

© Д. чл. Г. Т. СКУБЛОВ, * поч. чл. Ю. Б. МАРИН, ** д. чл. С. Г. СКУБЛОВ, ***
Б. Ф. БИДЮКОВ, **** Л. Н. ЛОГУНОВА, **** В. В. ГЕМБИЦКИЙ, ** Е. С. НЕЧАЕВА*

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РЫХЛЫХ И КОРЕННЫХ ПОРОД ИЗ ЭПИЦЕНТРА ТУНГУССКОЙ КАТАСТРОФЫ 1908 г.

* e-mail: skublov@land.ru

** Санкт-Петербургский государственный горный институт,
199106, С.-Петербург, 21-я линия, 2;
e-mail: marin@minsoc.ru

*** Институт геологии и геохронологии докембрия РАН,
199034, С.-Петербург, наб. Макарова, 2;
e-mail: skublov@mail333.com

**** Государственный природный заповедник «Тунгусский»

Сравнительный анализ минералого-геохимических особенностей докатастрофных и катастрофных рыхлых отложений из эпицентра Тунгусской катастрофы 1908 г., сопоставление их с геохимией главнейших типов коренных пород, использование материалов космической фотосъемки и новых данных по углеродистым сферулам и радиоуглеродному датированию позволили высказать предположение о позднеплейстоценовом возрасте (более 100 тысяч лет) начала интенсивной криптовулканической деятельности в районе, о трех стадиях развития четвертичного грязевого вулканизма и многократных взрывах глубинных газов в голоцене (Тунгусский взрыв рассматривается как завершающее событие этой стадии). Предложена криптовулканическая модель Тунгусского феномена, которая может быть использована при прогнозировании россыпной алмазоносности Сибирской платформы.

Ключевые слова: Тунгусский феномен, космофотогеологическая карта, геохимические особенности пород, углеродистые сферулы, грязевой вулканизм, криптовулканическая модель.

G. T. SKLUBLOV, YU. M. MARIN, S. G. SKUBLOV, B. F. BIDYUKOV, L. N. LOGUNOVA,
V. V. GEMBITSKY, E. S. NECHAEVA. GEOLOGICAL
AND MINERALOGICAL-GEOCHEMICAL PECULIARITIES OF LOOSE SEDIMENTS
AND PRIMARY ROCKS IN EPICENTER OF TUNGUSSKAYA CATASTROPHE IN 1908.

Comparative analysis of mineralogical-geochemical peculiarities of the pre-catastrophe and syncatastrophe loose sediments in epicenter of Tungusskaya catastrophe in 1908, their comparison with geochemical parameters of the principal types of primary rocks, materials of the cosmic photographic surveying, the new data on carboniferous spherules and radiocarbon dating allow to make the assumption about the Late-Pleistocene age (more than 100 thousand years) of starting the intensive cryptovolcanic activity in the area, about three stages in development of the Quaternary mud volcanism and multiple explosions of deep-level gases in Holocene (the Tungusky explosion is considered as the final event of this stage). The proposed cryptovolcanic model of Tungusky phenomenon may be useful in forecasting the placer diamondiferous potential of Siberian platform.

Key words: Tungusky phenomenon, cosmophotographic-geological map, geochemical peculiarities of rocks, carboniferous spherules, mud volcanism, cryptovolcanic model.

Проблема «Тунгусского метеорита» более 100 лет привлекает пристальное внимание ученых. Ей посвящены десятки монографий и тематических сборников, труды многочисленных конференций и сотни статей. Наиболее полные обзоры проблемы даны в работах Н. В. Васильева (1984, 1986, 1988, 2004), А. И. Войцеховского и В. А. Ромейко (2008). Предложено более 100 гипотез Тунгусской катастрофы (Ольховатов, Родионов, 1999; Черняев, 1999; Дмитриев, 2001; Грошев, 2002; Васильев, 2004; Ромейко, 2006; Международная..., 2008; Ольховатов, 2008; Максимов, 2009; Turco, 1982, и др.). Доминирующими среди гипотез являются кометная и астероидная. Наметились и новые подходы к решению проблемы. Многие исследователи обращают внимание на приуроченность эпицентра Тунгусского взрыва к жерловине древнего (250 млн лет) Куликовского палеовулкана. В работах В. Н. Сапронова (1986, 2003) показано, что его раннемезозойская история развития включает в себя этапы траппового магматизма, более поздних инъекций щелочно-основных расплавов и завершающих стадий формирования малых тел субвулканических карбонатитов. В позднем плейстоцене и голоцене образовались болотно-озерные и пролювиально-аллювиальные отложения. Рыхлые отложения из эпицентра Тунгусской катастрофы до сих пор не являлись объектом специализированных геологических исследований, хотя могли бы помочь ответить на важный вопрос: *является ли Тунгусская ката-*

строфа 1908 г. единственным подобно рода событием в геологической истории района или она знаменует лишь заключительный этап в серии предшествующих катастрофных явлений? Очевидно, что в первом случае могут быть получены дополнительные аргументы в пользу кометной или астероидной гипотез, а во втором — в пользу эндогенной или земной природы Тунгусского взрыва. Можно предполагать, что при такой постановке вопроса удастся получить новые данные о вещественном составе рыхлых отложений как возможных индикаторов процессов, за которыми утвердился термин **Тунгусский феномен**.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

На первом этапе работ авторы ставили задачу сравнительного анализа катастрофных и докатастрофных образований различных генетических типов: элювиально-делювиальных, пролювиальных, аллювиальных и неясного генезиса, а также главнейших типов скальных пород. С учетом работ предшественников, было выбрано несколько опорных участков, на которых изучались как коренные, так и рыхлые породы, а последние по возможности характеризовались двумя пробами — из катастрофного слоя 1908 г. и из докатастрофных отложений (в случае элювиально-делювиальных образований пробы отбирались под стояками катастрофного «телеграфного» леса).

Полевые работы. Летом 2008 г. было изучено 16 участков:

- 1 — «Камень Джона», делювиальный докатастрофный суглинок; GPS-координаты (точность +/- 5 м) — 60 градусов 53.924 минуты северной широты и 101 градус 55.202 минуты восточной долготы;
- 2 — гора Стойкович, смотровая площадка на южном склоне горы, координаты 60-53.915 и 101-55.966; элювий долеритов жерла Куликовского палеовулкана;
- 3 — гора Фаррингтон, коренные выходы долеритов (60-54.990 и 101-56.966) и элювиальные суглинки в небольшом понижении рельефа (60-54.987 и 101-56.939);
- 4 — Северное болото; делювиальный шлейф риолитов и долеритов в докатастрофных (60-54.973 и 101-55.797) и катастрофных (60-54.925 и 101-55.785) суглинках;
- 5 — Суловская воронка; отвалы жирной вязкой докатастрофной глины с углеродисто-глинистыми сферами (60-54.203 и 101-54.389) и катастрофного суглинка с детритом (60-54.178 и 101-54.354);
- 6 — палеовулкан, в 30 и 100 м к северу от «Камня Джона»; суглинки катастрофные (60-53.491 и 101-55.201) и докатастрофные (60-53.979 и 101-55.206);
- 7 — палеовулкан, в 100 м к западу от «Камня Джона»; небольшая ложбинка, заросшая березой и хвощом, с буграми катастрофного мха (60-53.917 и 101-55.098);
- 8 — Лабаз на Займке Кулика (60-54.156 и 101-54.536); катастрофный суглинок с глубины 1—5 см и докатастрофный с глубины 25—35 см;
- 9 — ручей Чургим, выше водопада и скального отрезка русла; координаты — 60-52.329 и 101-52-769; катастрофный пролювиальный суглинок;
- 10 — Южное болото (60-52.863 и 101-52.441); торфяной бугор, катастрофный слой с глубины 30—40 см;
- 11 — истоки ручья Чургим (60-52.996 и 101-52.495); низкая пойменная площадка 5 × 12 м в месте пересечения тропы Кулика с поймой; единственное место, где на докатастрофной моховой подушке залегает 32-сантиметровый катастрофный пролювиальный горизонт, сложенный бурыми супесями и суглинками (0—25 см) и подстилающими их синевато-серыми супесями (25—32 см);
- 12 — эпицентр Тунгусского взрыва 1908 г.; докатастрофные (60-53.008 и 101-52.562) и катастрофные (60-53.012 и 101-52.563) суглинки;
- 13 — Южное болото (60-52.956 и 101-52.641); катастрофные и докатастрофные суглинки среди многочисленных стволов «телеграфного» леса;
- 14 — конус выноса докатастрофного пролювия (60-51.334 и 101-52.930); на плоской площадке отображены пробы докатастрофных и катастрофных супесей;
- 15 — Мамонтовое обнажение в низкой пойме левого берега реки Хушма (60-50.786 и 101-54.395); сверху вниз отобраны пробы: № 8077 — катастрофный суглинок с глубины 1—5 см; № 8078 — докатастрофные серые суглинки (интервал 45—55 см), залегающие в виде линзы в горизонте слоистых аллювиальных супесей; № 8079 — докатастрофные валунные супеси мощностью более 80 см (верхняя часть Мамонтового горизонта с остатками фауны с возрастом 7000 лет);
- 16 — кордон Пристань Тунгусского заповедника; 12-метровый обрыв (60-51.224 и 101-52.974) в левом борту р. Хушма, где обнажаются сверху вниз: серые косослоистые докатастрофные пески мощностью около 4 м (проба № 8081); буровато-серые, слабослоистые гравийные пески с гальками «экзотических» пород (кремней, кварцитов, туффизитов, риолитов, яшм, сердоликов) мощностью около 5 м (проба № 8080); темно-серые валунно-галечниковые супеси с многочисленными обломками долеритов и редкими — «экзотических» пород (мощность 3 м); коренные выходы долеритов в русле реки.

В первом же маршруте (уч. 2) было обращено внимание на свежесть и высокую магнитность долеритов Куликовского палеовулкана (немагнитная фракция составляет 1 % от веса песчаной фракции) и очень высокое содержание алевропелитовой или глинистой фракции (89 % от веса пробы). Это заставило усомниться в озерном и коровом (имеется в виду кора выветривания) происхождении глин (обработка проб велась в избе Кулика с использованием магнита МРМ-1, стандартного набора

сит 10—20—40—60—230 меш и бинокуляра). Иная картина наблюдалась у «Камня Джона» (уч. 1), где песчаная фракция докатастрофных суглинков содержала 90 % немагнитного материала, а алевропелитовая фракция составляла 67 % от веса пробы. При детальном изучении обломочного материала установлено, что восьмитонный валун «Камень Джона», сопровождающие его мелкие валуны, галька и гравий сложены «экзотическими» кварцитами, а песчаная фракция в основном состоит из кварца. Было обращено внимание на присутствие в песчаной фракции обломков туффзитов и широкое развитие мелких, менее 60 меш, глиняных обособлений сфероидной формы, нередко обогащенных черным углеродистым веществом. Эти данные свидетельствуют о некосмическом происхождении «Камня Джона».

Второй маршрут не принес неожиданностей — на горе Фаррингтон были опробованы долериты, а на небольшой (10 × 15 м) обводненной площадке отобрана проба элювиальных суглинков. Третий маршрут привел к неожиданным результатам. Оказалось, что проба жирных вязких докатастрофных глин Суловской воронки содержит около 7 % песчаной фракции размером менее 2 мм, при этом 97 % этих «песчинок» представлены 0.2—0.8 мм глиняными сферулами, покрытыми тонкой пленкой черного блестящего углеродистого материала. Во многих сферулах, названных нами углеродисто-глинистыми, центральные зоны сложены высокоуглеродистым веществом. Только половина сферул (их количество более 2 млн штук на 1 кг глины) оказались немагнитными. Возникло предположение о кавитационном (Новгородова и др., 2003) происхождении этих сферул. Иная картина наблюдалась в катастрофных глинах Суловской воронки, где количество песчаной фракции составляло не 7, а 15 % и обломки минералов преобладали над глиняными сфероидами, многие из которых имели темно-бурый и черный цвет за счет углеродистого материала.

Последующие маршруты показали, что необходимо разделять углеродисто-глинистые сферулы Суловской воронки и углеродистые сферулы черного цвета, которые ранее описывались (Мульдьяров, Сальникова, 1995) как остатки неизвестного гриба. Пробы, взятые у Лабаза (уч. 8), показали, что углеродистые сферулы присутствуют как в катастрофных, так и в докатастрофных суглинках (соответственно 120 и 22 штуки на 1 кг суглинка). Уникальной оказалась проба с горы Фаррингтон (уч. 3) — здесь обнаружено более 2000 шт./кг сферул, из них около 800 шт., легче воды, а остальные — тяжелее. В катастрофном пролювии р. Чургим углеродистых сферул очень мало (9 шт./кг). Катастрофные сферулы древнего конуса выноса резко преобладают над докатастрофными (соответственно 650 и 60 шт./кг). В среднем катастрофных сферул в 7 раз больше, чем докатастрофных. В элювиальных отложениях углеродистых сферул очень мало (4—18 шт./кг). Таким образом, обнаружено широкое развитие сферул и намечена тенденция смены глиняных сфероидов (палеовулкан) углеродисто-глинистыми докатастрофными (Суловская воронка) и катастрофными углеродистыми, ползующими повсеместным распространением.

Отобраны пробы коренных пород и рыхлых отложений. Вес рядовых проб составлял около 1 кг. Пробы весом 3—4 кг для детальных исследований отобраны у «Камня Джона», в катастрофном пролювии р. Чургим, в косослоистых песках кордона Пристань и др. Из 10 кг докатастрофных глин Суловской воронки выделено 700 г блестящих углеродисто-глинистых сферул для радиоуглеродного датирования и минералогических исследований.

Обработка проб. Рядовые пробы из рыхлых отложений разделялись на дубликат и рабочую пробу. Последняя помещалась в 1 л теплой воды и выдерживалась в ней 3—5 ч до полной дезинтеграции песчаной, алевролитовой и пелитовой фракций. Затем фракция с удельным весом менее 1.0 промывалась, высушивалась и изучалась под бинокуляром. Из нее выделялись углеродистые сферулы, иногда присутствующие здесь фитофульгуриты, сходные с описанными в работе А. Ю. Лысюка и соавторов (2006), разноцветные волосовидные образования, похожие на стримерглассы (Дмитриев, 2001) и др. Рабочая проба (500 г породы и 1 л воды) процеживалась через сито 230 меш (около 1.0 мм) с целью разделения песчаной и алевропелитовой («глинистой») фракций. Далее из песчаной фракции вымывались остатки глинистого материала, проба высушивалась и разделялась на грубозернистую (до 10 меш), крупно- (10—20 меш), средне- (20—40), мелко- (40—60) и тонкозернистую (менее 60 меш) песчаные фракции. Затем с помощью магнита МРМ-1 все фракции разделялись на магнитную (М), сильно- (ЭМ-1), средне- (ЭМ-2), слабо- (ЭМ-3) электромагнитные и немагнитную фракции. Из большинства проб отбирались 1—5 г навески песчаной, алевропелитовой и других фракций для последующих исследований; всего было подготовлено 102 пробы. Из наиболее характерных проб вручную выделялись зерна всех типов пород и минералов. На стеклянную пластинку с двухсторонним скотчем помещалось 150—300 зерен фракции 20—40 меш или 1000—2000 зерен размером 0.1—0.4 мм. Было подготовлено 30 пластинок для изготовления прозрачно-полированных шлифов (шайб) для последующего микронзондового анализа.

Аналитические работы. Для всех 102 проб в ЦЛ ВСЕГЕИ (www.vsegei.ru) рентгенофлюоресцентным методом были выполнены количественные определения содержаний петрогенных оксидов, с учетом потерь при прокаливании (далее параметр РРР). Количественный анализ проб на 50 редких элементов выполнен масс-спектрометрическим методом с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS). Проведено предварительное петрографическое исследование 30 шлифов/шайб и намечены участки для микронзондового анализа. На растровом электронном микроскопе JSM-6460 (JEOL, Япония) с полупроводниковым детектором INCA в Центре коллективного пользования СПГИ изучены 4 шайбы

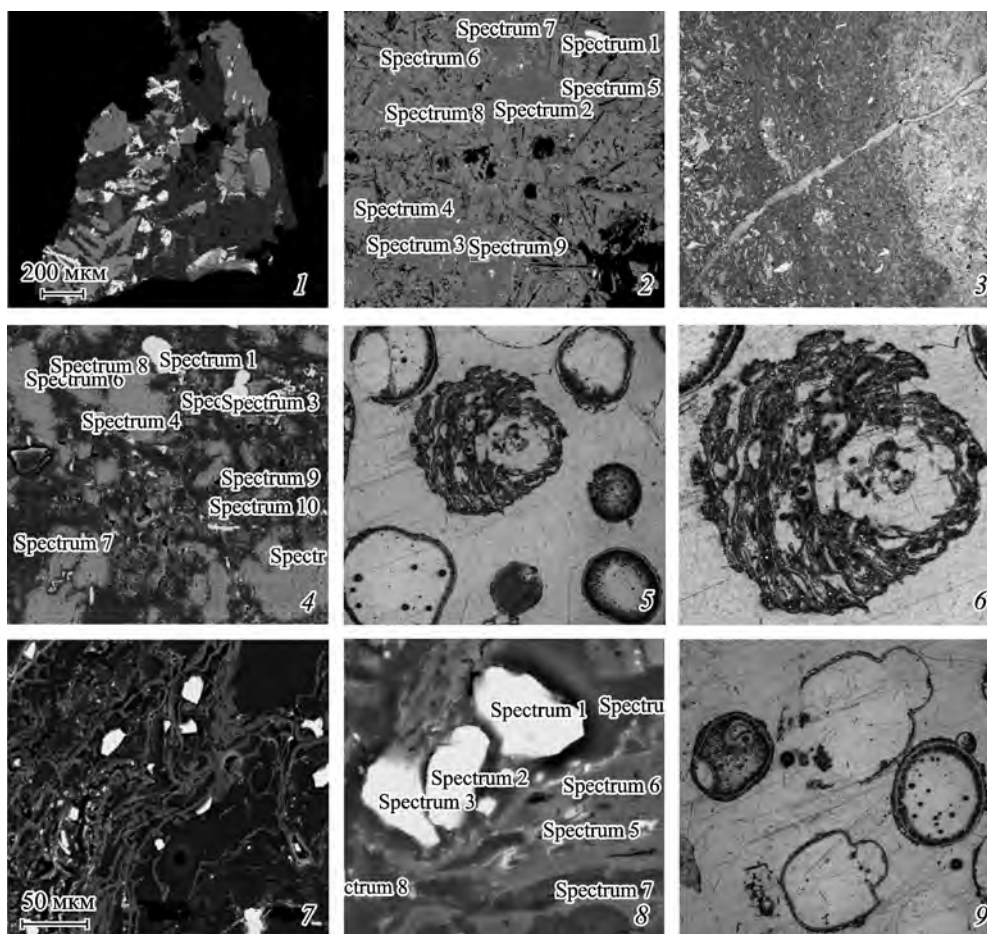


Рис. 1. Фотографии зерен, сферул и минералов коренных и рыхлых пород из эпицентра Тунгусской катастрофы 1908 г.

Фото 1, 2, 4, 7, 8, 10, 11, 12 — в обратноотраженных электронах (BSE); остальные — в проходящем свете, с увеличением: 10* (№ 5, 14, 19); 15* (№ 3, 24); 20* (№ 6, 9, 21, 23); 25* (№ 15); 30* (№ 13, 20); 60* (№ 22); 150* (№ 16, 17, 18). 1 — долерит; 2 — риолит; 3 — кремнистая порода с псевдопелловой текстурой; 4 — фрагмент кремнистой породы, обогащенной флюоритом (спектры 1, 2) и кальцитом (спектры 4, 5); 5 — некоторые разновидности углеродистых сферул; 6 — глинисто-углеродистая сферула с многочисленными обломками муассанита и других минералов; 7 — фрагмент сферулы 6, виден характер распределения муассанита (светлое) в глинисто-углеродистой псевдофлюидальной связующей массе; 8 — фрагмент сферулы 6; муассанитоподобная фаза состава $\text{SiC}_2\text{—SiC}_3$ (светлое); 9 — продольные сечения хитиновых оболочек двух насекомых; справа и слева — углеродистые сферулы; 10 — фрагмент фото 9; видны микронные обломки углеродисто-глинистого материала (спектр 1) и муассанитоподобной фазы SiC_2 (сп. 2—5), вдавленные в хитиновую оболочку, размер изображения 350×460 микрон; 11 — углеродистая сферула с многочисленными нитевидными радиально-расходящимися каналами дегазации; 12 — фрагмент сферулы 10 с участком сегрегации (светлое) железо-марганцевого материала (Mn 22.8—41.4%; O 27.7—36.9%; Fe 12.0—18.6%), содержащего Si (4—15%), Al (1.2—7.3%), Ca (2.8—6.4%), а также P (до 1.7%), Mg (до 1.4%), Ti (до 0.8%), K (до 0.5%); 13 — обломок углеродистой сферулы с радиальными зонами сегрегации глинисто-углеродистого материала; 14 — обломки зерен магнитной фракции пробы № 8077 (Мамонтовое обнажение, пойма, верхний горизонт); 15 — фрагмент фото 14; крупный обломок углеродисто-глинистого материала, содержащий 6 сферул самородного железа диаметром 0.1—0.2 мм и 6 (0.1—0.3 мм) углеродистых сферул; 16 — фрагмент фото 14, пластинка самородного железа, деформированная и разъеденная углеродистым флюидизитом; 17 — овальный обломок самородного железа, разъеденного глинисто-углеродистым и более поздним углеродистым флюидизитом; 18 — пластинка хромистого железа (Cr — до 15%); 19 — обломки зерен сильно-электромагнитной фракции пробы 8077, представленные шлаком, туфами и туффизитами; 20 — фрагмент фото 19, обломок гудронно-углеродистого туффизита; 21 — обломок железистого шлака; 22 — пластинки Fe-содержащего самородного алюминия, погруженные в алевропелитовую туффизитовую матрицу; 23 — обломки и сферула глинистого туффизита (немагнитная фракция пробы 8077); 24 — обломок кальцита, погруженный в гудронно-углеродистый флюидизит.

Fig. 1. Photographs of grains, spherules and minerals from primary rocks and loose sediments from epicenter of Tunguska catastrophe in 1908.

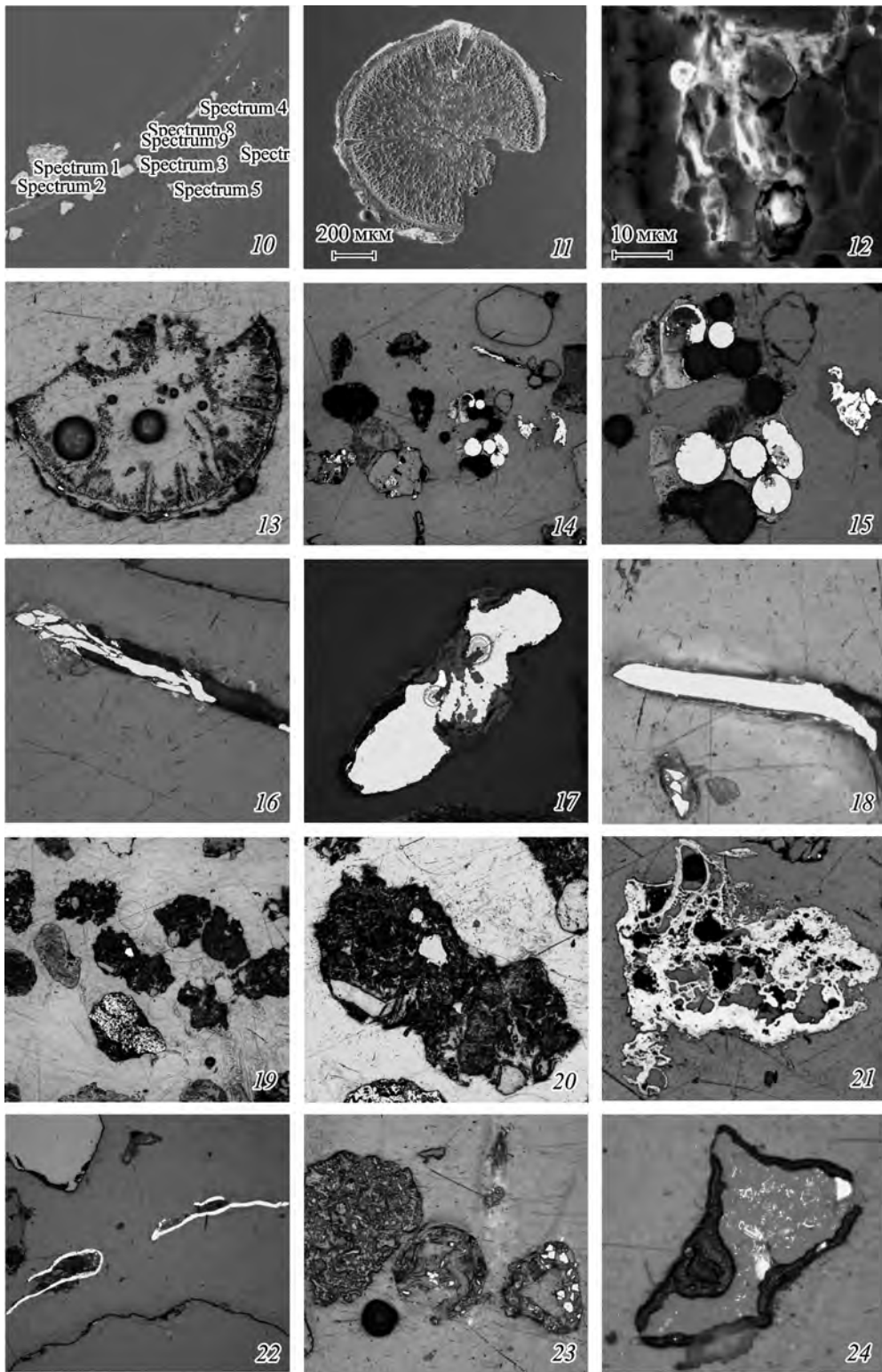


Рис. 1 (продолжение).

Геохимическая характеристика главных типов пород из эпицентра Тунгусской катастрофы 1908 г.
 Geochemical characteristic of the principal types of rocks in epicenter of Tunguska catastrophe in 1908

Вы- борка	N	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	PPP	Be	P	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	Se	Rb
1	4	48.20	15.75	14.20	5.68	10.80	2.44	0.33	0.35	0.9	1175	34.4	10144	632	162	1237	46.1	107.0	121.2	119	18.4	1.76	2.68	7.7
2	4	94.00	2.77	0.90	0.06	0.27	0.40	0.74	0.82	0.4	288	4.0	618	161	22	119	7.3	9.6	9.0	38	3.2	1.02	1.17	21.5
3	3	77.50	11.27	1.78	0.48	2.13	3.62	1.45	1.19	2.0	882	7.2	2811	125	49	249	6.6	18.9	49.5	53	10.8	1.15	2.29	22.4
4	1	67.90	0.35	4.69	0.16	14.70	0.14	0.06	11.80	0.8	1003	2.8	899	362	46	364	3.4	13.5	137.0	41	1.5	2.33	1.44	1.0
5	5	54.20	15.72	8.81	2.56	1.96	0.77	1.32	13.34	1.5	612	17.0	5129	341	97	460	16.4	45.7	48.0	106	16.4	1.43	1.76	56.5
6	6	64.57	12.83	6.33	1.86	1.99	1.44	1.57	8.18	1.1	470	12.8	5039	312	74	818	22.9	34.2	31.4	84	13.3	1.25	1.67	49.3
7	7	50.84	14.97	9.13	2.17	1.84	0.56	1.11	17.83	1.1	743	14.6	5295	324	97	895	20.6	49.6	45.2	104	17.0	1.39	1.38	53.6
8	8	57.76	12.91	8.29	1.85	2.16	1.05	1.31	12.78	1.2	681	11.6	4453	343	75	1889	33.7	38.6	30.7	84	14.1	1.14	1.22	49.1
9	2									1.1	392	5.7	1827	83	36	70	4.2	16.7	15.1	36	12.3	1.05	1.29	55.0
10	5	56.16	16.16	7.67	1.62	1.09	0.74	1.63	13.64	1.1	486	17.1	5433	333	106	225	14.8	42.4	44.5	77	19.2	1.50	1.21	68.5
11	2	56.35	15.80	8.08	1.63	1.58	0.81	1.56	12.50	1.6	436	18.5	5599	363	111	565	40.5	42.7	51.7	72	20.1	1.47	1.74	68.9
12	4	55.23	15.38	9.48	1.97	1.41	0.66	1.45	13.05	1.2	621	18.3	5342	356	113	274	24.4	56.5	59.1	90	18.9	1.38	1.17	68.5
13	2	48.80	15.25	9.06	2.50	2.15	0.45	1.16	19.35	1.3	545	20.2	5420	365	117	347	23.7	53.5	55.8	81	18.5	1.55	1.03	57.1
14	2	61.40	12.85	5.32	1.88	2.42	1.55	1.72	11.85	0.9	422	12.0	3893	267	76	275	14.7	35.4	25.2	54	13.6	0.99	1.18	52.4
15	2	79.45	10.30	1.01	0.49	1.39	2.88	2.05	2.22	1.0	432	4.5	1467	90	22	75	4.0	9.1	7.8	36	10.2	0.92	1.10	58.3
16	2	64.25	13.20	5.73	2.20	2.23	1.90	1.96	7.64	1.0	414	13.8	4037	271	91	379	18.3	40.2	23.0	64	15.3	1.18	0.86	62.3
17	2	45.25	12.90	9.19	3.88	4.13	1.24	1.17	20.85	1.2	1177	20.0	4849	365	112	1027	23.3	54.6	94.6	125	12.3	1.47	2.37	30.6
18	2	60.65	12.80	6.04	2.91	3.63	2.00	1.67	9.34	1.1	872	12.3	3754	260	73	774	16.4	37.9	43.5	53	10.5	0.41	2.13	36.9
19	3									0.9	1287	23.2	51557	1356	136	2415	46.5	63.3	70.6	259	18.2	1.62	2.28	17.7
20	3	51.00	13.35	11.60	4.20	4.96	2.02	1.60	7.54	1.1	1104	22.7	23557	472	131	1956	31.1	60.3	61.4	156	12.8	0.69	1.99	28.6
21	3	55.33	13.17	10.36	3.79	4.28	1.83	1.72	6.89	1.1	893	20.2	9671	356	117	1617	25.8	58.3	50.1	174	12.1	0.86	2.39	33.3
22	3	61.17	12.93	6.45	3.04	4.06	2.08	1.91	7.20	1.3	882	14.2	4229	260	82	742	19.1	42.0	39.1	92	11.7	0.67	2.27	39.8
23	3	77.80	10.23	1.18	0.34	2.38	2.78	2.31	2.66	1.1	623	4.1	1492	88	42	167	3.5	20.0	11.7	61	7.5	0.21	2.09	41.5
24	1	57.70	16.50	7.57	1.64	1.29	1.04	1.68	10.90	4.1	741	68.3	15993	670	363	1006	59.2	134.0	175.0	294	68.0	5.01	3.54	267.0
25	1	49.90	16.60	10.50	3.19	1.64	0.33	1.14	15.30	4.6	698	80.0	13418	698	392	1161	65.5	178.0	221.0	311	67.5	4.92	4.34	236.0
26	1	50.10	15.70	10.00	2.22	1.38	0.37	1.15	17.70	2.8	916	57.3	12160	638	338	1471	63.3	157.0	202.0	311	66.0	4.95	3.50	281.0
27	1	62.20	12.90	6.00	2.83	3.04	2.28	1.71	8.19	3.9	1264	48.0	9165	439	268	2322	59.4	122.0	146.0	315	37.6	3.95	6.09	141.0
28	1	63.10	12.60	5.86	2.04	2.64	1.98	1.71	9.19	3.0	1221	48.8	9704	440	245	2709	55.6	119.0	169.0	593	39.4	4.67	5.82	150.0
29	1	72.80	7.87	5.76	0.84	4.09	0.11	0.35	7.01	0.7	1046	5.6	431	59	13	40	1.8	12.8	12.7	21	1.3	0.18	1.05	4.2
30	1	69.00	10.00	3.99	0.74	5.69	0.19	0.34	6.85	1.5	2485	22.6	1078	187	70	379	11.9	87.5	196.0	111	4.1	0.66	4.96	6.7
СРД	30	60.62	13.02	7.27	2.14	2.85	1.34	1.37	10.02	1.2	681	14.1	4744	302	85	576	18.7	40.7	42.1	90	13.6	1.18	1.70	40.6

Таблица 1 (продолжение)

Ввр- бортка	N	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er
1	4	162	28.8	123	5.47	0.45	0.77	0.17	0.08	1.35	0.05	1.90	0.18	104	7.3	17.5	2.50	12.1	3.82	1.24	4.45	0.81	5.01	1.13	3.08
2	4	35	6.3	43	2.09	0.38	0.25	0.17	0.03	0.88	0.35	0.05	0.61	241	12.3	27.4	2.78	10.6	2.07	0.47	1.61	0.24	1.22	0.24	0.64
3	3	258	15.0	155	7.44	0.30	0.88	0.10	0.03	0.83	0.32	0.32	0.25	333	19.0	39.6	4.15	15.3	3.05	0.80	2.85	0.45	2.53	0.56	1.59
4	4	174	1.8	10	0.84	19.20	0.32	0.26	0.03	0.73	1.65	1.70	0.05	20	2.7	3.3	0.33	1.2	0.26	0.34	0.29	0.05	0.28	0.06	0.16
5	5	238	16.5	109	10.35	0.51	0.60	0.21	0.04	1.89	0.36	0.22	3.46	383	21.6	44.6	4.76	19.2	4.01	0.93	3.55	0.55	3.28	0.66	1.80
6	6	306	13.2	97	8.34	0.40	0.57	0.18	0.03	1.38	0.28	0.26	1.85	487	17.9	39.6	3.99	15.7	3.19	0.92	2.92	0.46	2.61	0.54	1.52
7	7	232	11.2	91	9.95	0.63	0.68	0.25	0.06	2.17	0.38	0.15	3.23	398	17.0	37.0	3.64	13.7	2.71	0.68	2.38	0.37	2.04	0.44	1.24
8	8	245	10.6	84	7.69	0.66	0.48	0.22	0.04	1.44	0.30	0.16	2.09	479	15.5	39.3	3.38	12.8	2.53	0.76	2.34	0.37	2.02	0.43	1.16
9	2	442	7.7	75	4.15	0.45	0.37	0.13	0.03	0.95	0.28	0.18	1.39	729	11.8	22.3	2.45	9.4	1.98	0.87	1.55	0.26	1.32	0.28	0.82
10	5	227	15.9	108	11.89	0.49	0.55	0.27	0.07	2.28	0.58	0.10	4.67	388	22.8	44.3	4.96	19.0	3.87	0.88	3.62	0.53	2.98	0.65	1.69
11	2	273	21.0	121	12.40	0.80	0.70	0.23	0.08	2.62	0.55	0.13	4.87	423	26.5	57.6	6.35	24.5	5.12	1.14	4.54	0.68	3.76	0.84	2.27
12	4	285	22.6	120	10.92	0.37	0.61	0.29	0.08	2.37	0.48	0.17	4.08	414	26.4	52.2	5.85	23.1	4.57	1.10	4.47	0.69	3.97	0.83	2.19
13	2	249	19.2	110	9.90	0.30	0.57	0.37	0.08	1.90	0.33	0.10	3.64	326	21.8	49.4	5.06	19.6	4.15	0.97	4.01	0.59	3.53	0.73	2.12
14	2	531	12.5	79	6.81	0.30	0.48	0.22	0.03	1.18	0.25	0.11	1.66	563	16.9	37.1	3.77	14.4	3.02	0.91	2.59	0.43	2.39	0.47	1.27
15	2	425	7.0	52	3.72	0.30	0.26	0.21	0.03	0.72	0.19	0.08	0.97	683	14.5	27.8	2.99	11.0	2.28	0.75	1.65	0.27	1.36	0.29	0.67
16	2	479	14.2	82	9.03	0.30	0.49	0.43	0.03	1.42	0.24	0.37	1.65	569	20.3	41.3	4.42	16.2	3.43	0.87	2.88	0.47	2.57	0.56	1.50
17	2	332	28.5	112	8.03	0.85	0.88	0.21	0.04	1.53	0.34	0.35	1.56	261	21.3	36.8	4.93	20.3	4.91	1.18	5.02	0.81	4.83	1.11	3.06
18	2	473	15.3	94	6.93	0.49	0.70	0.13	0.03	1.17	0.22	0.48	1.29	430	14.7	30.1	3.34	13.7	3.02	0.88	2.94	0.47	2.84	0.61	1.73
19	3	218	27.2	180	43.76	2.00	1.03	0.30	0.13	4.50	0.35	0.65	0.66	210	27.6	55.0	6.34	25.3	5.66	1.33	5.93	1.01	5.67	1.22	3.21
20	3	398	21.7	141	36.20	1.19	1.09	0.18	0.08	2.49	0.25	0.46	0.88	297	18.8	41.3	4.59	19.2	4.34	1.09	4.52	0.72	4.28	0.94	2.58
21	3	421	26.4	117	17.55	1.04	0.80	0.17	0.05	1.46	0.36	0.38	1.02	339	19.9	41.9	4.51	17.9	3.92	0.98	4.00	0.71	4.56	1.07	3.20
22	3	489	17.1	98	8.46	0.42	0.54	0.13	0.03	1.24	0.23	0.45	1.20	416	24.7	51.1	5.55	21.3	4.24	1.02	3.90	0.58	3.25	0.71	1.95
23	3	384	7.4	90	3.97	0.84	0.47	0.08	0.03	0.65	0.20	0.05	0.87	529	9.6	18.4	2.04	7.8	1.55	0.61	1.50	0.23	1.32	0.30	0.83
24	1	837	55.0	331	34.40	1.82	0.76	0.68	0.09	6.77	1.79	0.05	17.00	1390	72.6	155.0	18.10	75.3	14.10	3.30	15.00	2.03	11.70	2.40	6.72
25	1	720	54.2	345	29.20	1.51	0.80	0.87	0.08	6.34	1.09	0.13	13.90	1000	66.6	152.0	16.80	72.1	13.70	3.26	15.20	2.20	12.40	2.27	6.90
26	1	470	30.4	227	27.20	2.93	1.85	0.61	0.06	10.10	1.38	0.45	14.90	1090	48.6	99.4	11.00	41.4	7.97	1.75	8.20	0.93	6.71	1.29	3.51
27	1	1650	48.8	228	20.80	1.58	1.06	0.36	0.03	3.69	0.74	0.12	4.64	1450	47.8	101.0	11.30	47.4	9.87	2.70	11.80	1.62	9.94	1.99	5.85
28	1	1810	38.3	224	19.20	1.70	0.39	0.39	0.03	3.18	0.66	0.19	4.10	1570	40.0	88.1	9.65	40.8	8.11	2.52	9.42	1.31	8.09	1.60	4.74
29	1	63	11.6	10	0.67	0.73	0.15	0.03	0.03	0.31	0.11	0.20	0.15	70	10.3	15.9	2.48	10.2	2.33	0.49	2.32	0.37	2.08	0.43	1.09
30	1	98	66.8	26	1.24	2.78	0.17	0.03	0.03	1.52	0.72	0.21	0.46	98	35.8	76.0	10.60	47.5	10.90	2.58	14.20	1.96	11.90	2.37	6.99
СПД	30	274	15.4	97	8.61	0.62	0.58	0.20	0.04	1.62	0.32	0.21	1.57	374	18.3	38.7	4.15	16.4	3.44	0.93	3.24	0.51	2.89	0.62	1.69

Таблица 1 (продолжение)

Вз- борка	N	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Tl	Pb	Bi	Th	U	Al ₂ O ₃ / K ₂ O	K ₂ O/ Na ₂ O	Zn/Pb	100Rb/ Sr	Sr/Ba	Zr/Hf	Nb/Ta	Ce/Er	REE	Eu/Eu*	PT-F1	PT-F2
1	4	0.41	2.78	0.47	3.03	0.40	0.18	0.05	2.7	0.05	1.33	0.44	48.56	0.14	43.91	4.79	1.57	40.55	13.62	5.69	62.67	0.91	1.73	-4.74
2	4	0.10	0.67	0.11	1.16	0.16	0.62	0.21	8.5	0.05	2.50	0.84	3.78	2.90	4.62	67.84	0.17	37.27	14.00	43.61	61.22	0.82	-2.00	2.09
3	3	0.22	1.63	0.28	3.62	0.55	1.94	0.07	4.8	0.05	6.54	1.60	8.02	0.41	11.14	10.84	0.82	42.95	13.69	25.16	97.17	0.86	-1.65	0.27
4	1	0.03	0.14	0.03	0.23	0.05	1.54	0.05	9.1	0.12	0.21	2.13	5.65	0.44	4.48	0.57	8.57	42.00	16.80	20.63	9.10	3.77	-0.25	-4.06
5	5	0.25	1.72	0.29	2.91	0.98	0.83	0.37	10.0	0.12	7.11	1.66	12.33	2.24	13.10	30.63	0.73	37.71	11.04	26.13	108.47	0.76	0.82	0.88
6	6	0.21	1.44	0.23	2.48	0.71	0.61	0.32	11.3	0.06	5.46	1.38	8.38	1.15	10.25	19.93	0.69	39.18	12.86	27.08	93.27	0.92	-0.27	0.58
7	7	0.17	1.18	0.20	2.38	0.79	0.85	0.35	10.9	0.16	5.93	1.50	13.94	2.31	10.25	30.02	0.63	38.27	12.92	30.95	87.45	0.83	1.03	1.25
8	8	0.16	1.15	0.19	2.11	0.56	0.63	0.34	13.4	0.08	5.09	1.22	11.62	1.34	7.27	24.05	0.58	39.76	13.84	35.39	85.00	0.96	0.30	0.75
9	2	0.11	0.78	0.13	1.85	0.35	0.35	0.30	9.7	0.05	3.03	0.91	9.92	2.38	3.82	12.50	0.61	40.47	11.89	27.37	54.35	1.52	0.49	1.53
10	5	0.24	1.65	0.27	2.84	0.84	1.07	0.44	14.6	0.17	7.66	1.72	10.15	2.10	5.33	30.23	0.59	38.20	14.22	26.21	108.00	0.72	0.48	1.25
11	2	0.33	2.30	0.36	3.34	0.96	1.42	0.46	18.6	0.15	8.92	2.04	10.15	2.10	3.99	25.27	0.65	36.23	12.85	25.43	136.56	0.72	0.66	1.22
12	4	0.33	2.14	0.36	3.05	0.71	0.89	0.41	13.8	0.18	8.10	1.85	10.61	2.24	6.73	24.16	0.69	39.43	15.50	23.86	128.25	0.74	0.66	1.22
13	2	0.29	1.97	0.29	2.93	0.71	0.72	0.37	11.8	0.15	7.04	1.69	13.23	2.60	6.95	23.09	0.77	37.57	13.85	23.34	114.69	0.73	1.19	1.09
14	2	0.19	1.35	0.21	1.99	0.42	0.41	0.31	11.0	0.05	4.44	1.09	7.54	1.12	4.89	9.95	0.95	39.90	16.03	29.21	85.09	0.99	-0.23	0.44
15	2	0.12	0.63	0.12	1.20	0.22	0.28	0.34	8.1	0.05	2.72	0.72	5.04	0.71	4.50	13.71	0.62	43.87	16.57	41.78	64.57	1.18	-1.94	0.59
16	2	0.23	1.56	0.26	2.10	0.50	0.51	0.35	10.9	0.10	4.87	1.12	6.74	1.03	5.93	13.04	0.84	38.98	18.05	27.67	96.66	0.85	-0.49	0.10
17	2	0.41	2.77	0.48	2.89	1.26	0.71	0.20	6.9	0.05	6.18	1.26	11.01	0.95	18.11	9.22	1.28	38.90	6.37	12.18	110.02	0.73	1.13	-0.62
18	2	0.24	1.62	0.27	2.29	1.00	0.48	0.26	5.7	0.05	4.32	0.98	8.02	0.83	9.48	7.81	1.10	41.11	6.96	17.41	76.50	0.90	-0.15	-0.66
19	3	0.44	2.81	0.46	4.26	3.01	0.71	0.13	17.2	0.05	5.90	1.71	8.41	0.79	15.10	8.14	1.05	42.35	14.63	17.29	142.23	0.70	0.56	-1.96
20	3	0.35	2.37	0.39	3.38	2.57	0.75	0.16	7.7	0.05	5.14	1.19	7.81	0.94	20.63	7.21	1.34	41.63	14.16	16.10	105.80	0.75	0.29	-1.48
21	3	0.46	3.24	0.56	2.79	1.73	0.64	0.21	7.0	0.08	5.49	1.13	7.81	0.94	31.39	7.95	1.24	41.98	10.47	13.34	109.42	0.76	-0.27	-1.08
22	3	0.26	1.76	0.29	2.38	1.13	0.52	0.24	6.7	0.05	6.03	1.14	6.86	0.92	14.05	8.14	1.18	41.39	7.51	26.41	123.39	0.76	-0.27	-1.08
23	3	0.12	0.85	0.14	2.20	0.52	0.37	0.25	5.4	0.05	2.88	0.83	4.43	0.83	11.79	10.84	0.73	41.23	7.62	22.14	45.50	1.22	-1.97	0.11
24	1	1.00	6.76	1.05	16.20	2.96	0.90	1.53	82.8	0.75	32.20	9.22	9.82	1.62	3.55	31.90	0.60	20.43	11.62	23.07	385.06	0.69	0.35	1.28
25	1	0.95	6.04	1.00	18.20	2.31	0.91	1.05	49.0	0.58	31.40	4.85	14.56	3.45	6.35	32.78	0.72	18.96	12.64	22.03	371.42	0.69	1.36	1.06
26	1	0.58	3.48	0.52	11.00	2.18	0.92	1.25	61.5	0.75	22.10	4.57	13.65	3.11	5.06	59.79	0.43	20.64	12.48	28.32	235.34	0.66	1.17	1.48
27	1	0.86	5.66	0.83	10.50	3.57	0.45	0.76	26.6	0.19	15.70	2.65	7.54	0.75	11.84	8.56	1.14	21.71	5.83	17.26	258.62	0.76	-0.31	-0.50
28	1	0.69	4.66	0.70	10.50	2.34	0.48	0.77	33.4	0.20	16.10	3.07	7.37	0.86	17.75	8.29	1.15	21.33	8.21	18.59	220.39	0.88	-0.39	0.04
29	1	0.13	0.88	0.13	0.29	0.05	0.08	0.05	2.0	0.05	1.72	0.49	22.49	3.18	10.87	6.60	0.91	34.45	13.40	14.59	49.13	0.64	-0.17	0.63
30	1	1.03	6.70	1.04	1.46	0.13	0.08	0.05	7.7	0.23	7.70	4.41	29.41	1.79	14.43	6.90	0.99	18.08	9.54	10.87	229.57	0.63	0.06	0.15
СРД	30	0.24	1.63	0.27	2.58	0.71	0.62	0.26	10.1	0.09	5.20	1.34	11.85	1.55	11.84	20.68	0.90	38.30	12.67	25.20	106.45	0.89	0.10	0.24

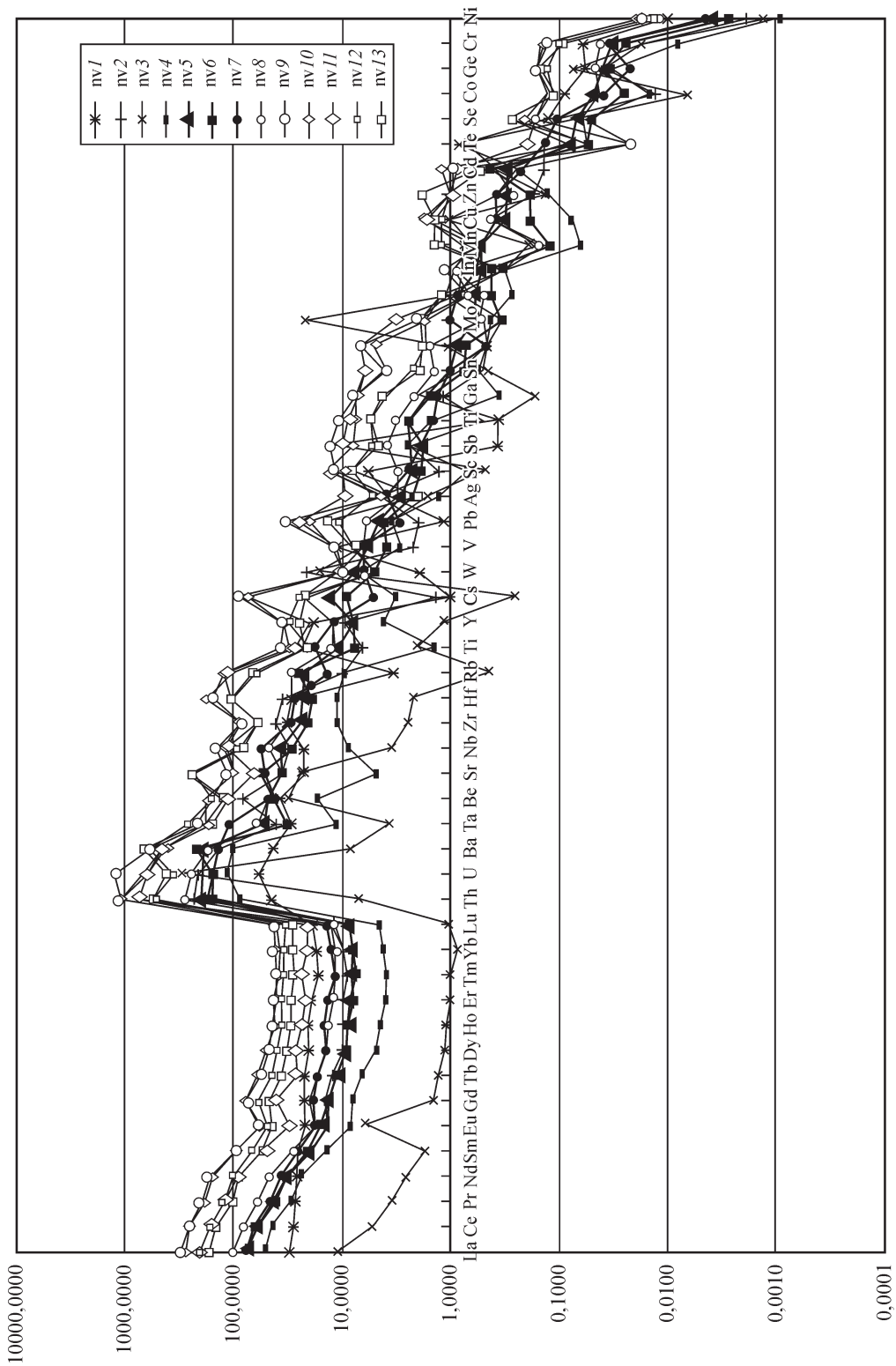
Примечание. Приведены средние арифметические (петрогенные оксиды и PPP — потери при прокаливании), мас. %; средние геометрические (элементы-примеси REE); г/т; средние арифметические для отношений и параметра Eu/Eu^* . N — число проб, по которым рассчитаны статистические параметры для 30 совокупностей: сов. 1 — траппы гор Стойкович, Форрингтон, Лабаз; сов. 2 — кварциты у «Камня Джона»; 3 — липариты; делювиальные обломки у Сев. болота; 4 — кремни; обломки валунника из нижней части обнажения у кордона Пристань; 5—8 — делювиальные докатастрофные алевропелитовая (сов. 5) и псаммитовая (6) фракции, а также катастрофные алевропелитовая (7) и псаммитовая (8) фракции, отобранные в виде парных проб на уч. Сев. болото, Палеовулкан, Лабаз, Эпицентр, Южное болото, Конус выноса; 9—12 — отложения Суловской воронки, представленные докатастрофной песчаной фракцией (сов. 9), докатастрофными глинами (10), углеродисто-глинистыми сферулами (11) и катастрофными глинами (12); 13—16 — катастрофный пролювий истоков руч. Чугим, представленный алевропелитовой (13) и псаммитовой (14) фракциями супесей, а также немагнитной (15) и электромагнитной (16) песчаными фракциями серого шлиха; 17—18 — алевропелитовая (17) и псаммитовая (18) фракции пойменного суглинка (т. н. 8077) Мамонтового обнажения; 19—23 — мелкозернистая (менее 0.4 мм) песчаная фракция аллювиальных и пролювиальных отложений дальнего привноса, с разделением на магнитную (19), сильно- (20), средне- (21) и слабо- (22) электромагнитные и немагнитную (23) фракции; участки 15, 16; 24—28 — аномальные пробы, представленные докатастрофными сферулами Суловской воронки (24); алевропелитовой фракцией докатастрофного делювия, уч. 12, Эпицентр (25); алевропелитовой фракцией катастрофного делювия, участок 8, Лабаз (26); песчаной фракцией гравийных песков конуса выноса у кордона Пристань (27), песчаной фракцией катастрофного аллювия Мамонтового обнажения (28); 29—30 — зольная фракция катастрофного торфа уч. 7, Палеовулкан (29) и уч. 10, Южное болото (30).

и выполнено более 300 анализов минералов. Наиболее интересные зерна фотографировались на оптическом микроскопе с высокой разрешающей способностью (рис. 1). Уникальной оказалась проба № 8077, где вместе встречены железистые и углеродистые сферулы (рис. 1, 15), пластинки самородного железа (рис. 1, 16—17), хромистого железа (рис. 1, 18), самородного алюминия (рис. 1, 22), обломки железистого шлака (рис. 1, 21), гудронного (рис. 1, 19—20) и глинистого (рис. 1, 19—20) туффизита (рис. 1, 23) и др. Для определения абсолютного возраста докатастрофных глин Суловской воронки отобрано 100 г углеродисто-глинистых сферул, которые (проба 8051) были переданы проф. Х. Истое (Christopher J. Eastoe) в Радиоуглеродную лабораторию Аризонского университета (США). Полученные результаты (обр. 15084; возраст $15885 \pm 235/-230$ лет; $\delta^{14}C$ составляет -28.4 ‰) свидетельствуют о позднеплейстоценовом возрасте сферул из жирных вязких глин Суловской воронки. Это более чем в два раза превышает возраст (7000 лет) костных остатков мамонта, обнаруженных в пойме р. Хушма в 1.5 км к востоку от кордона Пристань.

Статистическая обработка данных. Результаты анализов были сведены в матрицу размером 102×84 , в которой для каждой из 102 проб были приведены общие сведения ($m_1 = 4$ признака), геологические данные ($m_2 = 6$), результаты силикатного анализа ($m_3 = 8$), количественные определения элементов-примесей ($m_4 = 50$), индикаторные геохимические параметры и отношения ($m_5 = 14$). Эти материалы обрабатывались с использованием программного комплекса «Статистика» (Боровиков, 2003) и методов факторного анализа (Белонин и др., 1982). На первом этапе производились визуализация данных, выявление резко выделяющихся и аномальных проб, проверка выборок на однородность и проверка гипотез о функциях распределения. Для петрогенных оксидов предпочтительным является нормальный закон распределения, а для малых элементов — логнормальный; в последующем все статистические расчеты выполнены с учетом этих результатов. Все пробы были объединены в 30 выборок (табл. 1), включающих в себя коренные породы (траппы, кварциты, риолиты, кремнистые породы), рыхлые отложения (делювиальные с последующим разделением на докатастрофные и катастрофные, на песчаную и алевропелитовую и на фракции по магнитности и др.), глины и сферулы Суловской воронки, а также 5 аномальных и 2 пробы зольной фракции катастрофного мха.

На основе этих данных была построена спайдер-диаграмма (рис. 2), характеризующая уровни накопления малых элементов по отношению к углистым хондритам. На ней все элементы, за исключением редкоземельных, упорядочены по отношению к среднему содержанию в рыхлых отложениях (объединенная выборка из 53 проб делювиальных, пролювиальных и аллювиальных отложений). Спайдер-диаграмма позволяет обратить внимание на резкое несоответствие геохимического облика траппов и рыхлых отложений (особенно по спектру REE), на ярко выраженную индивидуальность «экзотических» пород (кварциты, риолиты, кремни), на близость микроэлементного состава глин и сферул Суловской воронки к остальными типами рыхлых образований, на постоянное обогащение в 2—5 раз аномальных проб всеми микроэлементами по сравнению с рыхлыми породами и т. д.

Результаты факторного анализа подтверждают эти выводы. Наиболее информативными оказались средние содержания оксидов и элементов в микровыборках, при условии последовательного перехода от петрогенных оксидов к микроэлементам. Методом главных компонент по 14 выборкам (выборки 5—8, 13—18, 20—23; см. табл. 1) и 8 петрохимическим параметрам (рис. 3, А) установлена ведущая роль I фактора кремнекислотности (антагонизм SiO_2 , Na_2O , K_2O по отношению к MgO , FeO) и II фактора, обусловленного антагонизмом CaO , MgO по отношению к Al_2O_3 и PPP. Второй фактор несет важную генетическую информацию и разделяет рыхлые отложения на дальнеприносные (аллювий и докатастрофный пролювий конуса выноса) и ближнеприносные (делювий, катастрофный пролювий, отложения Суловской воронки). Ближнеприносные отложения резко обогащены глинистым и углеродистым материалами (Al_2O_3 и PPP), а дальнеприносные — CaO , MgO (главные составляющие плагиоклазов и клинопироксенов долеритов). По параметрам этой факторной модели рас-



считаны значения I и II факторов для всех типов пород (рис. 3, Б); отчетливо видно, что траппы по петрохимическим данным резко отличаются от других пород района, что рыхлые отложения образуют единый эволюционный ряд (глины Сусловной воронки—делювий—пролювий—аллювий) и что «экзотические» породы также образуют ряд кварциты—риолиты—кремни.

Для установления связей между петрогенными и малыми элементами рассчитывались коэффициенты корреляции между значениями петрохимических факторов и логарифмами содержаний микроэлементов. Установлено (рис. 3, А, Б), что практически все элементы-примеси накапливаются либо в глинистой фракции рыхлых отложений, либо в темноцветных минералах и магнитной/электромагнитной фракции. Максимальная дифференциация элементов идет по оси II фактора. Реперным элементом здесь является железо: для ассоциации Fe—Mg типоморфными являются тяжелые REE, Sc, Zr, Hf, Y, Te, P, Se, сидерофильные Co, Cr, Ni, Mn, Ti и рудные Cu, Zn, Nb, Mo, Ag; для ассоциации Fe-Al типоморфны легкие REE, V, Sn, In, W, Th, Be, Sb. Особняком стоит ассоциация Ge, Ga, Ba, Cs, Rb, Tl, Cd, Bi, Pb, нередко обнаруживающих отрицательные коэффициенты корреляции с элементами групп Mg—Fe—Al и положительно коррелирующих с K_2O . Использование методов корреляционного анализа для сводной выборки рыхлых отложений позволило установить очень сильные связи между редкоземельными элементами и подчеркнуть важную роль Er и Ce как индикаторов разделения остальных элементов-примесей на 2 группы, связанные с тяжелыми и легкими REE. Полезным оказалось построение схем ветвящихся связей (Белонин и др., 1982); например, для редких элементов характерна рыхлая структура связей, ведущая роль Ti и V как центров построения корреляционных плед и слабые связи большинства рудных элементов, в то время как редкоземельные элементы в большинстве случаев имеют $r = 0.90—0.99$.

При сравнении различных выборок всегда использовался t-критерий Стьюдента. Статистически значимыми различия считались при 5 % и более высоких уровнях значимости. При сравнении полярных выборок эти различия весьма существенны (табл. 2). Так, траппы ($N_1 = 4$) отличаются от рыхлых отложений ($N_2 = 53$) повышенными (+) и пониженными (–) содержаниями элементов, что устанавливается при 5 % (+Al, Na, P, V, Co, Ga, In, Tb, Dy, Er, Tm, Yb, Lu; –Si, Eu, Ta); 1 % (+Cr, Se, Y, Ho; –Sr, Pr); 0.1 % (+Sc, Ni, Cu; –PPP); 0.01 % (+Fe, Te); 0.001 % (K, Ce, W); 0.0001 % (+Mg, Ca; –Rb, Sb, Cs, Ba, La, Tl, Pb, Th, U) уровнях значимости. В траппах заметно пониженное содержание SiO_2 (48.2 против 58.8 % в рыхлых отложениях) и резко повышенное — CaO (10.8 против 2.6 %); при этом $t_1 = 2.16$ и $t_2 = 14.12$.

На заключительных стадиях статистической обработки в ряде случаев строились бинарные диаграммы. Например, все различные по магнитности фракции песков из Мамонтова обнажения характеризуются увеличением содержаний Rb и уменьшением — V, при переходе от докатастрофных образований к катастрофным.

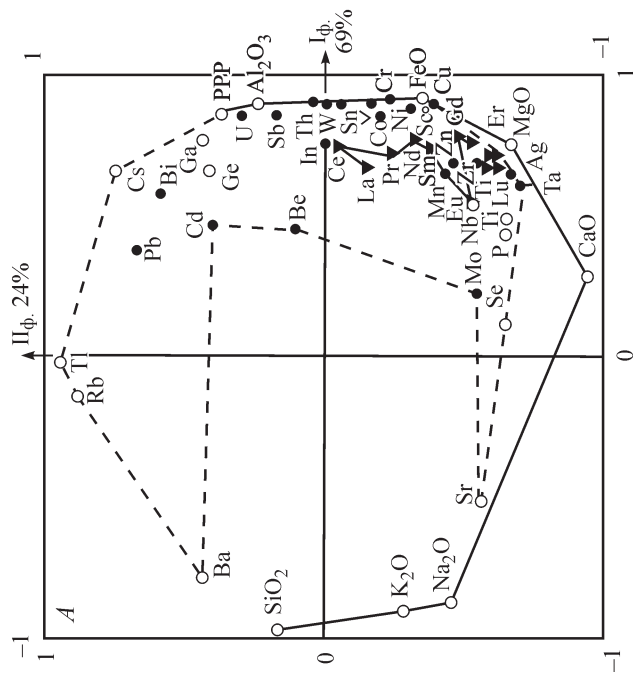
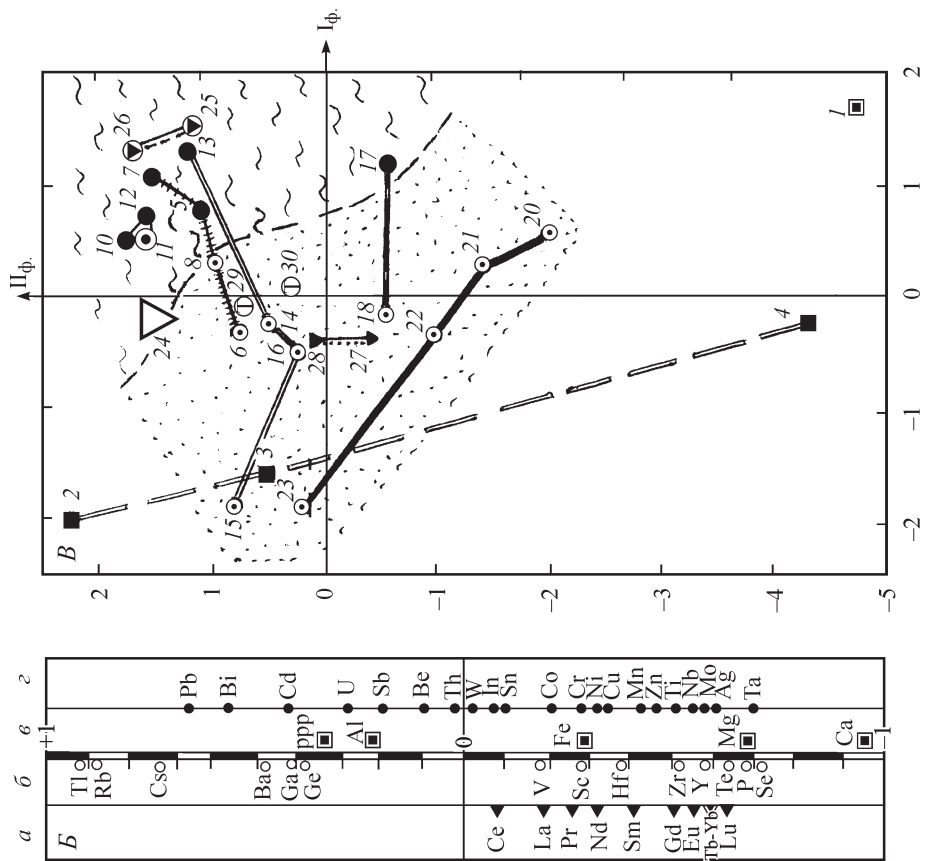
После обработки геохимической информации, с учетом данных полевых наблюдений и результатов микрозондовых исследований, авторы пришли к выводу, что под «Тунгусским феноменом» следует понимать всю совокупность **геологических процессов**, приведших к Тунгусской катастрофе 1908 г. Можно предполагать трехстадийный характер их развития: 1-я стадия — внедрение валунных суглинков в жерловину Куликовского палеовулкана, образование в результате водородной дегазации псевдотермокарстовых воронок (типа Сусловской) и формирование конуса выноса в приустьевой части р. Чургим; 2-я стадия — глиняный диапиризм, грязевой вулканизм с широко проявленными процессами кавитации и формирование криптовулканических кальдер; 3-я стадия — многократные (не менее 4 раз) взрывы глубинных эндогенных газов, образование в резко восстановительных условиях углеродистых сферул; заключительным аккордом этих процессов является Тунгусская катастрофа 1908 г. Исходя из этой модели, авторы предположили возможность получения дополнительной информации из космических фотоснимков территории. Были изучены космоснимки с высокой разрешающей способностью (www.google.earth.com). Использование программного комплекса «Photoshop» позволило резко уменьшить эффект зеленого таежного фона и вычленить участки резкого обогащения напорными водами четвертичных отложений. На основе преобразованного космоснимка составлена схема дешифрирования (рис. 4), на которой выделены предполагаемые жерловины разных стадий развития криптовулканов и которая может быть использована как рабочий макет для последующих геолого-геохимических (и геофизических) исследований.

Второй, не менее важный вопрос при построении модели — возрастная датировка этого многостадийного процесса. На изданных геологических картах рыхлые отложения обозначены верхним

Рис. 2. Спайдер-диаграмма коренных пород и рыхлых отложений из эпицентра Тунгусской катастрофы.

1 — траппы; 2 — риолиты; 3 — кремнистые породы; 4 — кварциты; 5 — делювиальные отложения; 6 — катастрофные пролювиальные отложения; 7 — дальнеприносные отложения конуса выноса и аллювий; 8 — глины и сферулы Сусловской воронки; 9–13 — аномальные пробы сферул Суловской воронки (9), глинистой фракции докатастрофного (10) и катастрофного (11) делювия, песчаной фракции докатастрофных (12) и катастрофных (13) дальнеприносных отложений.

Fig. 2. Spider-diagram of primary rocks and loose sediments from epicenter of Tunguska catastrophe.



плейстоценом-голоценом. Нижняя граница этого интервала (Астахов, 2008) отвечает интервалу 117—120 тыс. лет. Если учесть, что все проявления эндогенной активности совпадают с периодами максимального потепления, то границу между 1-й и 2-й стадиями можно условно принять равной 50 ± 5 тыс. лет. Граница 2-й и 3-й стадий лежит в интервале от 15.9 тыс. лет (возраст сферул верхней части разреза глин Сусловской воронки) до 11.4 тыс. лет (граница плейстоцена и голоцена). По-видимому, наиболее вероятной датой первого, гигантского газового взрыва в пределах криптовулканических построек можно считать возраст 12 900 лет, с которым связывают планетарную катастрофу (Finstone et al., 2007). Геоморфологические и археологические (Макулов и др., 2009) данные свидетельствуют, что после сартанского похолодания еще дважды до Тунгусской катастрофы 1908 г. могли произойти менее мощные взрывы: 5—7.2 тыс. лет назад (атлантический период) и 0.95—2.2 тыс. лет назад (субатлантический период). Первый из них подтверждается радиоуглеродным возрастом (7000 лет) костей мамонта (т. н. 8079), второй — линзой суглинков (т. н. 8078) низкой поймы р. Хушма, где обнаружены углеродистые сферулы. Предполагается, что активные восходящие движения в районе начались на границе среднего и верхнего плейстоцена, более 100 тыс. лет назад, и что формирование второй надпойменной террасы завершилось около 50 тыс. лет назад, на границе первой и второй стадий развития криптовулкана. На границе плейстоцена и голоцена закончилось образование первой надпойменной террасы. Отложения верхней и нижней пойм параллелизуются нами с третьей стадией развития криптовулкана, а верхняя часть разреза нижней поймы — с Тунгусской катастрофой 1908 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Геологическое строение района. По данным геологического картирования 1 : 200 000 масштаба (Котков и др., 1977) и результатам палеовулканических исследований (Сапронов, 1986; Сапронов, Вальчак, 2003), наиболее древними породами являются верхнепермские вулканогенно-осадочные образования и перекрывающие их нижнетриасовые траппы, рассекаемые многофазными гипабиссальными интрузиями долеритов. Они группируются в виде силлов, даек и штоков в пределах Хушминского триасового палеовулкана. Наиболее крупное штокообразное тело долеритов с поперечником более 2 км (гора Стойкович) известно как Куликовский палеовулкан. Триасовый магматизм завершился внедрением дифференцированных интрузий долеритов, слагающих протяженный (более 200 км) дайковый пояс северо-западного простирания, затухающий в истоках р. Хушма. На его продолжении, в 0.5—7 км от ЮЗ от кордона Пристань, закартированы два небольших тела вулканогенных карбонатитов позднемезозойского щелочно-ультраосновного комплекса, в которых обнаружены Ba-Sr-Zn рудопроявления. С этими телами ассоциируют многочисленные силлообразные метасоматические залежи карбонатитов. Здесь же в долине р. Хушма отобраны шлиховые пробы, показавшие невысокое (единичные знаки) содержание самородного золота. Рыхлые отложения района предшествующими работами изучены менее детально. Авторы (Котков и др., 1977) выделяют лишь верхнеплейстоцен-голоценовые озерно-болотные и аллювиальные отложения, не акцентируя внимания на других генетических типах образований и совершенно не рассматривая осадки, связанные с Тунгусской катастрофой 1908 г. Проведенное нами изучение рыхлых отложений (уч. 1—16) позволило обратить внимание на следующие их особенности:

1) элювиально-делювиальные отложения (уч. 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 13, 14) пользуются повсеместным развитием. Главнейшие их особенности — очень высокое содержание алевропелитовой фракции; среди обломков песчаной фракции могут преобладать сильно магнитные долериты (уч. 2), кварциты (уч. 1, 6), риолиты (уч. 4); повсеместно распространены углеродистые сферулы как в катастрофных, так и в докатастрофных образованиях. Количество катастрофных сферул преобладает над числом их в докатастрофных отложениях и составляет соответственно 40 и 30 (уч. 4), 120 и 22 (уч. 8), 150 и 14 (уч. 12), 40 и 20 (уч. 13), 650 и 60 (уч. 14) штук на 1 кг суглинки; средние значения равны соответственно 200 и 29 сферулам. Максимальное количество катастрофных сферул (более 2000 шт./кг) зафиксировано на уч. 3 (гора Фаррингтон). В центре Куликовского палеовулкана докатастрофные су-

Рис. 3. Результаты факторного анализа петрохимических данных (табл. 1) по рыхлым отложениям из эпицентра Тунгусской катастрофы.

A — диаграмма факторных нагрузок петрогенных оксидов и РРР; на диаграмме пунктирной линией ограничены микроэлементы, имеющие различные коэффициенты корреляции со значениями I и II петрохимических факторов; *B* — типизация петрохимических параметров и микроэлементов (*a* — редкоземельные, *b* — литофильные, *v* — рудные и сидерофильные) по значениям II петрохимического фактора; *B* — диаграмма значений I и II петрохимических факторов, рассчитанных по параметрам матрицы факторных нагрузок (число объектов равно 14, это совокупности 5—8, 13—18, 20—23, см. табл. 1); по этой же модели рассчитаны показанные на рис. 3, *B* значения I и II факторов для совокупностей 1—4.

Fig. 3. Results of factor analysis of petrochemical data (table 1) on loose sediments from epicenter of Tungus-skaya catastrophe.

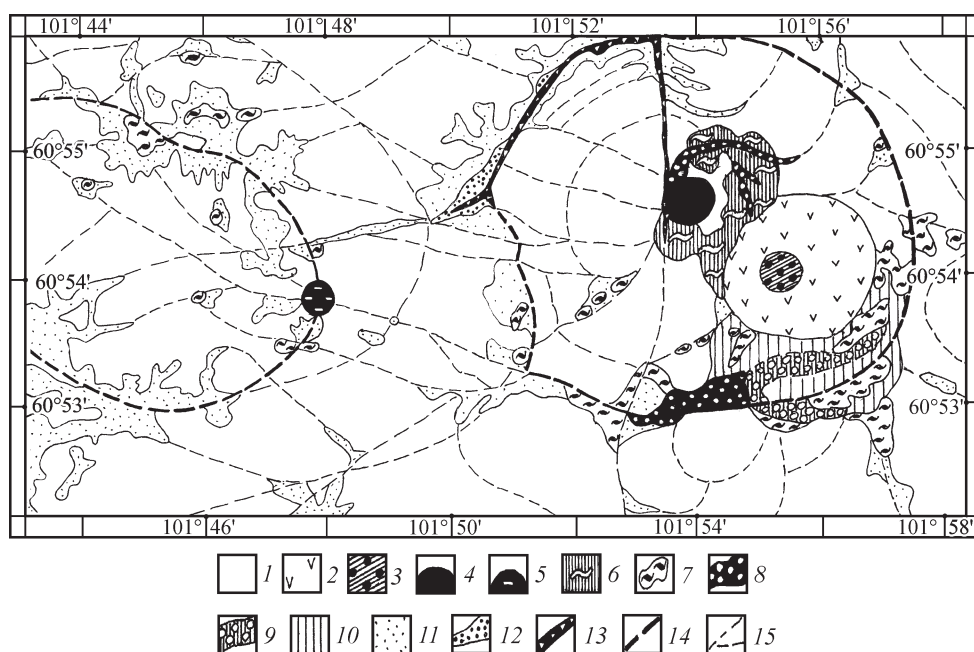


Рис. 4. Схема дешифрирования космического фотоснимка района Тунгусской катастрофы.

1 — участки, слабо затронутые криптовулканической деятельностью четвертичного возраста; 2 — жерловина Куликовского палеовулкана триасового возраста; 3 — предполагаемая жерловина первой стадии развития четвертичного Куликовского криптовулкана; 4 — предполагаемая жерловина второй стадии развития Куликовского криптовулкана; 5 — предполагаемая жерловина второй стадии развития Верхнехушминского криптовулкана; 6 — околожерловые грязевулканические образования второй стадии Куликовского криптовулкана; 7 — экструзивные грязевулканические купола второй стадии; 8 — жерловые фации третьей стадии развития Куликовского криптовулкана; 9 — предполагаемые участки развития жерловой фации третьей стадии Куликовского криптовулкана; 10 — озерно-болотно-криповулканические образования второй и третьей стадий Куликовского криптовулкана; 11 — участки интенсивного развития современных напорных вод глубинного происхождения; 12 — приразломные участки весьма интенсивного развития современных напорных вод; 13 — четвертичные долгоживущие разломы, сопровождаемые зонами дробления (?); 14 — предполагаемые осевые линии кальдерных структур Куликовского (на востоке) и Верхнехушминского (на западе) криптовулканов; 15 — второстепенные разрывные нарушения, обновленные в четвертичное время.

Fig. 4. Scheme of decoding of the cosmic photograph of the Tungussskaya catastrophe region.

глинки, наоборот, обогащены углеродистыми сферулами по сравнению с катастрофными (соответственно 300 и 100 шт./кг);

2) пролювиальные отложения катастрофного слоя мощностью 32 см (уч. 11) сложены серыми (7 см) и перекрывающими их бурыми (25 см) супесями, которые различаются лишь по содержанию циркона (внизу — 4500 зерен/кг; вверху — 1300 зерен/кг; размер зерен более 0.1 мм) и граната. Катастрофный пролювий резко обогащен цирконом по сравнению с элювием долеритов (3—10 зерен/кг), кварцитов (60—300 шт./кг) и риолитов (около 800 шт./кг). Углеродистые сферулы в пролювии встречаются в единичных (до 5 шт.) экземплярах;

3) пролювиальные докатастрофные отложения конуса выноса р. Чугрим (уч. 16) имеют мощность более 12 м и характеризуются закономерной сменой валунных супесей гравийными и затем косослоистыми песками. Главнейшая особенность песчаной фракции пород конуса выноса — резкое преобладание зерен туффизитов над долеритами, а в гравийно-валунной фракции — долеритов и «экзотических» пород;

4) аллювиальные отложения низкой поймы (уч. 15) высотой около 1.5 м параллелизуются нами с катастрофными (пр. 8077) и докатастрофными (пр. 8078, 8079) образованиями. Наибольший интерес представляет пр. 8077, где обнаружены (рис. 1) многочисленные углеродистые и железные сферулы, хромистое железо, самородный алюминий и т. д.

Особое место среди рыхлых отложений занимают глины «термокарстовых» воронок. Большинство геологов увязывают их формирование с карстообразующими процессами теплых поверхностных вод летних периодов. В случае развития этих воронок по долеритам проблема карста обычно не обсуждается. Наши данные по Сусловской воронке (отсутствие обломочного материала долеритов,

очень высокое содержание углеродисто-глинистых сферул) позволяют усомниться в ее экзогенном происхождении. Пока за этими образованиями мы сохраняем термин «рыхлые отложения неясного генезиса».

Петрохимические особенности рыхлых отложений. Имеющиеся данные (табл. 1, рис. 3, выборки 5—8, 13—23) свидетельствуют о том, что главным фактором распределения петрогенных оксидов является антагонизм Si, K, Na по отношению к Ca, Mg, Fe, Al, обусловленный различным характером дифференциации кварц-полевошпатовой фракции и темноцветных минералов (магнетит, пироксены). Например, содержание SiO_2 закономерно убывает от немагнитной (77—79 %) к песчаной (57—64 %), электромагнитной (51—61 %) и алевропелитовой (45—54 %) фракциям; при этом наблюдается последовательное увеличение количества FeO. Существенную роль в распределении петрогенных оксидов играет фактор, устанавливающий антагонизм Ca, Mg, Fe по отношению к Al_2O_3 и параметру PPP. По этому фактору разделяются дальнеприносные осадки (аллювий и отложения конуса выноса) и обогащенные глинисто-углеродистым материалом осадки ближнего сноса (элювий, делювий, катастрофный пролювий). Обогащенность осадков первой группы типоморфными элементами долеритов трапповой формации (Ca, Mg, Fe) связана с тем, что при длительном переносе легкоподвижные углеродистые сферулы и глинистые частицы перемещаются пролювиально-аллювиальными водными потоками на значительные расстояния за пределы района. При этом индикаторная роль Al_2O_3 , содержания которого варьируют в пределах 10—16 %, менее существенна по сравнению с параметром PPP. По-видимому, потери при прокаливании связаны с разложением углеродистых сферул, углеродисто-глинистых частиц и других образований при подготовке материала к рентгенофлуоресцентному анализу.

Рыхлые отложения неясного происхождения (глины и сферулы Суловской воронки, аномальные пробы; см. выборки 10—12, 24—28 в табл. 1) по петрохимическим характеристикам обнаруживают сходство с теми типами пород, с которыми они генетически могут быть связаны. Например, глины Суловской воронки, по составу отвечающие глинистой фракции делювиальных отложений, почти не отличаются от углеродисто-глинистых сферул этой воронки, а аномальные сферулы Суловской воронки (сов. 24) фиксируются лишь пониженными величинами параметра PPP. Интересные данные получены по зольным фракциям торфов (сов. 29, 30): петрохимически они сходны с песчаными фракциями делювиальных и катастрофных пролювиальных отложений.

Сопоставление петрохимических данных по рыхлым отложениям с материалами по коренным породам (рис. 3, В) свидетельствует о полигенном характере рыхлых отложений. Траппы, резко обогащенные Cr, Mg, Fe, могут рассматриваться как важный, но не основной источник питания для дальнеприносных рыхлых осадков. Для ближнеприносных отложений, обогащенных углеродисто-глинистым материалом, роль траппов как питающего источника незначительна. Особняком от траппов стоят «экзотические» породы (сов. 2, 3, 4). На рис. 3, В кремнистые образования, риолиты и кварциты расположены вдоль оси второго фактора и сильно смещены в левую кремнещелочную часть диаграммы.

Геохимические особенности рыхлых отложений. Основные закономерности распределения элементов-примесей в коренных породах и рыхлых отложениях следующие:

для рыхлых отложений характерна ярко выраженная редкоземельно-торий-уран-бариевая литофильная специализация, фиксирующая повышенные в десятки и сотни раз концентрации элементов по отношению к хондритовому уровню. Для всех типов пород (делювий, пролювий, аллювий) характерно синхронное понижение уровня концентраций от литофильных элементов к рудным и сидерофильным;

глины и сферулы Суловской воронки почти повторяют спектр редких элементов делювиального ряда, что свидетельствует об их генетической общности. Все аномальные пробы характеризуются постоянным повышением в 2—3 раза концентраций большинства элементов по отношению к рыхлым отложениям. Максимальные содержания элементов фиксируются в аномальной пробе углеродисто-глинистых сферул Суловской воронки;

главнейшее отличие долеритов от рыхлых отложений заключается в спектре редкоземельных элементов: у долеритов наблюдается слабое закономерное уменьшение коэффициентов концентрации (Кк) по отношению к хондриту от La (30.8) к Er, Tm, Yb, Lu (16.6—19.2), в то время как у рыхлых отложений (сов. 5—8, 13—23) Кк уменьшается от 80.3 у La до (8.9—11.7) у тяжелых REE, т. е. рыхлые отложения резко обогащены легкими REE;

«экзотические» породы, как и в случае с петрогенными элементами, образуют единый ряд (кремни → риолиты → кварциты), в котором крайние члены, существенно обогащенные кремнеземом, выделяются дефицитом редких и редкоземельных элементов на фоне аномально высоких концентраций урана. Микроэлементный состав риолитов близок к рыхлым отложениям, отличаясь более высоким уровнем накопления Mo, W, Be.

Таким образом, по уровням концентраций элементов-примесей изучаемые породы отчетливо разделяются на четыре группы: 1 — траппы; 2 — «экзотические» породы неясного происхождения; 3 — рыхлые отложения делювиально-пролювиально-аллювиального ряда; 4 — рыхлые отложения неясного генезиса (глины и сферулы Суловской воронки, а также все аномальные пробы). Три последние группы специализированы на легкие REE и U.

Таблица 2

Результаты сравнительного анализа траппов и главнейших типов рыхлых отложений
из эпицентра Тунгусской катастрофы 1908 г.

Results of comparative analysis of traps and the principal types of loose sediments
in epicenter of Tunguska catastrophe in 1908

№	Геохимический параметр	Средние значения					t-критерий				ст-параметр			
		1	2	3	4	5	а	б	в	г	а	б	в	г
1	SiO ₂	48.20	58.76	56.78	63.48	59.78	-2.2	-1.9	-1.0	0.7	1	0	0	0
2	Al ₂ O ₃	15.75	13.35	13.99	12.90	12.47	2.6	1.4	2.7	0.6	1	0	1	0
3	FeO	14.20	7.39	8.17	5.28	7.17	4.3	2.8	1.0	-1.2	4	2	0	0
4	MgO	5.68	2.28	2.08	1.77	2.90	6.4	1.3	-2.5	-2.0	6	0	1	0
5	CaO	10.80	2.57	2.00	2.05	3.84	14.1	-0.2	-6.7	-4.3	7	0	6	3
6	Na ₂ O	2.44	1.41	0.95	1.69	2.04	2.7	-2.9	-6.5	-1.2	1	2	6	0
7	K ₂ O	0.33	1.52	1.32	1.72	1.78	-5.6	-2.8	-3.9	-0.3	5	2	3	0
8	PPP	0.35	11.24	13.18	10.27	8.38	-3.7	1.4	2.9	0.7	3	0	2	0
9	P	1175	691	626	449	947	2.6	2.3	-4.0	-7.8	1	3	6	2
10	Ti	10143	5524	4932	3343	7971	1.5	2.9	-2.0	-1.9	0	2	0	0
11	Cr	162	84	84	65	92	2.9	1.6	-0.8	-1.4	2	0	0	0
12	Mn	1237	779	970	228	967	0.9	4.4	0	-4.0	0	4	0	3
13	Ni	107	40	41	29	45	4.1	2.2	-0.7	-1.8	3	1	0	0
14	Cu	121	36	37	22	44	4.1	2.7	-1.1	-2.3	3	1	0	1
15	Zn	119	94	93	56	119	0.9	3.1	-1.5	-3.1	0	2	0	2
16	Se	2.7	1.6	1.4	1.0	2.2	2.8	2.9	-5.3	-9.7	2	2	5	6
17	Rb	7.7	43.9	51.7	57.4	31.4	-8.8	-0.9	5.1	5.2	6	0	5	4
18	Sr	162	312	252	405	375	-2.8	-2.5	-3.0	0.6	2	1	2	0
19	Nb	5.5	9.9	8.9	6.9	13.4	-1.9	2.3	-2.2	-2.0	0	1	1	0
20	Sb	0.05	0.29	0.32	0.25	0.27	-10.1	2.0	1.7	-0.7	7	0	0	0
21	Te	1.90	0.22	0.19	0.13	0.32	4.3	0.9	-1.9	-2.1	4	0	0	1
22	Cs	0.18	1.71	2.52	1.76	1.00	-7.8	2.1	8.6	3.6	6	1	6	2
23	Ba	104	410	438	517	340	-9.0	-1.9	3.3	3.1	6	0	2	2
24	La	7.3	18.0	17.5	18.1	18.7	-6.1	-0.4	-0.7	-0.2	6	0	0	0
25	Ce	17.5	38.7	39.7	38.1	37.7	-5.1	0.4	0.5	0.1	5	0	0	0
26	Nd	12.1	15.6	14.8	15.0	17.0	-1.5	-0.1	-1.3	-0.8	0	0	0	0
27	Eu	1.24	0.87	0.80	0.87	0.98	2.4	-0.7	-2.3	-1.2	1	0	1	0
28	Gd	4.45	2.99	2.68	2.65	3.67	1.8	0.1	-2.5	-1.8	0	0	1	0
29	Dy	5.01	2.71	2.36	2.33	3.49	2.6	0.1	-2.9	-2.0	1	0	2	0
30	Er	3.08	1.60	1.37	1.28	2.16	2.6	0.4	-3.4	-2.5	1	0	2	1
31	Yb	2.78	1.53	1.32	1.27	2.03	2.5	0.2	-3.3	-2.3	1	0	2	1
32	Ta	0.40	0.85	0.72	0.43	1.42	-2.3	3.3	-4.6	-4.9	1	2	4	4
33	Tl	0.05	0.28	0.34	0.34	0.20	-10.1	0	7.4	5.7	7	0	6	5
34	Pb	2.72	9.78	11.55	10.33	7.62	-6.3	0.8	3.6	2.0	6	0	3	0
35	Th	1.33	5.26	5.75	4.51	4.98	-9.8	2.3	1.9	-0.8	6	1	0	0
36	U	0.44	1.26	1.41	1.10	1.16	-6.6	1.8	2.1	-0.4	6	0	0	0
37	Al ₂ O ₃ /K ₂ O	48.6	9.8	11.6	8.1	7.5	16.2	1.9	3.2	0.6	7	0	2	0
38	K ₂ O/Na ₂ O	0.14	1.41	1.73	1.36	0.88	-3.0	1.0	3.5	2.4	2	0	2	1
39	Cr/Ni	1.52	2.09	2.04	2.26	2.07	-4.6	-2.4	-0.4	1.8	4	1	0	0

Таблица 2 (продолжение)

№	Геохимический параметр	Средние значения					t-критерий				ст-параметр			
		1	2	3	4	5	а	б	в	г	а	б	в	г
40	Zn/Pb	43.9	12.0	9.9	5.6	17.6	6.6	1.7	-2.8	-2.9	6	0	2	2
41	100 · Rb/Sr	4.8	18.0	26.0	14.9	8.5	-1.5	1.4	3.5	5.0	0	0	3	4
42	Sr/Ba	1.57	0.84	0.65	0.79	1.13	4.2	-1.3	-5.8	-3.8	4	0	5	3
43	Nb/Ta	13.6	12.3	12.8	16.1	10.0	0.7	-2.6	2.7	4.5	0	1	2	3
44	Ce/Er	5.69	26.1	30.5	30.5	18.2	-4.0	0	5.0	4.8	3	0	4	4
45	Ce/REE	0.28	0.43	0.45	0.43	0.39	-6.6	0.9	4.6	4.1	6	0	4	3
46	REE	62.7	95.6	92.1	90.2	102.7	-2.4	0.2	-1.3	-0.9	1	0	0	0
47	Eu/Eu*	0.91	0.87	0.88	0.94	0.83	0.5	-1.0	0.9	1.3	0	0	0	0
48	PT-F2	-5.21	0	0.58	0.31	-1.16	-10.3	1.4	8.0	4.5	7	0	6	3

Примечание. Приведены средние значения параметров для траппов (сов. 1, число проб $N_1 = 4$), рыхлых отложений ($N_2 = 53$), делювиальных ($N_3 = 26$), катастрофных пролювиальных ($N_4 = 8$), пролювиально-аллювиальных (уч. 15, 16; $N_5 = 19$). Значения t-критерия Стьюдента рассчитаны для следующих пар геохимических совокупностей: а = 1 и 2; б = 3 и 4; в = 3 и 5; г = 4 и 5. ст — параметр, показывающий, при каком уровне значимости отвергается гипотеза о различии сравниваемых совокупностей; ст = 0 свидетельствует об отсутствии различий; ст = 1 указывает на различия при 5%-ном уровне; 2 — при 1%-ном; 3 — при 0.1%-ном; 4 — при 0.01%-ном; 5 — при 0.001%-ном; 6 — при 0.0001%-ном; 7 — при 0.00001%-ном уровнях значимости.

Элювиально-делювиальные отложения. При попарном сравнении выборок делювиальных, катастрофных пролювиальных и пролювиально-аллювиальных отложений устанавливаются (табл. 2) статистически значимые различия по пяти петрогенным параметрам (делювиальные отложения обогащены Al_2O_3 , Fe, PPP и обеднены K_2O , Na_2O) и по двум микроэлементам (обогащены Cs и обеднены Sr). По-видимому, это обусловлено тем, что внутри делювиальных отложений весьма существенны различия между песчаной и алевритовой фракциями, между катастрофными и докатастрофными образованиями. Действительно, при использовании t-критерия выявляются повышенные содержания SiO_2 , Na_2O , Mn, Ba в песчаной фракции и Al_2O_3 , MgO, PPP, Sc, Cr, Ni, Cu, Ga, Ge, Nb, In, Sn, Cs, Ta, Bi, Th в алевропелитовой фракции делювия. В докатастрофном делювии выявлено повышение содержания Se и REE (от Pr до Lu), а катастрофные образования обогащены Mn и углеродистым материалом (параметр PPP). Это свидетельствует о более сильном влиянии гранулометрического фактора по сравнению с катастрофным и о необходимости раздельно сравнивать песчаные (до- и катастрофные) и алевропелитовые фракции. При таком сравнении устанавливается индикаторность катастрофных процессов только для двух параметров — Mn и PPP. Потери при прокаливании увеличиваются от 8.2 % в докатастрофном до 12.8 в катастрофном делювии (песчаная фракция), а затем возрастают от 13.3 в докатастрофной до 17.8 % в катастрофной алевропелитовой фракции. Максимальные содержания Mn (1800 г/т) отмечены в катастрофной песчаной фракции, а минимальные (460 г/т) — в докатастрофной глинистой фракции, что предполагает связь Mn с крупными катастрофными углеродистыми сферами.

Докатастрофные делювиальные суглинки характеризуются низкими значениями параметра PPP (11 %) и содержания Mn (600 г/т) по сравнению с катастрофными суглинками (PPP 15 %, Mn 1300 г/т), что может свидетельствовать о меньшей мощности докатастрофного взрыва, предполагаемый возраст которого 2000 лет. В развитии катастрофных процессов намечаются элементы поперечной (по отношению к траектории взорвавшегося тела) зональности: на участках Северное болото и Палеовулкан углеродистые сферы, по-видимому, были резко обогащены Mn, в то время как в эпицентре и на Южном болоте песчаная фракция обеднена Mn. Максимальное количество углеродистого материала отлагалось в алевропелитовой фракции конуса выноса (именно здесь установлено максимальное разнообразие углеродистых сферул в песчаной фракции).

Проловиальные отложения катастрофного слоя. От делювиальных и аллювиальных отложений супеси катастрофного пролювия, пока обнаруженного на единственном участке в истоках р. Чургим, статистически значимо отличаются пониженным содержанием P, Mn, Cu, Zn, Se, Nb, Ta. Низкий уровень содержаний в катастрофном пролювии сидерофильных элементов, являющихся типоморфными для траппов, указывает на поступление материала из других более глубоких источников. Еще раз подчеркнем, что по петрогеохимическим данным катастрофный пролювий близок к делювиальным отложениям ближнего сноса.

Аллювиальные и пролювиальные отложения конуса выноса. Сравнительный анализ по t-критерию аллювиальных отложений (уч. 15) и отложений конуса выноса (уч. 16) показал, что по микроэлементному составу докатастрофные осадки конуса выноса значительно ближе к аллювию, чем к ка-

тастрофному пролювию, что позволяет разделять отложения ближнего сноса (элювий, делювий, катастрофный пролювий) и дальнеприносные (аллювий и докатастрофный пролювиальный конус выноса). Аллювиальные отложения максимально контрастно отличаются (табл. 2) от делювия и катастрофного пролювия. Обнаружение в них повышенных концентраций CaO, P, Se, REE (от Dy до Lu), Ta и пониженных содержаний Rb, Cs, Ba, Tl, Pb может быть объяснено существенным влиянием химизма траппов, обломки которых широко развиты в аллювии. Вместе с тем в аллювии установлены максимальные для района содержания K_2O (1.78 %), Nb и Ta. Это позволяет высказать предположение, что в глубинных зонах криповулканического сооружения могут быть развиты породы кислого состава и что в верховьях р. Хушма в коренном залегании могут быть обнаружены риолиты.

При сравнении катастрофного (т. 8077) и докатастрофного (т. 8079) аллювия устанавливается обогащенность первого Rb и обедненность V, что согласуется с повышенным содержанием Rb в катастрофном пролювии. По характеру распределения элементов-примесей в аллювиальных отложениях выделяются: элементы, концентрирующиеся в немагнитной фракции (Rb, Ba, Tl) и связанные с полевыми шпатами; элементы с максимальными содержаниями в слабозлектромагнитной фракции (Sr, Cs, Th); преимущественно рудные элементы (Be, Zn, Ge, Se, Mo, Ag, Cd, Sb, Te, W, Pb), не зависящие от магнитности фракций; Y и REE с общей тенденцией увеличения содержаний от немагнитной фракции к магнитной (второй максимум); элементы, накапливающиеся в магнитной фракции (P, Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Ga, Zr, Nb, Sn, Hf, Ta, U). Заслуживают внимания отчетливо выраженные тенденции накопления Rb, Sr, Ba в катастрофном аллювии и Ag, Cs, REE (от Sm до Lu) в отложениях конуса выноса. Они подчеркивают последовательную смену во времени от ранних к поздним стадиям развития состава продуктов деятельности криповулкана ($Mg \rightarrow Fe \rightarrow K$).

Глины и сферулы Сусловской воронки. Микроэлементный состав глин Сусловской воронки почти полностью совпадает с составом глинистой фракции делювиальных отложений; различия устанавливаются по Mn (соответственно 248 и 620 г/т), Sb (0.52 и 0.36 г/т), Pb (14 и 10 г/т). Несколько большие различия установлены при сравнении докатастрофных глин: Сусловская воронка выделяется повышенным содержанием Y и всех REE, а делювий — повышенной концентрацией Mo и Mn. Катастрофные глины Сусловской воронки по сравнению с докатастрофными обогащены FeO, CaO, P, Mn, Co, Ni, Cu, Sr, Y, REE и обеднены Al_2O_3 , K_2O , Nb, Cs; различия статистически значимые, но не очень сильные — отличия средних значений составляют обычно 30—50 %. Сферулы Сусловской воронки по сравнению с глинами воронки заметно обогащены CaO, Mn, Co, Nb, Cs, W, Th, однако контрастные различия устанавливаются только по Mn (соответственно 248 и 564 г/т) и Co (40 и 15 г/т). Таким образом, есть основания полагать, что делювиальные глины, углеродисто-глиняные сферулы и глины Сусловской воронки, обладая близким микроэлементным составом, могут являться продуктом единого геологического процесса.

Песчаная фракция глин Сусловской воронки отличается от аналогичных делювиальных и катастрофно-пролювиальных образований резко пониженным содержанием Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Nb, Cd, Sn, REE, Ta, Th. Например, содержание Mn составляет лишь 70 г/т (делювий — 1320, пролювий — 274 г/т) и практически совпадает с содержанием Mn 75 г/т в немагнитной песчаной фракции катастрофного пролювия. Это может свидетельствовать о близости процессов формирования песчаной фракции глин.

Аномальные пробы рыхлых отложений. Охарактеризованные ранее неаномальные сферулы из глин Сусловской воронки имеют размер более 0.6 мм. Мелкие сферулы размером 0.1—0.4 мм оказались аномальными. В них (табл. 1, сов. 24) концентрации большинства элементов повышены в 2—5 раз по сравнению с неаномальными сферулами. Спектр редкоземельных элементов этой пробы полностью повторяет спектр REE глин и сферул Сусловской воронки (рис. 2). Кроме сферул Суловской воронки выявлены еще четыре аномальные пробы — из докатастрофных (табл. 1, сов. 25) и катастрофных (сов. 26) делювиальных отложений алевропелитовой фракции, а также из песчаной фракции пойменного катастрофного суглинка (сов. 27, т. н. 8077) и косослоистого песка плейстоценового конуса выноса (сов. 28, т. н. 8081). Их микроэлементный состав близок к составу аномальных сферул Суловской воронки (рис. 2). Вместе с тем по t-критерию устанавливаются резкие различия между аномалиями в делювии (обогащены Al_2O_3 , FeO, PPP, Ti, V, Ni, Ga, Rb, Nb, Cs, W, Tl, Bi, U) и аллювии (SiO_2 , CaO, Na_2O , K_2O , Mn, Sr, Ba). Причиной столь резких различий можно считать наличие вулканогенных карбонатитов, обогащенных Sr и Ba (выше по течению р. Хушма), в виде обломков, поступавших в аллювий. Уникальным и пока необъясненным является факт очень высоких содержаний Hf в аномальных пробах (табл. 1). Zr/Hf отношение в аномальных пробах равно 19—22, а во всех остальных совокупностях варьирует в пределах 36—44. Заметим, что в пробе золы из Южного болота Zr/Hf отношение очень низкое (табл. 1).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Об углеродистых сферулах. Микрозондовые исследования позволяют предварительно разделить углеродистые сферулы на две группы: 1 — эндогенные, докатастрофные, связанные с глубинными процессами; 2 — экзогенные, катастрофные, связанные с Тунгусским взрывом 1908 г. В первой

группе выделено 4 типа (железисто-углеродистые, марганцево-углеродистые, глинисто-углеродистые, углеродисто-глинистые), а во второй — 3 типа (муассанит-глинисто-углеродистые, полые углеродистые и сажисто-углеродистые).

Железисто-углеродистые сферулы (рис. 1, 15) встречены лишь в одном обломке туффизита из катастрофного аллювия, где они ассоциируют со сферулами самородного железа. Повсеместно железные сферулы разьедаются и замещаются углеродистым материалом, иногда — углеродисто-глинистым. Следы такого замещения отмечаются на каплевидных выделениях самородного железа (рис. 1, 17) и в пластинке самородного железа (рис. 1, 12). К этому типу сферул примыкают редко встречающиеся обломки природного шлака (рис. 1, 12), по сути дела являющегося железисто-глинисто-углеродистым флюидзитом. Марганцево-углеродистая сферула (рис. 1, 11), заключенная в более позднюю катастрофную глиняную рубашку, резко выделяется обилием радиально расходящихся 3—10-микронных каналов дегазации и единичными более крупными трещинами (рис. 1, 12), в которых сегрегируется углеродисто-глинистое вещество с высоким содержанием Fe и Mn (до 41 %). Глинисто-углеродистые сферулы (рис. 1, 13) встречаются чаще других типов. Они выделяются по радиально-концентрической текстуре сегрегации глинистого и углеродистого материала и присутствию характерных микронных миароловых пустот, в которых встречены переотложенные кварц, калиевый полевой шпат, глинистые минералы и кальцит. Углеродисто-глинистые сферулы подразделяются на 2 разновидности: а — обогащенные углеродом и нередко содержащие микронные обломки пород и минералов (их форма — от идеально круглой до сфероидной) (рис. 1, 23); б — менее углеродистые с флюидзитоподобной глиняной массой и блестящей высокоуглеродистой оболочкой (внешне напоминают сферулы Суловской воронки). К этому типу сферул генетически примыкают туффизиты (рис. 1, 19; 1, 20), содержащие обломки пород и минералов, сцементированных черной смолистой глинисто-углеродистой связующей массой. Они условно названы гудронными (по аналогии с гудронными песчаниками Жигулевских гор).

Значительный интерес представляют муассанит-глинисто-углеродистые сферулы (рис. 1, 5—1, 8), содержащие многочисленные 10—20-микронные обломки муассанита и близких к нему фаз состава SiC_2 — SiC_3 . Они погружены в глинисто-углеродистую связующую массу, покрытую корочкой спекшегося глинистого материала. В этой же пробе обнаружены зерна состава SiC_5 , SiC_8 и SiC_{20} , а также единичные обломки насекомых с хитиновыми оболочками (рис. 1, 9), в которые под большим давлением в результате Тунгусского взрыва вдавлены 5—20-микронные обломки фазы состава SiC_2 (рис. 1, 10) — количество их составляет не менее 10 % от объема всех типов обломков. Расчет показывает, что в случае справедливости нашего предположения о повсеместном распространении этих сферул в пределах зоны лучистого ожога, речь может идти о десятках тонн катастрофного муассанита и ассоциирующих с ним фаз состава SiC_2 — SiC_{20} . Естественно, перечисленные карбиды кремния должны являться объектами детальных исследований. В этой связи необходимо отметить, что более 25 лет назад в Северном болоте украинские геологи (Соботович и др., 1985) нашли графит-алмаз-лондейлитовые сростки неясного происхождения.

О глинах и сферулах Суловской воронки. Приведенные данные по химизму и микроэлементному составу глин и сферул свидетельствуют не об их озерном или озерно-болотном происхождении за счет окружающих траппов, а позволяют выдвинуть предположение об их эндогенном генезисе при грязе-вулканической деятельности. Тем самым ставится под сомнение термокарстовая природа этих образований (пока речь идет только о Суловской воронке). Существенным доводом в пользу грязевого вулканизма является уникальная находка в Суловской воронке многочисленных (до 2 млн штук на 1 кг глины) калиброванных как маковые зернышки блестящих глиняных сферул, имеющих возраст 15 900 лет. Происхождение их, как уже отмечалось, вероятно, обусловлено процессами кавитации. Нам представляется возможным распространить эти идеи на большую часть так называемых «карстовых воронок».

О геохимической специализации рыхлых пород. Сделанный вывод о редкоземельно-литофильной специализации всех типов рыхлых отложений является принципиальным. Очень высокий уровень концентрации Th, U, Ba и других литофилов (рис. 2), обогащение спектра легкими REE, anomalно высокие коэффициенты корреляции между REE, высокий уровень накопления рудных и низкий — сидерофильных элементов свидетельствует о глубинных источниках этой специализации. В этой связи следует обратить внимание на сходство спайдер-диаграммы рыхлых отложений района Тунгусского взрыва с аналогичными диаграммами по волховитам и шлакам Киришской структуры Ленинградской области (Скублов и др., 2007а, б), где для голоценовых тектитоподобных стекол, по составу отвечающих породам кимберлит-лампроит-карбонатитового ряда, обнаружены аномальные концентрации Ba, U, Th, Sr и других литофильных элементов. Для волховитов предложена криптомагматическая модель формирования, а для рыхлых отложений района Тунгусского взрыва — криповулканическая.

О полигенности рыхлых отложений. В настоящее время можно предполагать, что рыхлые отложения из района Тунгусской катастрофы сформировались в процессе криповулканической деятельности и осадочной дифференциации из пород различного происхождения: пермских осадочных пород, продуктов траппового магматизма, карбонатитов, экзотических пород, глин «карстовых воронок», катастрофных образований.

Пермские осадочные породы изучены весьма схематично. Имеющиеся в литературе сведения (Котков и др., 1979; Сапронов, Вальчак, 2003) отрывочны, обращается внимание на развитие вулканогенных фаций пород, на присутствие конгломератов и горизонта каменного угля, вскрытого скважиной на глубине 495 м в 7 км к ЮЗ от кордона Пристань. Влияние долеритов трапповой формации существенно только для дальнепринесных аллювиальных отложений, несколько меньше — для отложений конуса выноса; траппы резко отличаются от рыхлых отложений по спектру REE и аномально низким содержанием Rb, Cs, Pb, Sb, Tl и других элементов (рис. 2). Карбонатиты среднего течения р. Хушма также слабо изучены. Обращается внимание на вулканогенный тип этих образований, на широкое распространение барита, целестина, гипса, ангидрита, Cu-Zn минерализации и сопутствующего ареала апокarbonатитовых метасоматитов. Анализ космических снимков показал, что именно в 4 км к юго-западу от кордона Пристань в начале верхнего плейстоцена начались восходящие движения и зарождение криптовулкана, что привело к образованию двух надпойменных террас, цепочки водораздельных озер и «карстовых воронок», в плане образующих дугу (с обращенной на СЗ выпуклой стороной) поперечником около 10 км. Не исключено, что здесь будет обнаружена еще одна криптовулканическая кальдера.

Экзотические породы неясного происхождения, кроме геохимически охарактеризованных кремней, риолитов, кварцитов, представлены мало изученными яшмовидными породами, сердоликами, туффизитами, шлаками, шунгитами (обнаружено 3 обломка блестящего стеклоглглерода, напоминающего аналогичные образования из Онежской структуры). Влияние экзотических пород на геохимию рыхлых отложений невелико. Изучение их необходимо для интерпретации геохимических данных, построения модели Тунгусского феномена и решения проблемы россыпной алмазности Сибири. Глины «карстовых воронок» и геохимически практически не отличимые от них глины делювиальных отложений играют важнейшую роль при формировании петрогеохимического облика рыхлых отложений. И если для петрогенных элементов влияние этого фактора достаточно скромное (вес второго фактора 24 %), то для редких элементов весьма существенно. Предположение о преимущественном накоплении редких элементов, особенно литофильных, в алевропелитовой фракции делювия и в глинах Суловской воронки является определяющим для геохимии рыхлых пород ближнего сноса.

О геохимии катастрофных процессов. Имеющиеся данные позволяют высказать предположение, что Тунгусскому взрыву 1908 г. предшествовали как минимум еще три катастрофы: 1 — около 13 тыс. лет назад; 2 — около 7 тыс. лет назад; 3 — около 2 тыс. лет назад. Первая катастрофа, отвечающая по времени библейскому «великому потопу», носит глобальный характер; в изученном районе она проявлена резкой сменой 15 900 лет назад глиняного диапиризма валунниками и формированием I надпойменной террасы. В результате второй катастрофы верхнеплейстоценовые отложения конуса выноса р. Чургим были размыты и полный разрез их вскрыт у кордона Пристань. Третья катастрофа, существенно меньшая по масштабу, чем Тунгусская, фиксируется горизонтом гумусового суглинки, содержащего докатастрофные углеродистые сферулы.

Высказанное предположение о четырех катастрофах в дальнейшем необходимо уточнить. Вывод о том, что имеются индикаторы как катастрофных, так и докатастрофных процессов, вряд ли будет опровергнут. Как уже отмечалось, главнейшим индикатором взрывных процессов является присутствие углеродистых сферул и аномальных проб как в катастрофном, так и в докатастрофном делювии и аллювии. С геохимической точки зрения, наиболее важным является вывод о преимущественном накоплении в катастрофном слое углеродистых сферул, содержащих Mn, а также Rb, Sr, Ba.

О геохимических индикаторах Тунгусского феномена. Среди изученных нами 20 геохимических параметров 12 оказались индикаторными — это значения двух петрохимических факторов, два отношения петрогенных оксидов, шесть отношений редких элементов и два редкоземельных параметра (табл. 1). Ниже излагаются результаты сравнительного анализа 10 последних индикаторов. Для траппов индикаторными являются Al_2O_3/K_2O и Zn/Pb отношения, характеризующиеся максимальными значениями, и K_2O/Na_2O и Ce/Er отношения, имеющие минимальные величины. «Экзотические» породы выделяются максимальным разбросом значений $100 \times Rb/Sr$ отношения (от 0.6 до 67.8), максимальным Ce/Er отношением в кварцитах, минимальной суммой REE в кремнях при максимальных величинах Eu/Eu^* . Среди рыхлых отложений необходимо отметить делювий (повышенные K_2O/Na_2O и Nb/Ta), катастрофный пролювий (повышенные Nb/Ta , Eu/Eu^* , пониженное Zn/Pb) и дальнепринесной пролювий-аллювий (повышенные Sr/Ba и Eu/Eu^*). По геохимическим индикаторам глины и сферулы Суловской воронки близки к катастрофному пролювию (повышенное Nb/Ta и пониженное Zn/Pb). Все аномальные пробы выделяются пониженным в 2 раза Zr/Hf отношением.

Для наиболее информативных Rb/Sr и Ce/Er параметров построена бинарная диаграмма (рис. 5), из анализа которой следует: а) траппы резко отличаются как от «экзотических» пород, так и от рыхлых отложений и поэтому не могут рассматриваться как источник геохимической специализации двух последних типов пород; б) «экзотические» породы образуют единый ряд от кремней к риолитам и кварцитам. Первые характеризуются минимальными Ce/Er , Rb/Sr отношениями, максимальными величинами Eu/Eu^* и повышенным Nb/Ta отношением. Кварциты с максимальными величинами Ce/Er , Rb/Sr , K_2O/Na_2O , скорее всего, имеют коровое происхождение. Предполагается обнаружение пород, средний состав которых будет близок к делювию сов. 5—8; в) песчаная фракция катастрофно-

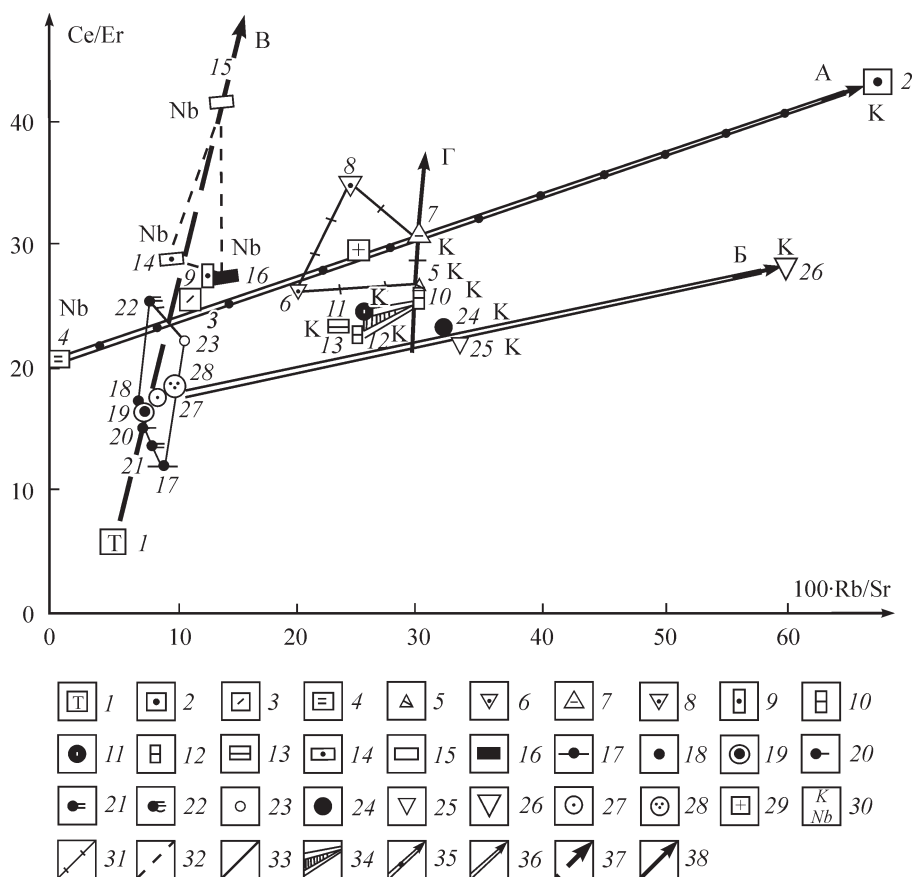


Рис. 5. Графики зависимости индикаторных геохимических отношений Ce/Er и $100 \times Rb/Sr$ в главнейших типах пород (по данным табл. 1).

1—28 — главнейшие типы пород, в соответствии с табл. 1; 29 — предполагаемый состав кислых пород, являющихся основным источником для делювиальных отложений; 30 — совокупности, для которых характерны повышенные значения K_2O/Na_2O (знак К) и Nb/Ta (знак Nb); 31 — совокупности делювиальных отложений; 32 — песчаная фракция катастрофного пролювия; 33 — отложения дальнеприносные (аллювий и конус выноса); 34 — глины и сферулы Суловской воронки; 35 — геохимический тренд «экзотических» пород; 36 — тренд геохимических аномалий; 37 — тренд существенно песчаных образований аллювиального и пролювиального генезиса; 38 — геохимический тренд глинистых фракций делювия.

Fig. 5. Plots of dependency between indicator geochemical ratios Ce/Er and $100 \times Rb/Sr$ in the principal types of rocks (according to data in table 1).

го пролювия с повышенными значениями Nb/Ta образовалась за счет риолитов и пока не обнаруженных пород кислого состава; г) химизм дальнеприносного пролювий-аллювия обусловлен различными пропорциями траппов и риолитов.

На рис. 5 геохимический тренд «экзотических» пород практически полностью повторяется в аномальных пробах по схеме: сов. (27 + 28) → (24 + 25) → 26, т. е. от аллювия к докатастрофным делювиальным суглинкам и сферулам Суловской воронки и далее к катастрофным делювиальным суглинкам (уч. Лабаз) происходит увеличение Rb/Sr . Для выяснения причины резкого обогащения аномальных проб Hf с помощью микрозондового анализа изучен химический состав более 20 зерен циркона из различных типов рыхлых отложений. Установлены стабильные концентрации Hf (0.4—1.6 %) в цирконах и наличие в них многочисленных включений фтор-апатита, пирита и калиевого полевого шпата. Обращают на себя внимание ассоциации элементов, которые в сов. 26 присутствуют в максимальных (+) и минимальных (−) количествах по сравнению с сов. 24, 25, 27, 28. Это (+) PPP, Rb, Mo, Ag, Sn, Fe, W, Rb/Sr, Ce/Er; (−) Be, Se, Sr, Y, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Ta, Sr/Ba.

Криповулканическая модель Тунгусского феномена. В основе нашего подхода к построению модели лежит геологический структурно-вещественный подход. Мы не пытались отрицать су-

существующие гипотезы, а пошли по пути решения лишь одного вопроса: есть ли какие-либо геологические факты, подтверждающие реальность катастрофных процессов, предшествовавших Тунгусскому взрыву 1908 г.? В результате были намечены три стадии развития процесса (валунно-гравийно-песчаная, глиняная и газовая), установлено широкое развитие туффзитов, глиняных и углеродистых сферул. Естественно, встал вопрос, а где же соответствующие им осадочные рыхлые породы? Впоследствии в верховьях р. Чургим был обнаружен катастрофный проловий 1908 г., а отложения в обрыве у кордона Пристань были проинтерпретированы как древний проловиальный конус выноса, образовавшийся в первую стадию криптовулканической деятельности. И, наконец, с целью болеедробного расчленения газовой стадии процесса было изучено Мамонтовое обнажение. В результате этих работ была предложена модель строения и развития криптовулкана. В основе ее лежат следующие данные: 1 — структурно-геологические (приуроченность пород первой стадии криптовулкана к жерловине триасового палеовулкана; образование кольцевой кальдерной структуры и двух новых жерловин во вторую, грязевулканическую стадию; локализация продуктов третьей, газовой стадии на двух участках, в пределах Северного и Южного болота, где широко развиты продукты второй стадии); 2 — вещественные (закономерная смена состава пород от валунно-гравийно-песчаных образований первой стадии к существенно глинистым породам глубинного происхождения и далее к продуктам газовых взрывов и сфералам третьей стадии).

Геологический сценарий Тунгусского феномена. Под Тунгусским феноменом авторы, в отличие от предшественников, понимают всю совокупность геологических процессов позднплейстоцен-голоценового возраста, обусловленных криптовулканической деятельностью. Важным является факт пространственного совмещения древнего Хушминско-Куликовского палеовулкана (250 млн лет) и Куликовско-Верхнехушминского четвертичного криптовулкана. Не менее важным представляется факт обнаружения в непосредственной близости от криптовулкана карбонатитов, по-видимому, слагающих позднемезозойскую кальдеру с поперечником около 10 км. Есть основания полагать, что Тунгусскому феномену предшествовал этап риолитового вулканизма и криптовулканической деятельности мезо-кайнозойского возраста, что фиксируется серией «экзотических» пород (кремни—риолиты—кварциты). Зарождение Тунгусского криптовулкана связано с эпохой межледникового потепления 117—130 тыс. лет назад (Астахов, 2008), когда начались интенсивные восходящие движения в районе Карбонатитового палеовулкана. Это куполообразное вздутие фиксируется второй надпойменной террасой, соответствующей границе среднего и верхнего плейстоцена. По-видимому, в это же время началось внедрение валунно-гравийно-галечного песчаного материала в жерло древнего Куликовского криптовулкана. Механизм внедрения может быть проиллюстрирован современными процессами формирования Патомского кратера (Международная..., 2008). Материал из Куликовского кратера в виде проловиального конуса выноса размером 500 × 400 × 12 м (обн. кордон Пристань) переотлагался в приустьевой части р. Чургим. Заключительные фазы первой стадии развития криптовулкана устанавливаются по осадочным косослоистым пескам, обнажающимся в обрывах у кордона Пристань, и по жерловым фациям голтованных валунных супесей на участке «Камень Джона».

Следующий межледниковый интерстадиал (30—65 тыс. лет назад) ознаменовался мощной тектонической деятельностью и формированием современного облика криптовулкана, изобилующего многочисленными грязевыми вулканами и жерлами с поперечником до 450—700 м (участки Бублик и Северное болото). Продукты глиняного диапиризма второй стадии пользуются исключительно широким развитием, поэтому эту стадию можно считать главной. На фоне затухающей криптовулканической деятельности в период ледникового максимума 30—15 тыс. лет назад в субэкральных условиях могли отлагаться лёссовидные алевропелиты, повсеместно присутствующие в покровном комплексе северного плейстоцена Сибири (Астахов, 2008). С глобальным потеплением 12.9 тыс. лет назад на границе позднего плейстоцена и голоцена связан прорыв газового плюма на дневную поверхность и начало третьей, заключительной стадии развития криптовулкана. Она названа нами газовой стадией. Выделение газообразной субстанции сопровождалось водным диапиризмом, функционированием гейзеров типа Йеллоустоунского парка и слабо проявленными грязевулканическими процессами. После наступившего затем Сарганского похолодания (Макулов и др., 2009) произошел еще один взрыв типа Тунгусского (7000 лет назад), который сопровождался мощным водным диапиризмом, приведшим к частичному размыву верхнеплейстоценового конуса выноса. Третий, не столь мощный взрыв произошел около 2000 лет назад.

Тунгусский взрыв 1908 г. является последним, заключительным аккордом третьей стадии развития криптовулкана. В его интерпретации представляется весьма важным отказать от противопоставления конкурирующих, нередко взаимоисключающих гипотез и идти по пути объединения тех из них, которые наилучшим образом учитывают наблюдаемые факты. Прежде всего необходимо ответить на многие принципиальные вопросы — критерии отличия углеродистых сферул эндогенного и экзогенного или взрывного происхождения; индикаторы грязевулканических и термокарстовых процессов; роль «экзотических» пород при образовании криптовулкана; причина появления геохимической специализации четвертичных отложений на редкоземельные и литофильные элементы; механизм появления аномальных проб рыхлых отложений и ярко выраженной Hf-аномалии. Решение их возможно только путем составления геологической и геохимической карт района Тунгусской катаст-

рофы в масштабе 1 : 50 000. Поэтому на данном этапе исследований авторы не считают возможным формулировать свои представления о Тунгусском взрыве 1908 г., а акцентируют внимание на Тунгусском феномене как геологическом процессе развития плейстоцен-голоценового криптовулкана.

О возможных аналогах Тунгусского феномена. Наилучшее описание криптовулканической кальдеры, затерявшейся на одном из островов Северного Ледовитого океана, выполнено акад. В. А. Обручевым в его романе «Земля Санникова» (1926 г.). Не исключено, что роман был написан под впечатлением той информации, которую автор получил от С. В. Обручева, посетившего район Тунгусской катастрофы в 1924 г. Авторами статьи в течение ряда лет изучались голоценовые тектилоподобные стекла (волховиты) в Ленинградской области, ассоциирующие с ними шлаки, высокоуглеродистые волосовидные образования, газотутные и водородные аномалии как индикаторы глубинных зон голоценовой дегазации Земли (Скублов и др., 2007а, б, 2008, 2009). И хотя Киришская структура до конца не изучена, имеющиеся данные свидетельствуют о сходстве микроэлементного состава волховитов и рыхлых отложений района Тунгусской катастрофы и о глобальном характере изучаемых процессов, связанных с глубинными зонами Земли.

Следует упомянуть и о Соловецкой криптовулканической кальдере в Белом море, которую Г. Т. Скублов изучал в 2007 г. Там на докембрийском складчатом основании залегает мощная толща четвертичных валунов, прорываемых и перекрытых пачкой желтовато-серых лёссовидных песков (археологи датируют их неолитом). Они в свою очередь секутся кольцевыми глиняными жилами, диапировыми некками (Варваринское озеро), питающими вязкой жирной глиной небольшие морские лагуны, в которых нередко наблюдаются типичные зыбучие пески. Поперечник кальдеры более 18 км. В центре ее — устойчивый водный диапир высотой до 60 м, который трассируется серией сообщающихся озер. Следующий пример — Йеллоустонский национальный парк (США), где на площади в несколько сотен квадратных километров среди скальных пород наблюдаются современные действующие водные диапиры с многочисленными гейзерами, грязевые вулканы, травертиновые террасы и др. Общеизвестной является связь развитых здесь криптовулканических процессов с мантийным плюмом. Среди взрывных структур, близких к Тунгусскому событию 1908 г., необходимо упомянуть Сасовский взрыв 2002 г., связанный с процессами глубинной дегазации Земли (Маркушев, 1999; Черняев, 1999; Грошев, 2002; Ларин, 2005).

Некоторые следствия. Рассмотрим кратко проблему возможной связи Тунгусского феномена с россыпной алмазностью Сибирской платформы. Известно (Граханов и др., 2007), что более половины разведанных запасов алмазов сосредоточено в бассейне р. Эбелях (Олейников и др., 2007), где пока не найдены коренные источники. Около четверти запасов — в Среднемархинском и Малоботобинском районах, где россыпи ассоциируются с известными кимберлитовыми трубками. В Красноярском крае промышленных россыпей алмазов нет, однако некоторые геологи не исключают промышленной значимости Тычанской россыпи (Фролов и др., 2005), расположенной в 100 км к северо-западу от Тунгусского криптовулкана. В качестве перспективных рассматриваются алмазные участки, расположенные в 20—40 км к северо-западу и северо-востоку от эпицентра Тунгусского взрыва; на последнем из них обнаружен крупный алмаз в глиняной рубашке, что свидетельствует о близости коренного источника. На участке Северное болото, где нами предполагается жерло Куликовского криптовулкана, найден графит-алмаз-лонсдейлитовый сросток (Квасница и др., 1979; Соболев и др., 1980), в котором содержания REE (Соболев и др., 1985) почти полностью совпадают с полученными нами (табл. 1). Косвенным указанием на возможность обнаружения здесь микроалмазов могут служить находки муассанита и фаз SiC_2 — SiC_{20} в углеродистых сферулах. Внимания заслуживают «экзотические» породы из эпицентра Тунгусской катастрофы, по-видимому, связанные с глубинными процессами криптовулканической деятельности. Им, судя по описаниям С. А. Граханова и соавторов (2007), полностью идентичны «экзотические» породы (кремни, кварциты, роговики, риолиты, реже яшмы, граниты и др.) четвертичных россыпей Эбеляхского района, где «экзотика» составляет 5—25 % от объема обломочного материала, и Малоботобинского района, где объем «экзотики» в террасовой россыпи «Горная» достигает 77—90 %, плотиковый «аллювий» представлен галечно-щебнистым материалом с глинистым заполнителем, а в минеральном составе тяжелой фракции преобладают ильменит, пирит, барит (4 %!). Эти данные свидетельствуют о том, что лампроитовая модель россыпного алмазообразования в Сибири (Епифанов, Родин, 1991) заслуживает большего внимания. Не исключено, что Куликовский криптовулкан фиксирует находящийся на глубине алмазоносный голоценовый лампроитовый вулкан. Заметим, что близкий по возрасту (50 тыс. лет) лампроитовый вулкан Гауссберг находится в Антарктиде (Erlach, Hausel, 2002).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулируем основные результаты проведенных исследований.

1. Намечены основные положения нового подхода к решению проблемы Тунгусской катастрофы 1908 г., базирующегося на минералого-геохимическом изучении коренных и особенно рыхлых отложений района, использовании современных аналитических методов, статистической обработки данных и материалов космической фотосъемки.

2. Установлено широкое развитие углеродистых сферул, связанных как с катастрофными, так и докатастрофными процессами. В глинах Суловской воронки найдены многочисленные (около 2 млн шт./кг) углеродисто-глинистые сферулы и определен их возраст (15 900 лет). Обнаружены катастрофо-пролювиальные и древние пролювиальные отложения конуса выноса, выделена группа «экзотических» пород глубинного происхождения.

3. Впервые дана геохимическая характеристика всех типов изучаемых пород (табл. 1), выявлена редкоземельно-литофильная специализация рыхлых отложений. Обращено внимание на резкие отличия делювиальных и катастрофо-пролювиальных отложений ближнего сноса от пролювиально-аллювиальных отложений дальнего привноса. Выделена группа аномальных проб, обогащенных всеми редкими элементами и особенно Hf. Доказано слабое влияние состава траппов на микроэлементный состав рыхлых отложений.

4. Высказаны предположения о том, что: а) углеродистые сферулы являются полигенными образованиями (эндогенные и взрывные процессы); б) глины Суловской воронки имеют эндогенное происхождение, а формирование углеродисто-глинистых сферул связано с процессами кавитации; в) рыхлые отложения имеют сложный генезис, причем при образовании делювия существенную роль играли эндогенные процессы, а при отложении аллювия — экзогенные; г) среди многочисленных индикаторов катастрофных процессов наиболее информативными являются Ce/Eg и Rb/Sr отношения.

5. Предложена криптовулканическая модель Тунгусского феномена как верхнеплейстоцен-голоценового геологического процесса с возрастом более 100 000 лет, включающего в себя три стадии: 1) начальную — образование нека горы Стойкович и отложение пород конуса выноса; 2) главную — грязевулканическая деятельность, образование двух новых жерловин (участки Северное Болото, Бублик) и многочисленных воронок типа Суловской; 3) заключительную — многократные взрывы газообразных смесей, начиная с наиболее мощного 12 900 лет назад и заканчивая Тунгусским взрывом 1908 г.

6. Показано, что на Земле имеются аналоги Тунгусского феномена, среди которых наибольший интерес представляют Киришская структура и волховиты криптомагматического генезиса. Не исключено, что при образовании якутских алмазных россыпей имели место криптовулканические процессы и что в пределах Тунгусского криптовулкана могут быть обнаружены проявления алмазной минерализации.

Авторы выражают искреннюю благодарность В. А. Бидюковой за помощь при отборе проб, Г. А. Олейниковой, способствовавшей проведению аналитических работ, И. М. Гембицкой за участие в микрондовых исследованиях, В. И. Астахову за консультацию по четвертичной геологии, Н. В. Скубловой за помощь при дешифрировании космических снимков, Д. Г. Скублову за большой вклад в решение компьютерных задач, Х. Д. Истое за определение возраста сферул Суловской воронки.

Список литературы

- Астахов В. И.* Начала четвертичной геологии. СПб.: Изд-во СПбГУ, **2008**. 224 с.
- Белонин М. Д., Голубева В. А., Скублов Г. Т.* Факторный анализ в геологии. М.: Недра, **1982**. 269 с.
- Боровиков В.* Statistica. Искусство анализа данных на компьютере. СПб., **2003**. 688 с.
- Васильев Н. В.* История изучения проблемы Тунгусского метеорита в послевоенные годы (1958—1969) / Метеоритные исследования в Сибири. Новосибирск: Наука, **1984**. С. 3—22.
- Васильев Н. В.* История изучения проблемы Тунгусского метеорита (1970—1980 гг.) / Космическое вещество и Земля. Новосибирск: Наука, **1986**. С. 3—34.
- Васильев Н. В.* История изучения проблемы Тунгусского метеорита (1980—1985 гг.) / Актуальные вопросы метеоритики в Сибири. Новосибирск: Наука, **1988**. С. 3—31.
- Васильев Н. В.* Тунгусский метеорит. Космический феномен лета 1908 г. М.: Русская панорама, **2004**. 372 с.
- Войцеховский А. И., Ромейко В. А.* Тунгусский метеорит. 100 лет великой загадке. М.: Вече, **2008**. 432 с.
- Граханов С. А., Шаталов В. И., Штыров В. А. и др.* Россыпи алмазов России. Новосибирск: Гео, **2007**. 457 с.
- Грошев В. Л.* От гравитации — через ядрон, Тунгусский феномен, Чернобыль и Сасово — до литосферных катастроф. СПб.: Сударья, **2002**. 222 с.
- Дмитриев Е. В.* Тектиты, субтектиты, стримергласы и Тунгусский метеорит // Природа. **2001**. № 1. С. 31—32.
- Епифанов В. А., Родин Р. С.* Геологические предпосылки альтернативного механизма алмазообразования на Сибирской платформе / Рудоносность магматических формаций Сибири. Новосибирск: СНИИГИМС, **1991**. С. 119—128.

- Квасница В. Н., Соботович Э. В., Ковалюх Н. Н. и др.* Высокобарические полиморфы углерода в торфах района Тунгусской катастрофы // Докл. АН УССР. Серия Б. **1979**. № 12. С. 1000—1004.
- Котков В. Н., Завацкая Р. М., Глушков В. М. и др.* Государственная геологическая карта СССР, масштаб 1 : 200 000, Тунгусская серия, Р-47-XXX. Всероссийская геологическая библиотека, **1977**.
- Ларин В. Н.* Наша Земля (происхождение, состав, строение и развитие изначально гидридной Земли). М.: Агар, **2005**. 248 с.
- Лысюк А. Ю., Юргенсон Г. А., Юшкин Н. П.* Новый тип геологических объектов — фитофульгуриты // Докл. РАН. **2006**. Т. 411. № 4. С. 1—5.
- Максимов А. Б.* Никола Тесла и загадка Тунгусского метеорита. М.: Яуза, **2009**. 288 с.
- Макулов В. И., Дроздов Н. И., Привалихин В. И. и др.* Археологические памятники долины р. Подкаменная Тунгуска на территории государственного природного заповедника «Тунгусский» // Труды Тунгусского заповедника. **2009**. Вып. 2.
- Маракушев А. А.* Происхождение Земли и природа ее эндогенной активности. М.: Наука, **1999**. 255 с.
- Международная конференция «100 лет Тунгусскому феномену: прошлое, настоящее, будущее».* М., **2008**. 238 с.
- Мульдьяров Е. Я., Сальникова Г. А.* О природе темных шариков из района Тунгусской катастрофы / Чтения памяти Ю. А. Львова. Томск: Изд-во Томского ун-та, **1995**. С. 182—191.
- Новгородова М. И., Гамянин Г. Н., Жданов Ю. Я. и др.* Микросферы алумосиликатных стекол в золотых рудах // Геохимия. **2003**. № 1. С. 83—93.
- Олейников О. Б., Павлушин А. Д., Попов А. В.* Постгенетические минералы и микростекла кристалла алмаза V разновидности из россыпного месторождения Холомолах и их генезис // Отечественная геология. **2007**. № 5. С. 77—83.
- Ольховатов А. Ю.* Тунгусский феномен 1908 года. М.: БИНОМ, **2008**. 422 с.
- Ольховатов А. Ю., Родионов Б. У.* Тунгусское сияние. М.: Лаборатория базовых знаний, **1999**. 240 с.
- Ромейко В. А.* Огненная слеза Фазтона. Эхо далекой Тунгуски. М.: Вече, **2006**. 480 с.
- Сапронов Н. Л.* Древние вулканические структуры на юге Тунгусской синеклизы. Новосибирск: Наука, **1986**. 104 с.
- Сапронов Н. Л., Вальчак В. И.* Хушминский палеовулканический комплекс; геология и базовая минерализация // Труды ГПЗ «Тунгусский». **2003**. Вып. 1. С. 96—101.
- Скублов Г. Т., Марин Ю. Б., Семиколенных В. М., Скублов С. Г., Тарасенко Ю. Н.* Волховиты — новый тип тектитоподобных стекол // ЗРМО. **2007**. № 1. С. 50—68.
- Скублов Г. Т., Марин Ю. Б., Скублов С. Г., Тарасенко Ю. Н.* О геохимических типах волховитов и возможной алмазоносности ареалов распространения голоценовых флюидизитов // ЗРМО. **2007**. № 5. С. 22—44.
- Скублов Г. Т., Марин Ю. Б., Скублов С. Г., Васильев Е. В., Гембицкая И. М., Нечаева Е. С., Тарасенко Ю. Н.* Киришиты — волосовидные высокоуглеродистые образования, ассоциирующие с волховитами // ЗРМО. **2009**. № 1. С. 20—35.
- Скублов С. Г., Марин Ю. Б., Скублов Г. Т., Ванштейн Б. Г., Гембицкая И. М., Ларин Н. В., Тарасенко Ю. Н.* Волховиты, углеродистые флюидизиты, газортутные и водородные аномалии — индикаторы глубинных зон голоценовой дегазации Земли (на примере Киришской структуры) / Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезисы. Материалы Всероссийской конференции, 22—25 апреля 2008 г. М.: ГЕОС, **2008**. С. 459—462.
- Соботович Э. В., Квасница В. Н., Ковалюх Н. Н. и др.* Радиоуглеродные и минералогические свидетельства вещественности Тунгусского тела // Минер. журн. **1980**. Т. 2. № 1. С. 28—32.
- Соботович Э. В., Пивень П. И., Колесов Г. М. и др.* Распространенность некоторых элементов в алмаз-графитовом сростке и других объектах из эпицентра Тунгусской катастрофы // Метеоритика. **1985**. Вып. 44. С. 135—138.
- Сто лет Тунгусской проблеме.* М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, **2008**. 447 с.
- Фролов А. А., Лапин А. В., Толстов А. В. и др.* Карбонатиты и кимберлиты (взаимоотношения, минералогия, прогноз). М.: НИИ-Природа, **2005**. 540 с.
- Черняев А. Ф.* Камни падают в небо или вещественный эфир и антигравитация (Тунгусский феномен, Бермудский треугольник, Сасово). М.: Белые альфы, **1999**. 224 с.
- Erlich E. I., Hausel W. D.* Diamond Deposits: origin, exploration and history of discovery. Littleton, **2002**. 374 p.
- Firestone R. B., West A., Kennet J. R. et al.* Evidence for an extraterrestrial impact 12 900 years ago that contributed to the megafaunal extinctions and the Younger Dryas cooling // PNAS. October. 9. **2007**. Vol. 104. N 41. P. 16 016—16 121.
- Turco R. P., Toon O. B., Parc C. et al.* An analysis of the physical, chemical, optical and historical data on impact of the 1908 Tunguska meteor fall // Icarus. **1982**. Vol. 50. N 1. P. 1—52.

Поступила в редакцию
30 июня 2009 г.