пустыни [Gross, 1977]. Эта пестроцветная формация образовалась за счет горения битумов в мергелях и меле формаций Такийя и Гареб верхнемелового – палеоценового возраста. Неизмененные породы во многих обнажениях битуминозны и местами могут рассматриваться как горючие сланцы (до 26% $C_{орг}$). Судя по присутствию высокотемпературных минералов, детально описанных в работе С. Гросса, температуры могли достигать 1000°С.

Янгантауская свита в части, доступной наблюдению, содержит значительно меньше битумов, чем в случае приведенных примеров, и как уже говорилось, для поддержания процесса их выгорания, возможно, требуется независимый источник горючего материала (приток горючего газа из разрушающегося месторождения углеводородов на значительной глубине?). Впрочем, никаких прямых доказательств этого не имеется.

Выводы

Находит дополнительные подтверждения гипотеза окисления/горения (в частности, особенности геологии гореликов и черных блоков; следы природного металлургического процесса). При этом в связи с относительно низким содержанием битумов вблизи термального очага допустимо (хотя и не строго обязательно) сделать предположение о подпитке процесса горения притоком углеводородов (газ?) за счет разрушающегося месторождения на глубине.

Есть основания предположить, что в близповерхностной зоне в момент температурного пика шел уникальный естественно-металлургический процесс типа доменного [Пучков и др., 2012].

Наблюдения за соотношением CO_2/O_2, присутствие в газопаровых источниках закиси углерода, водорода, продуктов окисления углеводородов, зависимость температуры и состава газов от сезонной интенсивности и направления ветров и др. свидетельствуют о конвективном способе остывания и заставляют рекомендовать пересмотр модели функционирования Янгантау в пользу ее трактовки как многофазной системы.

По приведенным наблюдениям скорость остывания газов превышает ранее высказывавшиеся оценки, что заставляет рекомендовать руководству курорта при долгосрочном планировании искать альтернативу газотермальным ваннам как основному лечебному средству или заранее разработать методику искусственной реанимации очага. Следует также обратить большее внимание на альтерна-

тивные бальнеологические ресурсы территории, связанные с особенностями природных источников в ближайшем окружении курорта (см. статью Р.Ф. Абдрахманова в данном выпуске журнала).

Авторы выражают благодарность академику Р.И. Нигматулину за содействие в организации и проведении исследований на начальном этапе; администрации курорта «Янган-Тау» в лице его бывших директоров И.Ш. Хурамшина и Р.Р. Бадретдинова, сотруднику курорта Р.А. Юсупову за постоянную помощь, Б.В. Чеснокову за консультации по геологическим процессам в терриконах, Т.П. Нишанбаеву и Ю.И. Муринову за содействие в получении анализов, А.П. Черникову, А.О. Полевой за техническое содействие. Выражаем благодарность также рецензентам первоначальных вариантов статей по проблеме Янгантау: Л.С. Табаксблату и Э.Ф. Емлину. Особую благодарность авторы выражают нынешней администрации курорта «Янган-Тау» и его директору А.Р. Акбашеву за финансовую поддержку данного выпуска нашего журнала с цветными иллюстрациями, посвященного Проекту «Геопарк Янган-Тау».

Работа проводилась по темам госзадания № 0252-2014-0002, № 0252-2014-0017, частично при поддержке гранта АНРБ и Проекта MinUrals.

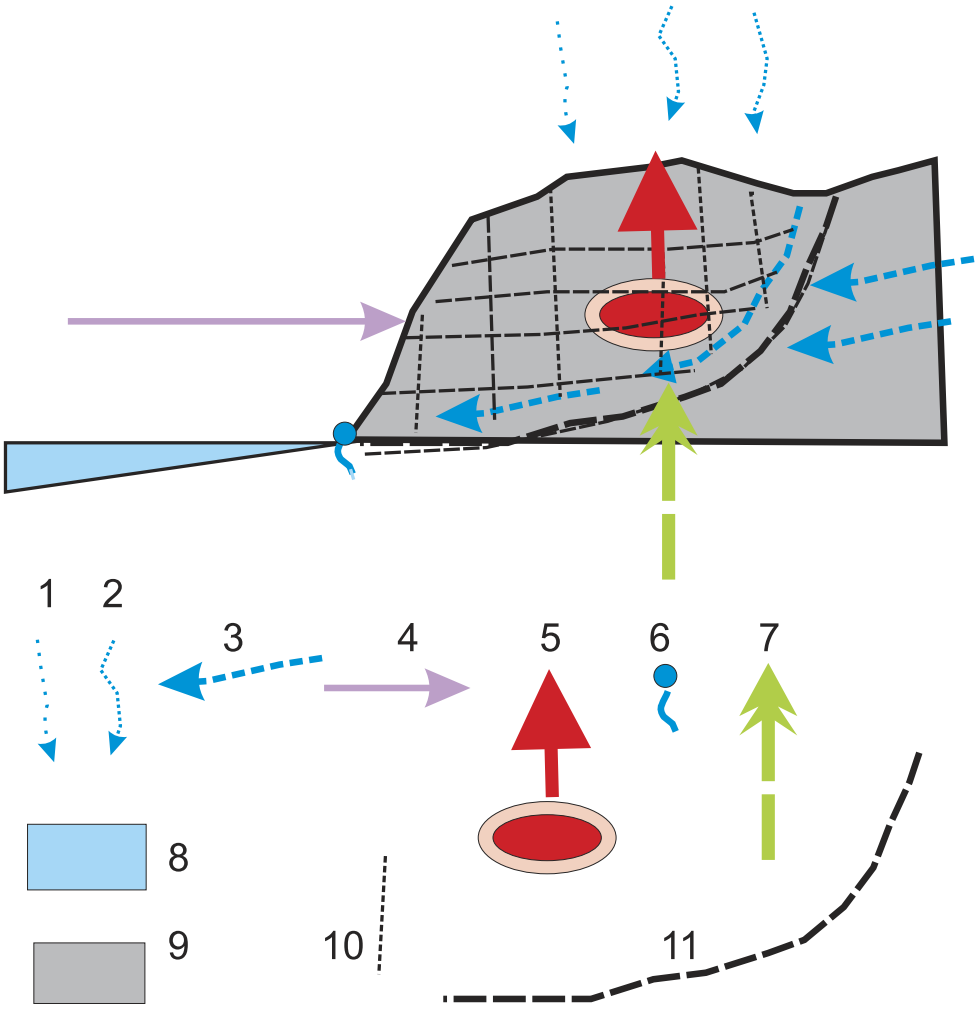

Рис. 31. Качественная модель многофазной газогенерирующей системы Янгантау

Условные обозначения: 1, 2 — метеорные осадки (1 — снег, 2 — дождь); 3 — подземные воды, 4 — ветер, 5 — очаг горения и горячие газы; 6 — родник; 7 — возможный подток горючего газа; 8 — вода реки; 9 — горный массив; 10 — сетка трещиноватости пород; 11 — трещина бортового отпора

Fig. 31. The qualitative model of the multi-phase gas-generative system of Yangantau

Legend: 1, 2 — meteoric precipitation (1 — snowfall, 2 — rainfall); 3 — underground waters; 4 — wind; 5 — center of burning and hot gases; 6 — spring; 7 — a probable supply of a hydrocarbon; 8 — water of the river; 9 — rock massif; 10 — the net of fractures; 11 — a board repulse fracture.

Литература:

Абдрахманов Р.Ф. Пресные подземные и минеральные лечебные воды Башкортостана. – Уфа: Гилем, 2014. – 416 с.

Вахрушев Г.В., Алкснэ А.Э., Ревенко Э.А. Новые данные о тектонике южной части Юрюзано-Сылвенской депрессии в Приуралье // Геотектоника. – 1968. – № 1. – С. 82–85.

Вегман Е.Ф., Жеребин Б.Н., Похвистнев А.Н. Юсфин Ю.С., Курунов И.Ф., Пареньков А.Е., Черноусов П.И. Металлургия чугуна / *Под ред. Ю.С. Юсфина*. – М.: Академкнига, 2004. – 774 с.

Дзенс-Литовский А.И. Гора Янгантау // Изв. Гос. Геогр. Об-ва. – 1935. – Т. LXVII, вып. 3. – С. 332–351.

Кисин А.Ю., Коротеев В.А., Сазонов В.Н. Проявление эруптивного магматизма на Уфимском плато // Докл. РАН. – 2002. – Т. 385, № 1. – С. 80–82.

Мезенин Н.А. Занимательно о железе. – М.: Металлургия, 1972. – 200 с.

Миронова О.Ф., Наумов В.Б., Салазкин А.Н. Азот в минералообразующих флюидах. Газохроматографическое определение при исследовании включений в минералах // Геохимия. – 1992. – № 7. – С. 979–991.

Наливкин В.Д. Стратиграфия и тектоника Уфимского плато и Юрюзано-Сылвенской депрессии – Л., 1939. – 205 с. – (Тр. ВНИИГИ; Нов.сер., Вып. 46).

Нигматулин Р.И., Казанцева Т.Т., Камалетдинов Р.И., Казанцев Ю.В., Бобохов А.С. Геология и генезис тепловых аномалий Янгантау. – Уфа: АН РБ, Отделение наук о Земле и экологии, 1998. – 71 с.

Паллас П.С. Путешествие по разным провинциям Российского государства: Россия XVIII в. глазами иностранцев. – Л.: Лениздат, 1989. – 544 с.

Петровский В.А., Силаев В.И., Мартине М., Карфункель И., Сухарев А.Е. Флюидные фазы в карбонадо и их генетическая информативность // Геохимия. – 2008. – № 7. – С. 748–765.

Пилипенко Г.Ф. Предварительный отчет по подсчету эксплуатационных ресурсов термальных газов г. Янган-Тау (по работам 1958–1959 гг.) / Институт курортологии и физиотерапии. – М., 1960. – Т. 1. – 151 с.

Пилипенко Г.Ф. Геотермический режим и ресурсы термальных газов горы Янгантау в Башкирии // Геотермические исследования и использование тепла земли. – М.: Наука, 1966. – С. 304–310.

Пучков В.Н., Абдрахманов Р.Ф. Особенности газогидро-геотермальных явлений горы Янгантау и прилегающих территорий // Литосфера. – 2003. – № 4. – С. 65–77.

Пучков В.Н., Кисин А.Ю., Шанина С.Н. Природный доменный процесс на г. Янган-Тау, Южный Урал // Литосфера. – 2012. – № 5. – С. 166–172.

Ревердатто В.В. Фации контактового метаморфизма. – М.: Наука, 1970. – 263 с.

Штильмарк В.В. Экзогенная геотермальная аномалия горы Янган-тау в Западном Приуралье // Доклады к собранию Международной Ассоциации гидрогеологов. – М.: Госгеолтехиздат, 1960. – С. 310–314.

Фаттахутдинов С.Г., Конюхов А.И., Корчагина Ю.И., Акбашев Р.Ш. Генезис термальных явлений горы Янган-тау // Вопросы минералогии, геохимии и генезиса полезных ископаемых Южного Урала. – Уфа: БФАН СССР, 1982. – С. 110–116.

Хурамшин И.Ш. Формирование теплогенеративного процесса и лечебных факторов курорта Янган-Тау. – Уфа: Типография им. Дзержинского, 2007. – 361 с.

Чесноков Б.В., Щербакова Е.П. Минералогия горелых отвалов Челябинского угольного бассейна. Опыт минералогии и техногенеза. – М.: Наука, 1991.– 152 с.

Gross S. The mineralogy of the Hatrurim formation, Israel // Geol. Surv. Israel, Bull. – 1977. –No 70. – 80 p.

Svensen H., Dysthe D.K., Bandlien E.H., Sacko S., Coulibaly H., Planke S. Subsurface combustion in Mali: refutation of the active volcanism in West Africa // Geology. – 2003. – V. 31, No 7. – P. 581–584.

References:

Abdrakhmanov R.F. Presnye podzemnye i mineral'nye lechebnye vody Bashkortostana [Sweet and mineral medical underground waters of Bashkortostan]. Ufa: Gilem, 2014. 416 p. (In Russian).

Chesnokov B.V., Scherbakova Ye.P. Mineralogija gorelyh otvalov Cheljabinskogo ugol'nogo bassejna. Opyt mineralogii i tehnogeneza [Mineralogy of burning waste heaps of the Chelyabinsk coal basin The experience in mineralogy and technogenesis]. M.: Nauka, 1991. 152 p. (In Russian).

Dzens-Litovsky A.I. Gora Jangantau [Yangan-Tau mountain] // Izvestia State geogr. Soc. 1935. LXVII, 3. P. 332–351 (In Russian).

Fattakhutdinov S.G., Konyukhov A.I., Korchagina,Yu.I., Akbashev R.Sh. Genezis termal'nyh javlenij gory Jangan-tau [The genesis of thermal phenomena of Yangantau mountain] // Voprosy mineralogii, geohimii i genezisa poleznyh iskopaemyh Juzhnogo Urala [The questions of mineralogy, geochemistry and genesis of raw materials of the Southern Urals]. Ufa: Bash. Branch of Ac.Sci. USSR, 1982. P. 110–116 (In Russian).

Gross S. The mineralogy of the Hatrurim formation, Israel // Geol. Surv. Israel, Bull. 1977. No 70. 80 p.

Kissin A.Yu., Koroteev V.A., Sazonov V.N. Projavlenie eruptivnogo magmatizma na Ufimskom plato [Manifestation of an eruptive magmatism on the Ufimian plateau] // Doklady Earth Sci. 2002. 385, No 1. P. 80–82 (In Russian).

Khuramshin I.Sh. Formirovanie teplogenerativnogo processa i lechebnyh faktorov kurorta Jangan-Tau [Formation of a heat-generating process and medical factors of the Yangantau resort]. Ufa: GUP IPK MVD RB "Dzerzhinsky" printing office, 2007. 61 p. (In Russian).

Mezenin N.A. Zanimatel'no o zheleze [Entertaining stuff about iron]. M.: Metallurgy, 1972. 200 p. (In Russian).

Mironova Yu.I., Naumov V.B., Salazkin A.N. Azot v mineraloobrazujushhih fljuidah. Gazohromatograficheskoe opredelenie pri issledovanii vkljuchenij v mineralah [Nitrogen in mineral-forming fluids. Gas-chromatographic determination in study of mineral inclusions] // Geochemistry. 1992, 7. P. 979–991 (In Russian).

Nalivkin V.D. Stratigrafija i tektonika Ufimskogo plato i Jurjuzano-Sylvenskoj depressii [The stratigraphy and tectonics of the Ufimian plateau and Yuryuzan-Sylva depression] // Transactions of the State Scientific Research Oil Institute. 1939. New ser., 46. 205 p. (In Russian).

Nigmatulin R.I., Kazantseva T.T., Kamaletdinov M.I, Kazancev Ju.V., Bobohov A.S. Geologija i genezis teplovyh anomalij Jangantau [Geology and genesis of heat anomalies of

Yangantau]. Ufa: Ac. Sci. RB, the Department of Earth sciences and ecology, 1998. 71 p. (In Russian).

Pallas P.S. Puteshestvie po raznym provincijam Rossijskogo gosudarstva [The travel in different provinces of Russian State] // Rossiya XVIII v. glazami inostrancev [Russia of the XVIII century in eyes of foreigners]. L.: Lenizdat, 1989. 544 p. (In Russian).

Petrovsky V.A., Silaev V.I., Martine M., Karfunkel' I., Sukharev A.Ye. Fljuidnye fazy v karbonado i ih geneticheskaja informativnost' [Fluid phases in carbonado and their genetic informativity] // Geochemistry. 2008. No 7. P. 748–765 (In Russian).

Pilipenko G.F. Predvaritel'nyj otchet po podschetu jeksploatacionnyh resursov termal'nyh gazov g. Jangan-Tau (po rabotam 1958–1959 gg.), t.1. Institut kurortologii i fizioterapii [A preliminary report on the calculation of exploitational resources of thermal gases of Yangantau mountain (after the works of 1958–1959 years). v.1. Institute of balneology and physiotherapy]. M., 1960. 151 p. (In Russian).

Pilipenko G.F. Geotermicheskij rezhim i resursy termal'nyh gazov gory Jangantau v Bashkirii [Geothermal regime and resources of the thermal gases of the Yangantau mountain in Bashkortostan] // Geotermicheskie issledovanija i ispol'zovanie tepla zemli [Geothermal studies and use of ground heat.]. Moscow, Nauka Publ., 1966. P. 304–310 (In Russian).

Puchkov V.N., Abdrakhmanov R.F. Osobennosti gazogidrogeotermal'nyh javlenij gory Jangantau i prilegajushhih territorij [Specific features of gashydro- and geothermal phenomena of Yangantau mountain and adjacent territories] // Lithosphere. 2003. No 4. P. 65–77 (In Russian).

Puchkov V.N., Kissin A. Yu., Shanina S.N. Prirodnyj domennyj process na g. Jangan-Tau, Juzhnyj Ural [The natural blast furnace process on the Yangantau mountain, Southern Urals] // Lithosphere. 2012. No 5. P. 166–172 (In Russian).

Reverdatto V.V. Facii kontaktovogo metamorfizma [The facies of contact metamorphism]. M.: Nauka, 1970. 263 p. (In Russian).

Stilmark V.V. Ekzogennaja geotermal'naja anomalija gory Jangan-tau v Zapadnom Priural'e [Exogenic geothermal anomaly of Yangantau mountain] // Doklady k sobraniju Mezhdunarodnoj Associacii gidrogeologov [Reports to the Meeting of the international Association of hydrogeologists]. M.: Gosgeoltekhizdat, 1960. P. 310–314 (In Russian).

Svensen H., Dysthe D.K., Bandlien E.H., Sacko S., Coulibaly H., Planke S. Subsurface combustion in Mali: refutation of the active volcanism in West Africa // Geology. 2003. V. 31, No 7. P. 581–584.

Vakhrushev G.V., Alksne A.E., Revenko E.A. Novye dannye o tektonike juzhnoj chasti Jurjuzano-Sylvenskoj depressii v Priural'e [New data on tectonics of the southern part of the Yuryuzan-Sylva depression in the Cis-Urals] // Geotectonics. 1968. No 1. P. 82–85 (In Russian).

Vegman E.F., Zherebin B.N., Pokhvistnev A.N., Yusfin Yu.S., Kurunov I.F., Paren'kov A.E., Chernousov P.I. Metallurgija chuguna [Metallurgy of cast iron] / *Yu.S. Yusfin (ed)*. M.: Akademkniga, 2004. 774 p. (In Russian).

Сведения об авторах:

Пучков Виктор Николаевич, член-корр. РАН, профессор, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: puchkv@ufaras.ru

Абдрахманов Рафил Фазылович, доктор геол.-мин. наук, профессор, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: hydro@ufaras.ru

Кисин Александр Юрьевич, доктор геол.-мин. наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого Уральского отделения Российской академии наук (ИГГ УрО РАН), г. Екатеринбург. E-mail: kissin@igg.uran.ru

Шанина Светлана Николаевна, канд. геол.-мин. наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (ИГ Коми НЦ УрО РАН), г. Сыктывкар, shanina@geo.komisc.ru

About the authors:

Puchkov Victor Nikolaevich, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Professor, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: puchkv@ufaras.ru

Abdrakhmanov Rafil Fazylovich, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: hydro@ufaras.ru

Kisin Aleksandr Yurievich, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, The Federal State Institution of Science the Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IGG UB RAS), Ekaterinburg. E-mail: kissin@igg.uran.ru

Shanina Svetlana Nikolaevna, Institute of Geology of the Komi Science Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IG Komi SC UB RAS), Syktyvkar, shanina@geo.komisc.ru