

## Кальдера Узон и Долина Гейзеров

В.Л. Леонов  
Е.Н. Гриб  
Г.А. Карпов  
В.М. Сугробов  
Н.Г. Сугрובה  
М.И. Зубин

Синоним: Горящий Дол.

**Местоположение.** Координаты западного гребня кальдеры Узон: 54°32' с.ш., 160°05' в.д.

**Геологическое положение.** Кальдера Узон и Долина Гейзеров приурочены к Узон-Гейзерной вулканогенно-осадочной депрессии, расположенной в центральном участке Восточного вулканического пояса Камчатки.

**Геология фундамента.** Фундамент кальдеры Узон и Долины Гейзеров составляет комплекс вулканогенно-осадочных отложений и вулканических образований, датируемых ранним плиоценом (щипинская свита) и поздним плиоценом—эоплейстоценом (сторожевская свита).

**Морфология и строение.** Кальдера Узон и Долина Гейзеров приурочены к разным концам вытянутой в СЗ направлении Узон-Гейзерной вулканогенно-осадочной депрессии (рис. 46). Кальдера Узон является ее крайней западной частью. Она имеет размеры 9×12 км, плоское дно. С юга, запада и севера она обрамлена крутыми уступами высотой от 200—300 до 800 м (рис. 47, 48). С внешней стороны уступы переходят в слабонаклоненные плато. Высшая точка борта кальдеры (Бараний пик) находится на высоте 1617 м над уровнем моря, дно кальдеры — на высоте 700 м. Кальдеру заполняют многочисленные озера, речки и ручейки, составляющие истоки р. Шумной, впадающей в океан. Долина Гейзеров соответствует восточному борту депрессии. Она представляет собой крутостенный каньон длиной около 4 км.

В строении района выделяются три комплекса пород: докальдерный, синхронный кальдерообразованию и посткальдерный. Фрагменты построек, составляющих первый комплекс, в настоящее время вскрываются по бортам Узон-Гейзерной депрессии. Они свидетельствуют о том, что на месте депрессии существовала группа вулканов, имеющих состав лав и пирокластиков до базальтов до риолито-дацитов [Леонов, 1982].

Таблица 13

Средний химический состав пород кальдеры Узон, % массы

Оксиды	Комплекс										
	Докальдерный					Кальдерообразующий			Посткальдерный		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO <sub>2</sub>	50,64	52,16	51,85	56,60	67,86	61,26	64,55	67,28	72,00	64,79	56,36
TiO <sub>2</sub>	1,16	1,06	1,11	1,15	0,90	1,36	1,07	0,86	0,52	0,88	1,35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,96	16,37	19,53	17,57	13,93	15,78	15,08	13,50	13,13	15,41	15,76
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,92	4,86	4,02	0,62	2,68	2,58	2,36	2,36	1,20	1,15	3,10
FeO	4,05	4,85	5,41	8,21	1,60	3,90	3,06	2,71	2,30	3,77	8,00
MnO	0,24	0,45	0,20	0,17	0,11	0,20	0,19	0,22	0,17	0,15	0,12
MgO	4,12	4,24	3,40	3,41	1,34	2,15	1,28	1,18	0,15	1,35	2,82
CaO	10,01	9,66	9,41	6,97	3,47	5,56	4,22	3,70	2,26	4,47	6,87
Na <sub>2</sub> O	3,22	3,44	3,16	3,52	4,46	4,59	4,17	4,92	4,54	4,52	3,80
K <sub>2</sub> O	0,67	0,84	0,81	1,14	2,58	1,74	2,04	2,12	3,48	2,03	1,37
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0,06	0,40	0,13	0,19	0,36	0,52	0,02	0,12	0,24	1,10	0,30
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	1,12	0,50	0,65	0,05	0,29	0,27	1,07	0,43	0,28	0,30	0,14
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,46	0,30	0,24	0,29	0,08	0,30	0,36	0,36	0,10	0,22	—
Сумма	99,63	99,13	99,92	99,89	99,66	100,20	99,47	100,54	100,37	100,14	100,14

Примечание. 1 — базальты западного борта кальдеры (3 ан.); 2 — базальты северного борта (3 ан.); 3 — базальты вулкана Узон (4 ан.); 4 — андезиты юго-западного борта (2 ан.); 5 — дациты северо-восточного борта; 6 — игнимбриты пирокластического потока к северу от кальдеры (3 ан.); 7 — иг-

непосредственно перед формированием депрессии произошли выбросы туфов и игнимбритообразующего материала, а также внедрение экструзивных куполов — главной кальдерообразующей фазы вулканизма. Эти породы слагают разрезы бортов Узон-Гейзерной депрессии (рис. 49), а за пределами депрессии образуют два обширных поля, примыкающих к депрессии с севера и юго-запада. Поля в плане имеют овальную форму, достигая 30—40 км по длинной оси. Видимая мощность слоев игнимбритов в пределах этих полей колеблется от 1—2 до 10—15 м. В разрезе игнимбритов обычно выделяются 2—3 толщи небольшой мощности, разделенные горизонтами неспескшихся пирокластических отложений. Игнимбритовые покровы имеют углы падения 3—7°, причем направление падения обращено периклинально от Узон-Гейзерной депрессии.

Далее, в основном внутри депрессии, залегают отложения посткальдерного комплекса. В нем выделяются кислые экструзии и пемзовые куполы посткальдерной фазы вулканизма, взрывные отложения, базальты, связанные с мааром оз. Дальнего и многофазные озерные и озерно-пирокластические отложения (рис. 50). При этом главную массу среди пород посткальдерного комплекса составляют озерные осадки. Маар оз. Дальнего расположен в северо-восточной части кальдеры Узон (см. рис. 41, 48). Вокруг маара диаметром около 1 км располагается кольцевой вал высотой 60 м и шириной 0,5—0,7 км, образованный 7,5 тыс. лет назад преимущественно шлаками, бомбами, лапиллями и глыбами лавы андезито-базальтового состава.

Юго-западную часть кальдеры Узон занимает обширное поле моренных отложений второй фазы верхнеплейстоценового оледенения. Вал конечной морены пересекает кальдеру в центре с северо-запада на юго-восток. Высота вала составляет 20—40 м. Морены перекрывают большую часть разреза озерных отложений.

**Возраст и история развития.** В докальдерный период одно-

нимбриты северного борта кальдеры; 8 — игнимбриты плато Широкого; 9 — риолиты экструзии Озерной, первый цикл кислого вулканизма (5 ан.); 10 — дациты экструзии Белой, второй цикл кислого вулканизма (7 ан.); 11 — андезито-базальты маара, оз. Дальнее. В скобках — количество анализов.

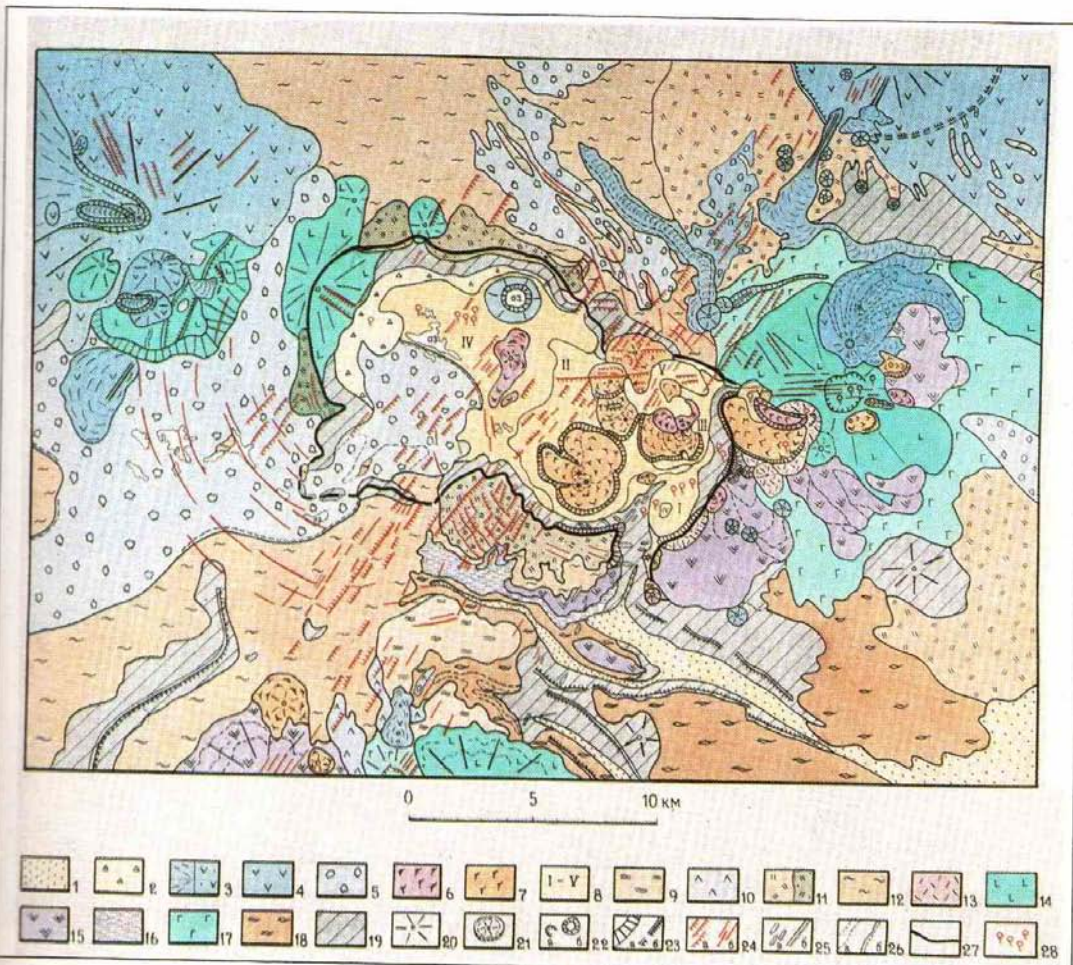


Рис. 46. Схематическая геологическая карта района Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии

Голоцен: 1 — аллювиальные отложения (Q<sub>1</sub>); 2 — обально-осыпные отложения (Q<sub>2</sub>); 3 — лаво-пирокластический комплекс вулкана Таушниц; а — отложения направленного взрыва, б — отложения основной постройки (Q<sub>3</sub>); 4 — лавы и шлаки базальтового, андезитового, дацитового состава (Q<sub>4</sub>). Верхний плейстоцен: 5 — морены второй фазы верхнеледникового оледенения (Q<sub>5</sub>); 6, 7 — лавы дацитового, риолитового состава (соответственно третьей и второй циклы) (Q<sub>6</sub><sup>1</sup>); 8 — озерные отложения, пачки: I — гейзерная, II — пемзовая, III — желтых скал, IV — второго озера и южной котловины, V — колорадо (Q<sub>7</sub><sup>1</sup>); 9 — "верхние" игнимбриды массива Большой Семыччик (Q<sub>8</sub><sup>1</sup>); 10 — межигнимбритовые андезиты массива Большой Семыччик (Q<sub>9</sub><sup>1</sup>); 11 — лавоземные пирокластические отложения, связанные с образованием кальдеры Крашенинникова (а) и Узон-Гейзерной депрессии (б) (Q<sub>10</sub><sup>1</sup>); 12 — игнимбриды, связанные с образованием Узон-Гейзерной депрессии (Q<sub>11</sub><sup>1</sup>); 13 — лавы андезитового, дацитового и риолитового состава (первый цикл) (Q<sub>12</sub><sup>1</sup>); 14 — лавы и туфы базальтового, андезито-базальтового и андезитового состава (Q<sub>13</sub><sup>1</sup>); 15 — туфы базальтового, андезито-дацитового и дацитового состава (Q<sub>14</sub><sup>1</sup>); 16 — озерные отложения (Q<sub>15</sub><sup>1</sup>); 17 — лавы базальтового состава (Q<sub>16</sub><sup>1</sup>). Средний плейстоцен: 18 — игнимбриды, связанные с образованием кальдеры Большого Семыччика (Q<sub>17</sub><sup>1</sup>); 19 — докальдерный комплекс — лавы и туфы базальтового, андезитового, дацитового и риолитового состава (Q<sub>18</sub><sup>1</sup>); 20 — центры крупных вулканических построек, стратовулканы; 21 — экструзии и их лавовые потоки; 22 — кратеры (а) и маары (б) и трещины (б); 25 — дайки (а) и цепочки воронок трещинных извержений (б); 26 — границы отдельных слоев и потоков внутри выделенных стратиграфических единиц (а); краевые морены (б); 27 — эрозионные границы Узон-Гейзерной депрессии; 28 — термопровавления

Fig. 46. Schematic geologic map of the region around Uzon-Geysir volcano-tectonic depression

Holocene: 1 — alluvial strata (Q<sub>1</sub>); 2 — talus (Q<sub>2</sub>); 3 — Taushits volcano lava-pyroclastic complex: a — directed blast strata, b — deposits of the main structure (Q<sub>3</sub>); 4 — basaltic, andesitic and dacitic lavas and cinders. Upper Pleistocene: 5 — moraines of the second phase of the Upper Pleistocene glaciation (Q<sub>5</sub><sup>1</sup>); 6, 7 — dacitic and rhyolitic lavas (the third and second cycles respectively) (Q<sub>6</sub><sup>1</sup>); 8 — lacustrine deposits, members: I — geyser, II — pumice, III — of yellow cliffs, IV — of the second lake and the southern pumice pyroclastic strata associated with the formation of Krashennikov caldera (a) and Uzon-Geysir depression (b) (Q<sub>7</sub><sup>1</sup>); 9 — ignimbrites associated with the formation of the Uzon-Geysir depression (Q<sub>8</sub><sup>1</sup>); 10 — andesitic, rhyolitic and dacitic lavas (first cycle) (Q<sub>9</sub><sup>1</sup>); 11 — basaltic, andesite-dacitic and dacitic lavas and tufts (Q<sub>10</sub><sup>1</sup>); 12 — andesitic, andesite-dacitic and dacitic lavas (Q<sub>11</sub><sup>1</sup>); 13 — basaltic lavas (Q<sub>12</sub><sup>1</sup>); 14 — basaltic, andesite-dacitic and dacitic lavas (Q<sub>13</sub><sup>1</sup>); 15 — andesitic, andesite-dacitic and dacitic lavas (Q<sub>14</sub><sup>1</sup>); 16 — lacustrine strata (Q<sub>15</sub><sup>1</sup>); 17 — basaltic lavas (Q<sub>16</sub><sup>1</sup>). Middle Pleistocene: 18 — ignimbrites associated with the formation of Bolshoi Semyachik caldera (Q<sub>17</sub><sup>1</sup>); 19 — precaldera complex — basaltic, andesitic, dacitic and rhyolitic lavas and tufts (Q<sub>18</sub><sup>1</sup>); 20 — centres of large volcanic structures, stratovolcanoes; 21 — extrusions and associated lava flows; 22 — craters (a) and maars (b); 23 — erosional scarps, limiting tuya formations on southern slopes of Taushits volcano (a), large calderas and river valleys (b); 24 — normal faults (a) and fissures (b); 25 — dykes (a) and chains of fissure eruptions craters (b); 26 — boundaries of separate layers and flows inside the distinguished stratigraphic units (a), and moraines (b); 27 — erosional limits of the Uzon-Geysir depression; 28 — thermal manifestations

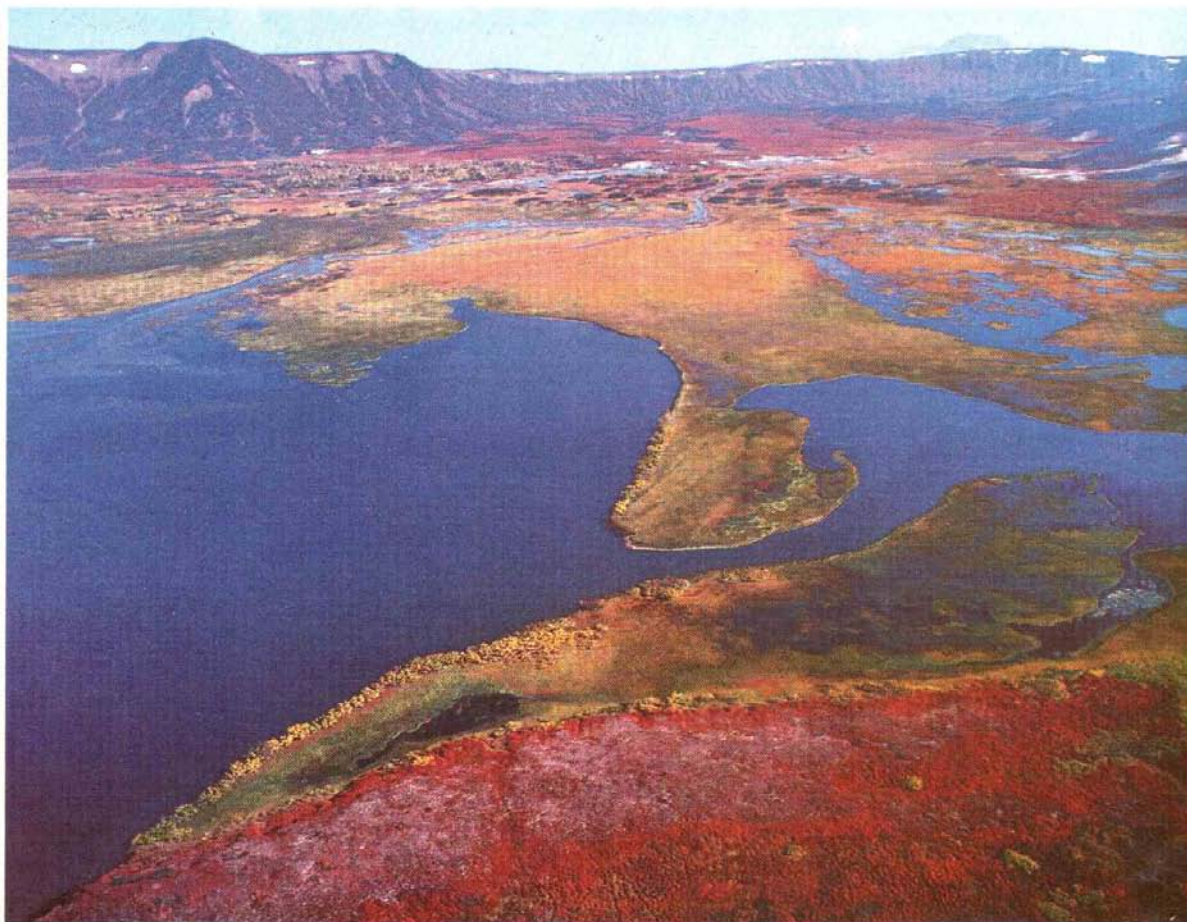


Рис. 47. Общий вид центральной части кальдеры Узон. На переднем плане оз. Центральное и истоки р. Шумной. Вдали борт кальдеры. Фото В.Е. Гиппенрейтера

Fig. 47. General view of the central part of Uzon caldera. At the foreground there are: Taentrainoye Lake and the head of the Shuminaya river. The rim of caldera is seen at the background. Photo by V.Ye. Gippenreiter

временно происходили извержения основных и кислых вулканов. На этих породах залегают игнимбриты и туфы, связанные с образованием кальдеры Большого Семьяка. Они датируются средним плейстоценом и характеризуются отрицательной намагниченностью, что позволяет оценивать их возраст приблизительно в 110 тыс. лет. Формирование кальдеры Узон произошло около 40 тыс. лет назад [Флоренский, 1984]. В последующей истории ее развития можно выделить три этапа (цикла) активности [Белоусов и др., 1983]. В ходе каждого этапа выделяется эксплозивная стадия, связанная с извержением пирокластического материала, и экструзивно-эффузивная, при которой наблюдается последовательное поступление на поверхность лав, изменяющихся по составу от андезитов до риолитов.

К началу второй фазы верхнелейстоценового оледенения (около 20 тыс. лет назад) кислый вулканизм в пределах Узон-Гейзерной депрессии почти завершился, что было связано, по-видимому, с закристаллизацией значительной части верхнекорового магматического очага.

**Описание извержений.** В историческое время в районе Узон-Гейзерной депрессии происходили только фреатические извержения, образовавшие все термальные озера и грифоны крупных термальных источников в кальдере Узон. 4 сентября 1986 г. такое извержение произошло на западе Восточного термального поля. В течение нескольких секунд в процессе дваактного взрыва здесь было выброшено около 2000 м<sup>3</sup> газопаровой смеси и 3 т каменного материала. Глыбы гравелитов, сцементированных сульфидами железа, весом до 20 кг были отброшены в юго-западном направлении на расстояние до 30 м. Возникла воронка диаметром около 1,5 м, которая в течение суток расширилась до 14 м при глубине 10,5 м. На дне температура достигала 114°С.

**Продукты извержений.** Лавы относятся к известково-щелочному типу и отличаются широким спектром пород — от базальтов до риолитов (табл. 13). Перед образованием кальдеры преобладали базальты, а кислые лавы образовали небольшой вулканический аппарат в северо-восточном борту кальдеры. При кальдерообразовании произошел выброс боль-

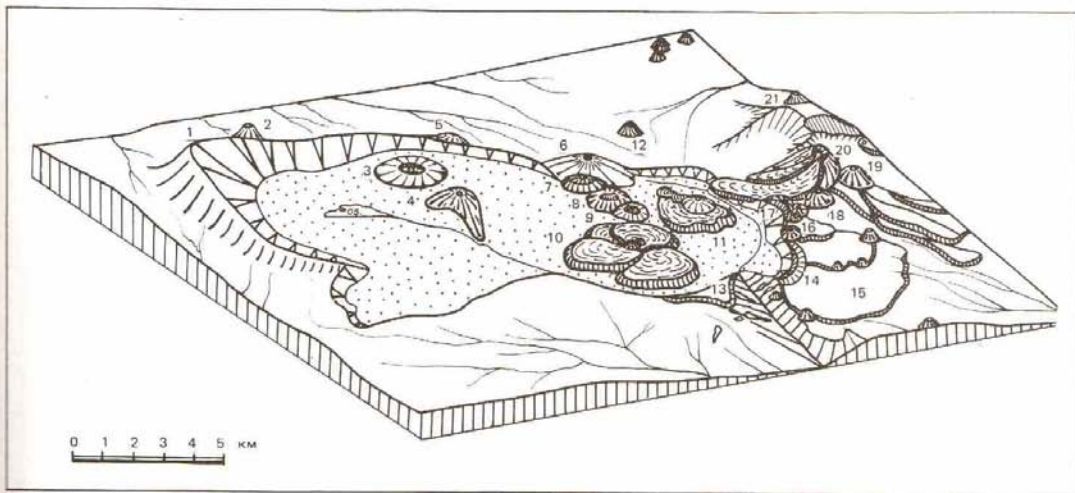


Рис. 48. Блок-диаграмма Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии  
 1 — сопка Узон; 2 — сопка Красная; 3 — maar оз. Дальнего; 4 — экструзивный купол сопки Белой; 5 — экструзивный купол сопки Озерной; 6 — пемзовый купол сопки Открытой; экструзивные куполы: 7 — Тортик; 8 — останец; 9 — Сестренка; 10 — плато Круглое; 11 — Гейзерная; 12 — шлаковый конус Дуга; 13 — плато Широкое; 14 — экструзивный купол Гребень; 15 — Горное плато; экструзивные куполы: 16 — Рудич; 17 — Бортовая; 18 — Первая; 19 — сопка Безымянная; 20 — экструзивный купол сопки Желтой; 21 — конус Савича. Точками показаны озерные и флювиогляциальные отложения, заполняющие Узон-Гейзерную вулканотектоническую депрессию

Fig. 48. Block chart of the Uzon-Geysir volcano-tectonic depression  
 1 — Uzon sopka; 2 — Krasnaya sopka; 3 — maar of Dalneye lake; 4 — extrusive dome of Belaya sopka; 5 — extrusive dome of Ozerneya sopka; 6 — pumice dome of Otkrytaya sopka; extrusive domes: 7 — Tortik; 8 — Ostanets; 9 — Sestrenka; 10 — Krugloye plateau; 11 — Geysernaya; 12 — Duga cinder cone; 13 — Shirokoye plateau; 14 — Greben extrusive dome; 15 — Gornoye plateau; extrusive domes: 16 — Rudich; 17 — Bortovaya; 18 — Pervaya; 19 — Bezymiannaya sopka; 20 — extrusive dome of Zheltaya sopka; 21 — Savich cone. The dots show lacustrine and fluvio-glacial strata filling the Uzon-Geysir volcano-tectonic depression

шого объема пирокластического материала (игнимбритов), по составу относящегося к андезитам (к северу от кальдеры) и дацитам (плато Широкое). Посткальдерные извержения, происходившие циклически, представлены лавами от андезитов до риолитов; выделяется непрерывная, базальт-андезит-дацит-риолитовая серия.

Подавляющее большинство пород относится к порфировым, количество вкрапленников варьирует от 30–35% в базальтах, до 4–18% в риолитах; андезиты и дациты посткальдерного этапа отличаются высокой степенью кристалличности — 25–30% от объема породы. Главной минеральной фазой является плагиоклаз.

В базальтах докальдерного комплекса темные минералы-вкрапленники представлены клинопироксеном дионсид-авгитового ряда ( $m$  20–26%) и оливином переменной железистости ( $m$  20–50%). Плагиоклаз вкрапленников в базальтах отличается высокой кальциевостью. Состав его варьирует от анорита до лабрадора.

Андезиты, дациты, риолиты характеризуются одинаковой ассоциацией минералов-вкрапленников плагиоклаз, орто- и клинопироксен, титаномагнетит. Изредка в андезитах и дацитах встречается оливин в виде обособленных зерен в "рубашке" из базальтового стекла. В некоторых риолитах присутствует роговая обманка.

Плагиоклаз вкрапленников в кислых лавах образует довольно широкий спектр составов от битовнита до олигоклаза.

Клинопироксен представлен высококальциевым авгитом, реже — дионсид-авгитом ( $m$  26–36%), в андезитах и дацитах он преобладает среди темноцветных минералов. Ортопироксен-гиперстен ( $m$  30–38%) развит как во вкрапленниках, так и в основной массе, где его железистость значительно возрастает ( $m$  40–44%). Роговая обманка представлена обыкновенной магнетитово-железистой разновидностью с повышенным содержанием натрия (1,7–3,8%) и титана (1,2–1,8%).

Для продуктов кислого кальдерного вулканизма характерны гранитоидные включения. Особенно много их в пемзово-широкопластических отложениях плато Широкого. Состав включений колеблется от диоритов до гранитов [Вулканизм..., 1974], они несут следы явного плавления. В кислых лавах встречаются

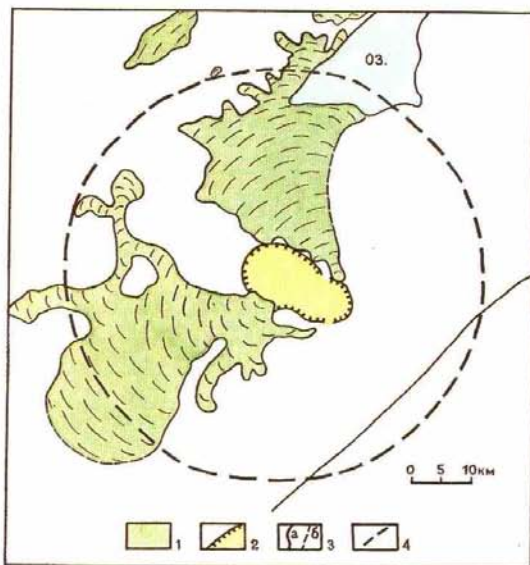


Рис. 49. Схема распространения игнимбритов, связанных с Узон-Гейзерной депрессией  
 1 — поля развития игнимбритов, связанных с Узон-Гейзерной депрессией (Q); 2 — эрозионные границы Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии, заполненной озерными отложениями (желтое); 3 — границы полей игнимбритов; а — установленные, б — предполагаемые; 4 — границы предполагаемой Узонской купольно-кольцевой структуры [Масуренков, 1980]

Fig. 49. Scheme showing distribution of ignimbrites associated with the Uzon-Geysir depression  
 1 — ignimbrite fields associated with the Uzon-Geysir depression (Q); 2 — erosional boundaries of the Uzon-Geysir volcano-tectonic depression filled in with lacustrine strata (yellow); 3 — ignimbrite fields limits: a — fixed, b — inferred; 4 — boundaries of the conjectured Uzon dome-ring structure [Masurenkov, 1980]

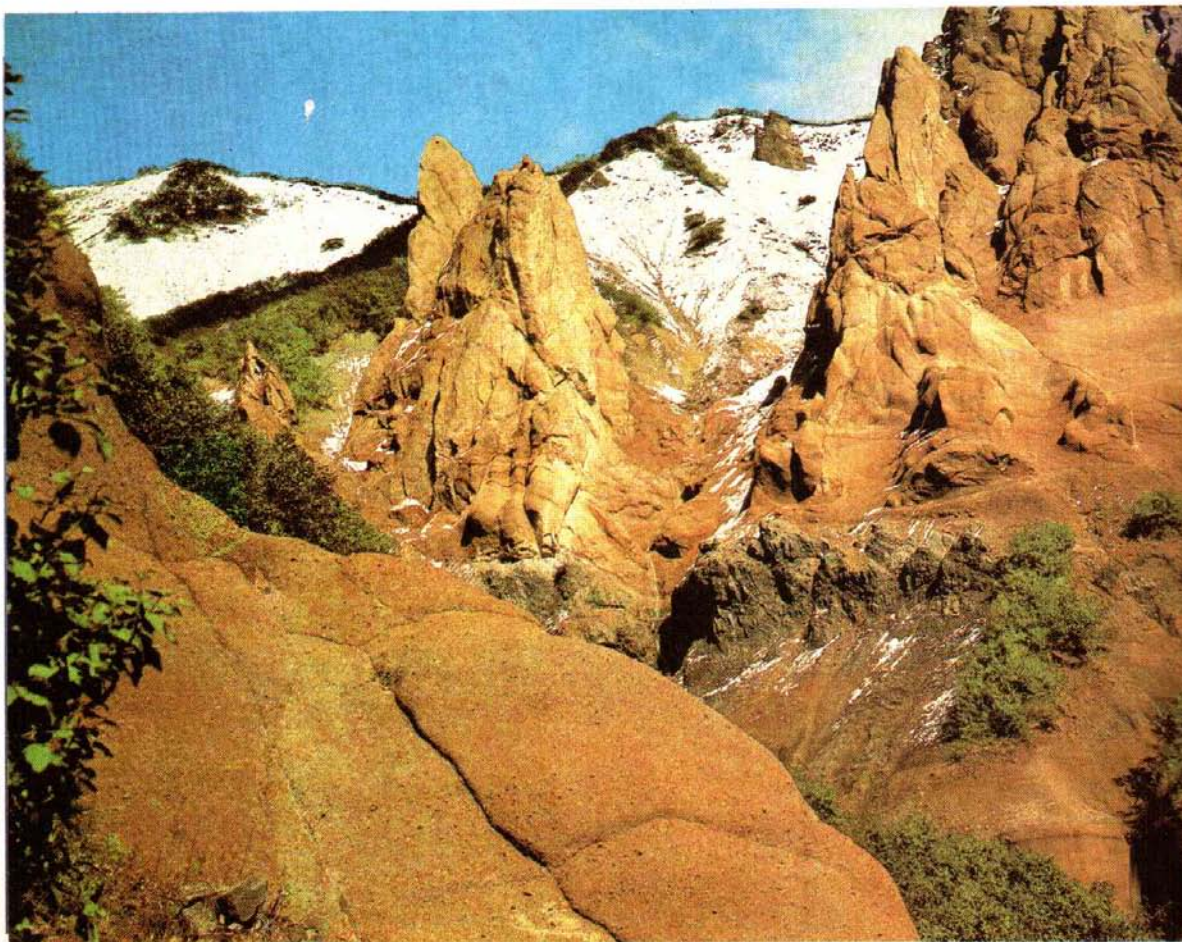


Рис. 50 "Желтые скалы" — блок озерных вулканогенно-осадочных отложений, образовавшихся при внедрении экзотризы Гейзерной. Фото В.Е. Гипенрейтера

Fig. 50. "Yellow rocks" — a block of lacustrine volcanogenic-sedimentary deposits pulled off with the intrusion of the Geyser extrusion. Photo by V. Ye. Gippenreiter

мелкозернистые включения базальтового состава. Большая их часть обладает каркасной структурой и кислым пористым стеклом в интерстициях. Парагенезисы минералов-вкрапленников в них аналогичны таковым в лавах базальтов. Среди таких включений встречаются и достаточно раскристаллизованные — табброидного состава. В составе ксенолитов в игнимбрито-образующих пирокластических потоках преобладают базальты.

**Геофизическая характеристика.** Выделяется гравитационный минимум в западной части кальдеры, являющейся воронкой взрыва глубиной около 2 км и дефектом масс  $3,2 \cdot 10^{13}$  г. В восточной части кальдеры гравитационное поле имеет мозаичный характер, причем зоны высоких градиентов, трактуемые как отражение разломов между блоками основания, совпадают с областями перегибов на кривой  $\Delta T_a$ . Интенсивная положительная аномалия соответствует гребню кальдеры Узон. Значения магнитного поля ступенчато убывают к востоку, достигая минимума в районе долины р. Гейзерной. Геофизические данные позволяют разделять на части Узон-Гейзерную вулканотектоническую структуру по способу образования: взрывному для западной части и провальному — для восточной.

#### Фумаролы, возгоны, источники, гейзеры, кальдера Узон.

Современная газо-гидротермальная деятельность сосредоточена в северной части кальдеры и проявляется на местности в виде узкой, не более 200–350 м, зоны термальных полей с выходами кипящих источников (рис. 51), парогазовых струй, грязевых котлов (рис. 52, 53), невысоких грязевых вулканчиков (рис. 54), термальных озер и источников с колониями синезеленых водорослей и тионовых бактерий (рис. 55), проследившихся с небольшими перерывами на 5 км<sup>2</sup> в субширотном направлении [Пийп, 1937; Пилипенко, 1976].

Отмечается четкий тектонический контроль термопроявлений, приуроченных к узлам пересечений субширотного разлома с опережающими трещинами северо-восточного простирания и кольцевыми разломами. Выделяются пять термальных полей. Отдельно на юг от оз. Центрального расположено Южное термальное поле, слабо изученное. В основной термальной зоне сосредоточены пять крупных и семь мелких термальных озер, более тысячи термальных источников самого разнообразного размера и формы (рис. 56–60). Общая площадь термоаномалии 61 000 м<sup>2</sup>, вынос тепла составляет 268 МВт [Ковалев, 1969].



Рис. 51. Источник Бурлящий. Фото В.Е. Гилленрейтера. Fig. 51. Buriashy spring. Photo by V. Ye. Gilpenreiter.

**Состав термальных вод и газов.** В кальдере Узон наблюдается уникальная полнота гидрохимических типов термальных вод [Пилипенко, 1976]. Наиболее высокотемпературные (кипящие) и высокоминерализованные воды, выходящие по зонам тектонических нарушений в осевой части термальных полей, относятся к так называемому Паужетско-Вайракейскому типу гидротерм. Они обычно обогащены бором, кремнием, аммиаком, имеют повышенные содержания щелочных металлов — Li, Rb, Cs — и рудных элементов — As, Sb, Hg — и характеризуются значениями pH, превышающими pH нейтральной точки воды при температуре источника. Общая минерализация их на выходе достигает 3,5—5 г/л. Все остальные типы гидротерм — сульфатно-хлоридно-натриевые, хлоридно-сульфатно-натриевые, гидрокарбонатно-сульфатно-кальциево-натриевые и гидрокарбонатные (нарзаны), в проявлении которых в общем наблюдается четкая горизонтальная зональность (рис. 61), — являются продуктами приповерхностной дифференциации и смешения хлоридно-натриевых и поверхностных вод.

Для узонских терм характерны высокие содержания рудных элементов (мг/л): As — 0,1—30, при среднем 5—6; Sb —

0,005—0,09; Hg — 0,009—0,029; Ag — 0,00012—0,00032; Au — 0,015—0,028; Ba — 0,05—0,15; Cu — 0,008—0,01; Zn — 0,03—0,45 при среднем 0,05—0,1; Sr — 0,02—0,45.

Состав спонтанных газов на различных термальных участках кальдеры и даже в различных источниках очень неоднороден. Наблюдаются следующие вариации содержания (в % об.): CO<sub>2</sub> — от 42,8 до 95,81; N<sub>2</sub> — от 1,1 до 45,75; H<sub>2</sub> — от 0,02 до 7,6; H<sub>2</sub>S — от 0,03 до 6,5; CH<sub>4</sub> — 0,08 до 20,1.

В составе спонтанных газов гидротермальной системы кальдеры Узон обнаружена высокая концентрация радона, достигающая 10<sup>-7</sup> Кюри/л.

#### **Нефтепроявления на термальных полях кальдеры.**

Узонская нефть относится к метано-нафто-ароматическому типу, с содержанием смол до 9,3%, серы — до 2%, парафина — до 2,1% [Вулканизм..., 1974]. Она обнаруживает уникально высокую оптическую активность ( $\alpha_D = 24,2^\circ$ ). Последнее обычно считается свидетельством биогенной природы нефти.

**Гидротермально измененные породы.** Гидротермально измененные породы в кальдере развиты по зонам тектонических нарушений, трассируя субширотную и субмеридиональные ли-



Рис. 56. Общий вид Второго и Третьего участков Восточного термального поля. Виден западный борт кальдеры Узон. Фото В.Е. Гиппенрейтера

Fig. 56. General view of the Second and Third segments of the Vostochnoye (Eastern) thermal field, with the western rim of the Uzon caldera at a distance. Photo by V.Ye. Gippenreiter

ния выхода термальных вод и участки пересечения этих линий с кольцевыми разломами. В разрезе гидротермально измененных пород наблюдается четкая вертикальная зональность — опалиты, каолиниты, смектиты — пропилиты [Вулканизм..., 1974]. В отдельных интервалах отмечается огипсование и карбонатизация. Обычно неолитизация. Почти повсеместно развита пиритизация [Карпов, Павлов, 1976]. Сводный литологический разрез и характер гидротермальных изменений по скв. УК-1 показан на рис. 62.

**Оруденение.** В кальдере наблюдается оруденение двух типов: серное и ртутно-сурьмяно-мышьяковое. Серное представлено останцами, линзами и пляжными образованиями почти мономинеральной серы (с примесью опала и глинистых минералов) кратерно-озерного генезиса. Общие запасы этой серы оцениваются в 100 тыс. т. Основные проявления серы сосредоточены на Первом (рис. 63) и Втором (рис. 64) участках Восточного термального поля.

Зоны ртутно-сурьмяно-мышьякового оруденения в пределах Узонской термоаномалии наиболее отчетливо проявлены в разрезе Центрального (Второго) участка Восточного термального поля (рис. 65а, б) и под водой в восточном борту Четвертого (Восточного) залива Фумарольного озера (рис. 66). Наиболее развита реальгар-аурипигментная фация.

К настоящему времени в разрезах термальных полей каль-

деры выявлены и охарактеризованы с различной степенью детальности 65 гидротермальных минералов: антимонит, реальгар (4 модификации), аурипигмент, новый сульфид мышьяка (открытый здесь) — узонит, киноварь, метациннабарит, скородит, пирит (три модификации), марказит, пирротин, арсенопирит, халькопирит, магнетит, самородная ртуть, самородный цинк, самородное серебро, самородная медь, сфалерит, борнит, халькозин, ковеллин, гематит, гидротетит, гидраргиллит. Из нерудных отмечены: опал,  $\alpha$ -кристобалит, тридимит, кварц, адуляр, альбит, кальцит, флюорит, алунит, гипс, сильвин, сера, барит, анальцит, десмин, ломонтит, морденит, натролит, клиноптилолит, шабазит, сколецит (?), актинолит, хлорит, монтмориллонит, каолинит, смешанослойный глинистый минерал, аллофан, бейделлит, галлуазит. Выделены также битумы, нефть, алуноген, галотрихит, пиккерингит, чермнгит.

Пестрый изотопный состав серы — от  $\delta^{34}\text{S} = -30,3\text{‰}$  в пиритах, до  $+22,4\text{‰}$  в сульфатах — свидетельствует о широко идущем на термальных полях ее изотопном фракционировании в условиях замкнутого цикла и с участием биогенных процессов. По данным радиоуглеродных датировок, верхняя зона существенно аурипигмент-реальгарового оруденения, имеющая мощность 0,6—1 м, сформировалась за период в 2—8 тыс. лет. Расчеты показали, что флюидами по зонам тектонических нарушений вынесено порядка 175000 т As, 20000 т Sb. В рудной

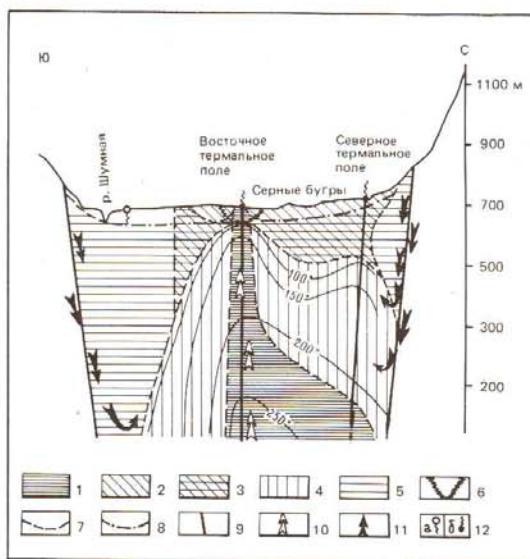


Рис. 61. Гидрогеологическая и гидрохимическая модель гидротермальной системы кальдеры Узон

1 — зона растворов хлоридно-натриевого состава; 2 — зона сульфатных вод; 3 — зона растворов сульфатно-хлоридно-бикарбонатного состава; 4 — зона хлоридно-сульфатных растворов; 5 — пресные инфильтрационные воды; 6 — зона ртутно-сурьмяно-мышьякового оруденения; 7 — граница зоны разных гидрохимических типов вод; 8 — уровень грунтовых вод; 9 — разломы; 10 — пути миграции глубинных флюидов; 11 — пути инфильтрации атмосферных вод; 12 — источники; а — газифицирующиеся "холодные" углекислые; б — термальные

Fig. 61. Hydrogeological and hydrochemical model of the hydrothermal system of Uzon caldera

1 — zone of solutions of chloride-sodium composition; 2 — zone of sulphate waters; 3 — zone of solutions of sulphate-chloride-bicarbonate compositions; 4 — zone of chloride-sulphate solutions; 5 — fresh infiltration waters; 6 — zone of hydrargyrum-antimonial-arsenic mineralization; 7 — boundary of zones of different hydrochemical types of water; 8 — level of ground water; 9 — faults; 10 — ways of migration of deep fluids; 11 — ways of infiltration of vadose water; 12 — springs; а — gasifying "cold" carbonaceous; б — thermal

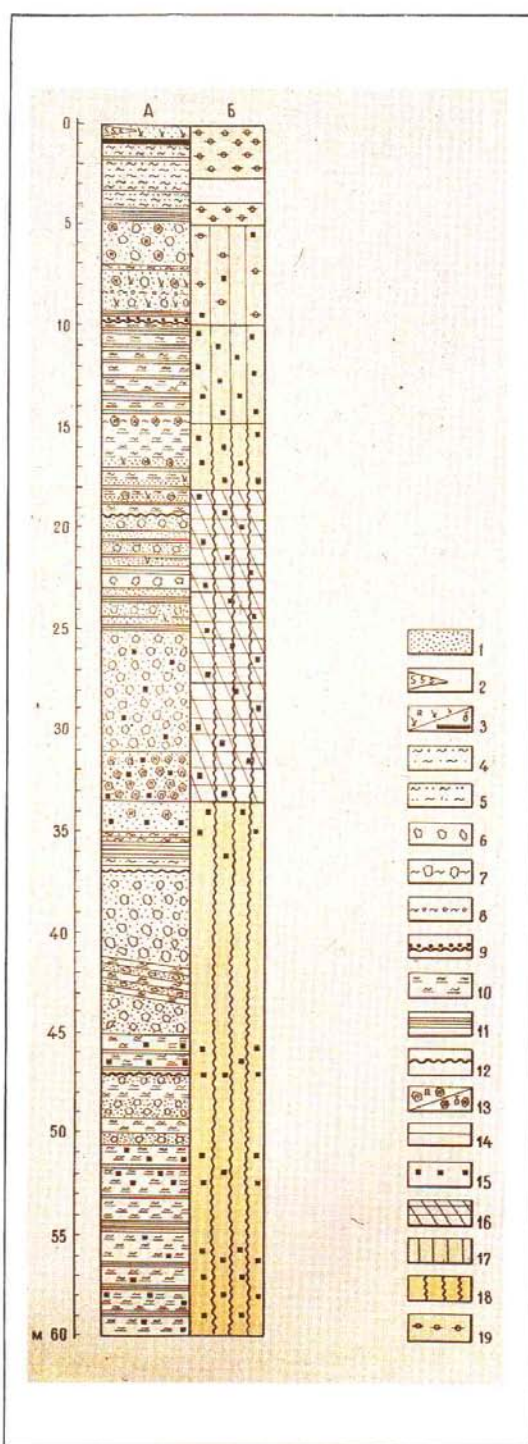


Рис. 62. Сводный литолого-минералогический разрез Восточного термального поля по скв. УК-1

А — литологическая колонка; Б — колонка общей минералогической зональности; 1 — туф псаммитовый; 2 — линза самородной серы; 3 — гумус (а — единичные включения; б — горизонт); 4 — алевропсаммитовый туф, аргиллизированный; 5 — алевропсаммитовый туф, сыпучий; 6 — туф псефитовый; 7 — туф псефитовый аргиллизированный; 8 — туф пемзовый; 9 — зона размыва с конгломератами; 10 — алевропелитовый туф; 11 — пепловый туф; 12 — зона дробления; 13 — обломки; а — слоистых туфов пеплово-пемзового состава, б — измененных туфов и лав; 14 — граница смены литологических разновидностей пород; 15 — пиритизация; 16 — карбонизация; 17 — каолинитизация; 18 — монтмориллонитизация; 19 — опализация

Fig. 62. Lithological-mineralogical summary section of the Vostochnoye thermal field on Site UK-1

А — lithological column; Б — column of general mineralogical zoning; 1 — psammitic tuff; 2 — a lens of natural sulphur; 3 — humus (а — single inclusions; б — horizon); 4 — aleuropsammitic tuff, argillized; 5 — aleuropsammitic tuff, loose; 6 — psephitic tuff; 7 — psephitic tuff, argillized; 8 — pumice tuff; 9 — zone of washout with conglomerates; 10 — aleuropelitic tuff; 11 — cinder tuff; 12 — zone of splitting; 13 — fragments; а — of layered tufts of cinder-pumice composition; б — of modified tufts and lavas; 14 — boundary of lithological differences; 15 — pyritization; 16 — carbonization; 17 — kaolinization; 18 — montmorillonitization; 19 — opalization

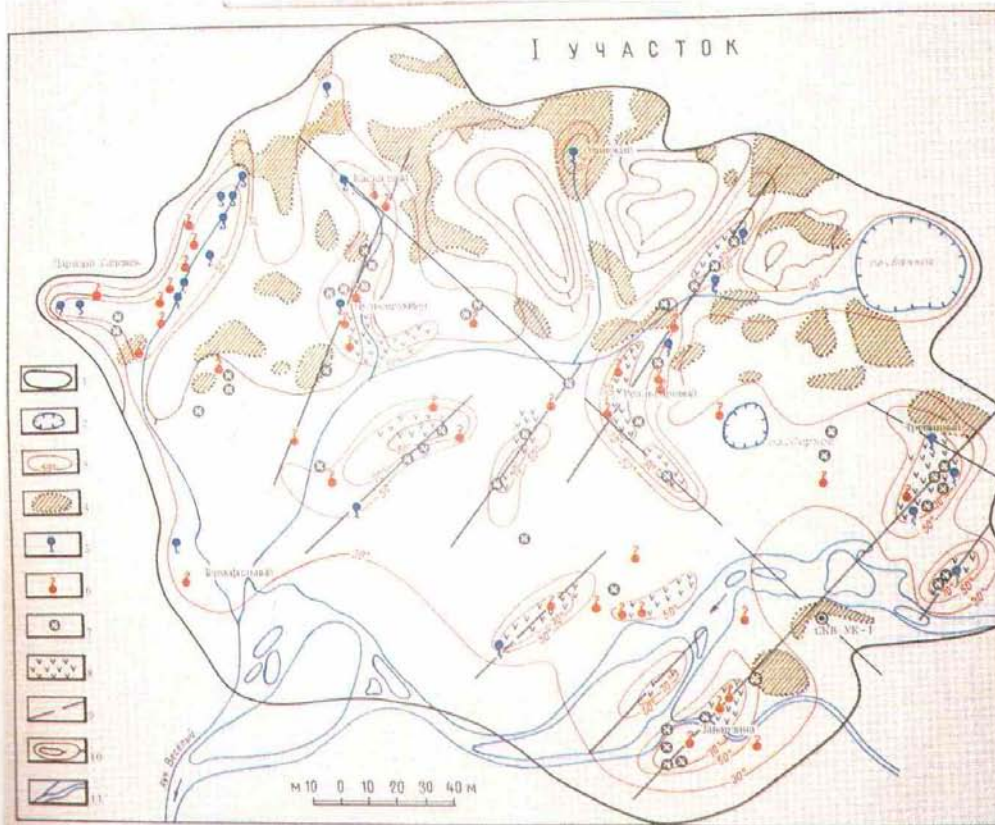


Рис. 63. Схематическая карта Первого участка Восточного термального поля кальдеры Узон

1 — контур термального поля; 2 — контур термальных озер; 3 — изотермы; 4 — фрагменты самородной серы; 5 — термальные источники с постоянным стоком; 6 — термальные источники бессточные или с периодическим стоком; 7 — грязевые котлы; 8 — участки парящего грунта; 9 — разломы; 10 — изогипсы; 11 — ручьи, реки

Fig. 63. Schematic map of the First segments of the Vostochnoye thermal field of Uzon caldera

1 — contour of the thermal field; 2 — contour of thermal lakes; 3 — isotherms; 4 — fragments of natural sulphur; 5 — thermal springs with permanent drainage; 6 — thermal springs, drainless or with periodic drainage; 7 — mud pots; 8 — segments of soaring ground; 9 — faults; 10 — contour lines; 11 — streamlets, rivers

зоне находится свыше 7000 т As, 350 т Sb, 200 т Hg. На базе определенных изотопов углерода спонтанного углекислого газа ( $\delta^{13}\text{C} = -2,1 \pm 7,1\text{‰}$ ) действия в высокотемпературных растворах ( $\text{SD} = -98 \pm 112\text{‰}$ ), стронция в водах и породах ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,7035$ ), отношения  $^3\text{He}/^4\text{He}$  в газах ( $0,6 - 1,13 \cdot 10^{-5}$ ) и корреляционных зависимостей сделан вывод о миграции к поверхности ряда ювенильных компонентов. К ним относятся: литий, рубидий, цезий, цинк, мышьяк, свинец, ртуть.

**Долина Гейзеров.** Современная гидротермальная деятельность наблюдается в долине р. Гейзерной и ее верховьях, у юго-западного подножия вулкана Кихпинич. Здесь среди разнообразных форм поверхностной гидротермальной активности выделяются гейзеры, впервые открытые и описанные Т.И. Устиновой в 1941 г. [Устинова, 1955] на левом притоке р. Шумной, получившем название р. Гейзерной (рис. 68—70).

Гейзеры и другие формы гидротермальной активности являются поверхностным проявлением крупной гидротермальной системы — Гейзерной. Непосредственно поверхностные термопроявления связаны с разгрузкой или близкоповерхностной циркуляцией высокотемпературных гидротерм, приуроченных к гидрогеологической структуре типа артезианского склона в пределах юго-восточной части Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии.

Поверхностные термопроявления системы образуют три основных термальных поля: Гейзерное — в нижнем течении

р. Гейзерной, Верхне-Гейзерных паровых струй и Кихпиничевское (рис. 71).

Термальные воды с температурой более  $100^\circ\text{C}$ , разгружаясь в виде кипящих источников и гейзеров в среднем и нижнем течении реки, где напорный уровень превышает отметки поверхности, формируют Гейзерное термальное поле. Это самая большая поверхностная аномалия Долины Гейзеров. Она непрерывно протягивается от устья вверх по течению на 3,5 км (см. рис. 71).

Здесь расположены почти все наиболее яркие и известные гейзеры Долины (рис. 72). Общее число гейзеров, выделяющихся мощностью фонтанирования пароводяной смеси, дебитом, красотой и размерами гейзеритовых построек, около тридцати. Среди них Первенец, Тройной, Конус, Малый, Большой, Великан, Жемчужный и др. (рис. 73—77, 78а, б; 79). Каждый из них отличается своим ритмом деятельности. Продолжительность цикла работы отдельных гейзеров изменяется от нескольких минут до нескольких часов (табл. 14). На рисунке показан для примера характер периодического действия гейзеров Первенец (1), Щель (2), Большой (3) и Великан (4). Вертикальные линии соответствуют периодам фонтанирования, интервал времени между ними — стадии покоя, излива и кипения.

Гейзеры приурочены к наиболее низким отметкам рельефа, трассируя трещиноватые зоны основных кольцевых разломов,

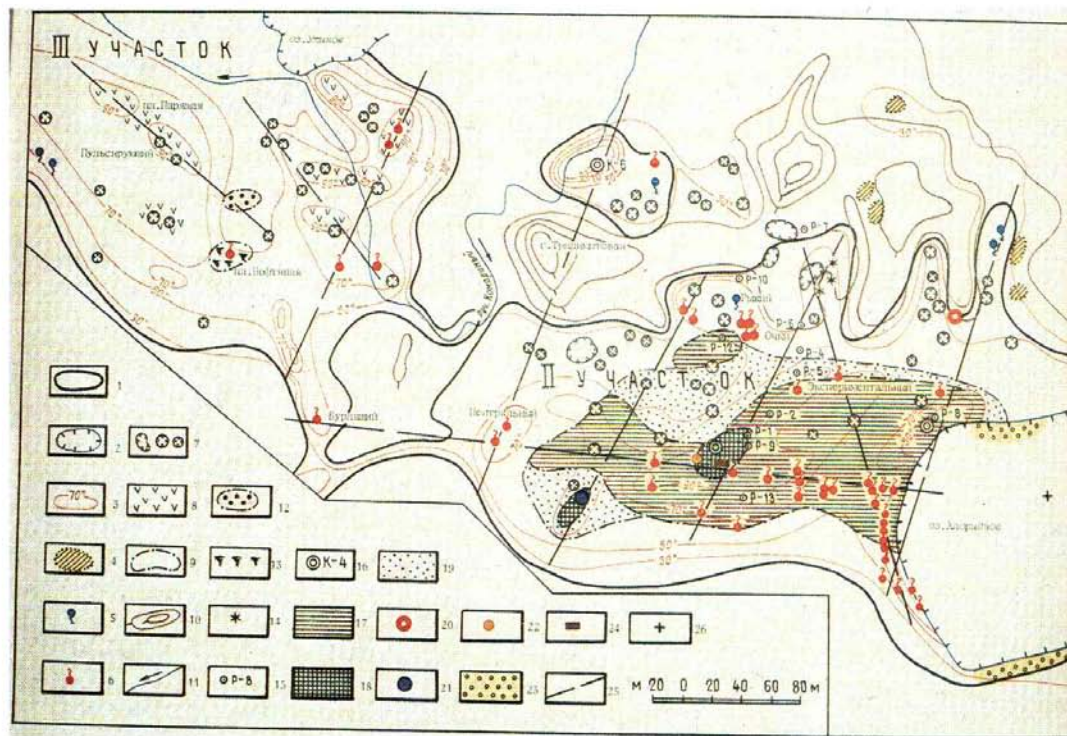


Рис. 64. Схематическая карта Третьего и Второго (рудного) участков Восточного термального поля

1—8, 9 — контур зоны ртутно-сурьмяно-мышьякового оруденения; 10, 11 — см. на рис. 63; 12 — проявления самородной ртути; 13 — проявления нефти; 14 — грязевые вулканчики; 15 — скважины ручного бурения; 16 — скважины колонкового бурения; 17 — участок развития ривальгар-вурнигментовой ассоциации; 18 — участок развития антимонита; 19 — участок развития скородита; 20 — место обнаружения киновари; 21 — место обнаружения самородного цинка; 22 — место обнаружения золота; 23 — зона серого пляжа; 24 — место обнаружения самородной меди; 25 — разломы; 26 — воронка с высоким содержанием водорода и метана в газовой струе

Fig. 64. Schematic map of the Third and Second (ore) segments of the Vostochnoye thermal field

1—8, 9 — contour of the zone of hydrargyrum-antimonial-arsenic mineralization; 10, 11 — the same as in Fig. 63; 12 — manifestations of natural hydrargyrum; 13 — oil manifestations; 14 — hand-bored holes; 15 — columnar holes; 16 — columnar holes; 17 — area of distribution of the rivaiggar-orpiment association; 18 — area of development of antimonite; 19 — area of development of scorodite; 20 — site of detection of cinnabar; 21 — site of detection of natural zinc; 22 — site of detection of gold; 23 — zone of sulphur beach; 24 — site of detection of natural copper; 25 — faults; 26 — a funnel with high hydrogen and methane content in the gas flow

Таблица 14  
Характеристика основных гейзеров (период наблюдений 1941—1987 гг.)

Гейзер	Продолжительность полного цикла, мин (миним. — максим.)	Продолжительность извержения, мин	Дата взятия пробы	Общая минерализация, г/л	pH	Основные химические компоненты, в мг/л									
						CO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	H <sub>2</sub> BO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	
Первенец	0—140	2	17.VIII 1987	1,4	8,9	3,6	67	115	440	330	26	18	65	308	
Тройной	127—220	8	27.V 1987	1,9	9,0	6,6	71	138	659	460	46	13	103	398	
Ворота в Гейзерную	110—610	220	5.X 1984	1,6	9,1	6,0	61	115	546	405	31	10	87	300	
Конус	18—28	2	26.V 1987	1,6	8,7	2,4	61	125	596	436	32	16	88	271	
Малый	35—37	5	26.V 1987	1,6	8,7	2,7	71	106	567	412	25	14	79	300	
Большой	60—140	5—6	8.IX 1985	2,1	8,7	2,1	57	163	794	555	37	23	126	370	
Шель	35—38	1	26.V 1987	2,1	8,6	1,8	59	144	823	546	44	18	96	368	
Фонтан	8—28	3—4	26.V 1987	1,9	8,9	3,6	65	92	780	488	57	18	114	278	
Великан	90—480	2	7.X 1986	2,2	8,4	1,5	75	154	831	572	55	23	104	378	
Жемчужный	230—330	4	1.X 1985	2,4	8,7	3,0	76	154	868	600	51	22	149	466	
Горизонтальный	90—150	0,7	26.V 1987	2,1	8,8	3,0	61	131	809	541	57	19	113	366	
Розовый конус	13—17	0,6	26.V 1987	1,9	8,8	3,6	66	106	702	482	36	18	101	357	
Бурлящий	10—63	2—11	25.V 1987	1,4	8,4	0,6	54	115	486	345	20	23	75	278	
Восьмерка	8—68	0,5	20.X 1985	1,9	8,9	3,3	60	144	702	482	29	30	120	381	
Верхний	7—16	1—8	7.X 1984	1,8	8,8	2,7	57	120	626	448	33	26	102	387	



Рис. 67. Панорама кальдеры Узон.  
Фото В. Е. Гиппенрейтера

Fig. 67. Panorama of Uzon caldera. Photo  
by V. Ye. Gippenreiter

Рис. 66. Корочка ауритимента и реалгара на псефитовом туфе подводной зоны оруденения на фумарольном озере. Фото Н. П. Смелова

Fig. 66. Orpiment and realgar incrustation on the psephite tuff the subaqueal zone of mineralization in a fumarole lake. Photo by N. P. Smelov



разломов северо-восточного направления и пересекающих их широтных и субмеридиональных нарушений.

Многолетние режимные наблюдения на гейзерах показали постоянство режима, испытывающее кратковременное влияние гидрометеорологических факторов, что свидетельствует о стабильности тепловых и водных параметров термального комплекса за наблюдаемый сорокалетний период [Сугрובה, 1982].

Наибольшие возмущения в режиме гейзеров вызывают сильные циклоны, влияющие на изменение природной обстановки в Долине Гейзеров. Об этом, в частности, свидетельствуют изменения, вызванные циклоном "Эльза" в 1981 г. [Сугрובה, Сугрбов, 1985].

В отличие от Гейзерного термального поля термопроявления двух других больших полей в верховьях р. Гейзерной представлены парогазовыми струями и их производными, источниками, котлами, вода которых представляет собой смешанные в разных пропорциях конденсат пара и газа и поверхностные воды. Обычно температура их достигает точки кипения, соответствующей данной высоте, уменьшаясь при разбавлении холодными водами до различных значений. В высоких и крутых бортах долины р. Гейзерной встречаются выходы вод с температурой 27—30°С, дающие начало нескольким теплым ручьям. Это разгрузка грунтовых вод, нагретых паром, поднимающимся от высокотемпературных гидротерм (рис. 80—92).

Один из участников Кихпиньчского термального поля, где наблюдаются выходы холодных газовых струй преимущественно сероводородного состава, получил название Долины Смерти. Здесь не раз находили погибших животных (бурого медведя, лису, полевую мышь и др.) и птиц. Они гибли, отравляясь сероводородом, который скапливается в безветренную погоду.

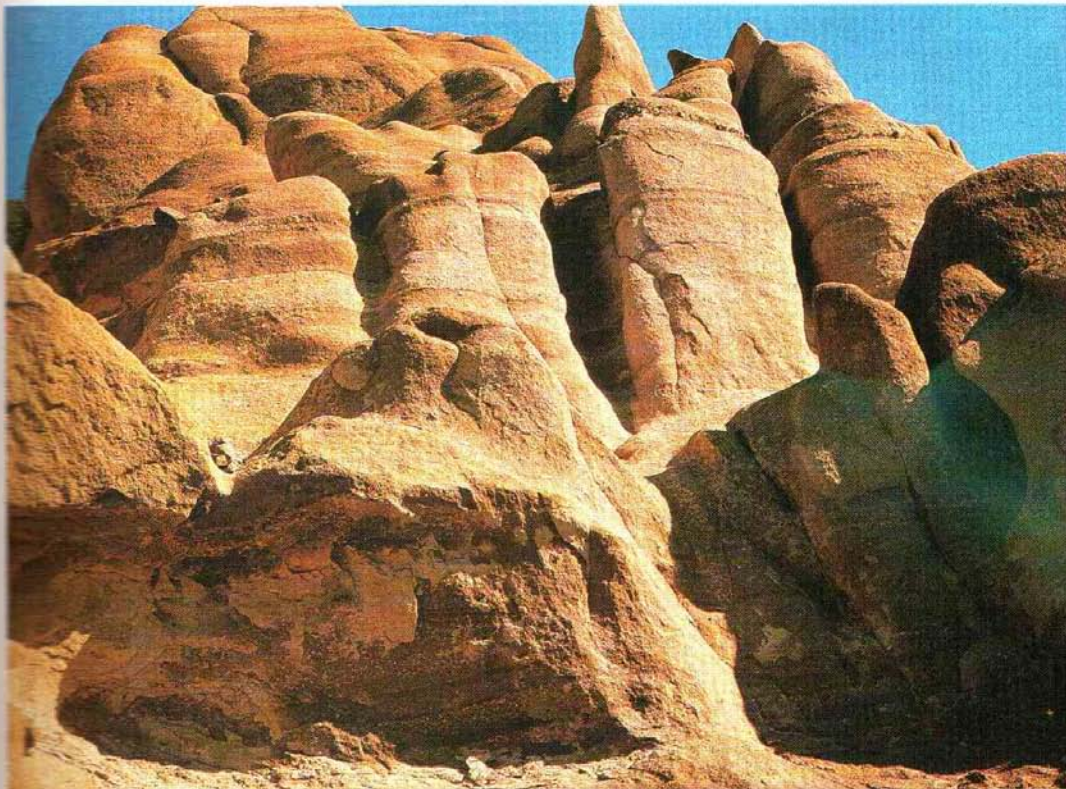


Рис. 68. Долина Гейзеров. Желтые скалы пемзы. Фото В.Е. Гиппенрейтера

Fig. 68. The Geyser Valley. Yellow rocks of pumice. Photo by V.Ye. Gippenreiter

Расположение участков интенсивной разгрузки термальной воды и пара можно видеть по распределению источников и участков нагретых пород (термоаномалий), оконтуренных изотермой 20°C на глубине 1 м, и по изменению химического состава вод и газов термопроявлений (см. рис. 71).

Общая площадь термоаномалий Долины Гейзеров, оконтуренная изотермой 20° на глубине 1 м, составляет  $1,3 \cdot 10^6 \text{ м}^2$ . Наибольшая концентрация прогретых площадок, вызванная интенсивностью разгрузки, наблюдается на участке Гейзерного поля, площадь которого  $0,9 \cdot 10^6 \text{ м}^2$ .

Пространственное расположение термоаномалий в значительной степени контролируется направлением основных тектонических нарушений и направлением движения гидротерм к зоне разгрузки (рис. 80—92).

Прослеживается определенное закономерное изменение химического состава и характера термопроявлений от предположительной области питания (вулканический массив Кихпинич) до выходящей зоны разгрузки в нижнем течении р. Гейзерной. Отмечено изменение от кислых сульфатных с пестрым катионным составом вод котлов на вулкане Кихпинич, паровых струй и Верхнегейзерного поля с углекислым составом газа до азотно-углекислых щелочных хлоридных натриевых кипящих источников и гейзеров. Вода кипящих источников и гейзеров, отражающая состав вод термального водоносного комплекса, относится к хлоридно-натриевому типу (см. табл. 14) с общей минерализацией, не превышающей 2,4 г/л, щелочной реакцией, с повышенным содержанием кремниевой кислоты (до 430 мг/л), борной кислоты (до 150 мг/л), мышьяка (от 0,4 до 1,7 мг/л). Кроме обычных компонентов, в термальных источниках содержатся литий, цезий, рубидий, сурьма, обна-

ружены также золото, серебро, висмут, свинец, олово, цинк, медь, барий, стронций. Разнообразие наблюдаемых типов подземных вод определяется условиями дифференциации гидротерм при парообразовании и дегазации, смешения с холодными водами и условиями разгрузки.

Определенные методом гидрохимических геотермометров (N — K — Ca и SiO<sub>2</sub>) максимальные значения температуры флюида на глубине в области теплового питания (до смешения его с холодными водами) составляют 330°C, в среднем — 250°C. При смешении с охлажденными подземными водами в очаге разгрузки глубинные температуры гидротерм оцениваются в 180—190°C.

Гидрогеологическая модель Гейзерной системы представляет восходящий водный поток из области магматического очага вулканического массива Кихпинич, сформированный местными инфильтрационными водами и водами регионального подземного стока, приобретающими на определенных уровнях температуру около 250°C. На пути к поверхности, охлаждаясь адиабатически с потерей пара и смешиваясь с холодными подземными водами, образуется латеральный поток гидротерм с температурой около 180°C. Основная его разгрузка происходит в нижнем течении р. Гейзерной.

Изотопные данные по водороду и кислороду не противоречат изложенной модели. Не исключено и участие ювенильной составляющей, доля которой за пределами точности определения изотопными методами.

Общая разгрузка термальных вод по данным многолетних измерений составляет 250—300 л/с.

Естественная тепловая мощность, определенная по величине разгрузки и глубинной температуре (250°C), достигает 320 МВт.

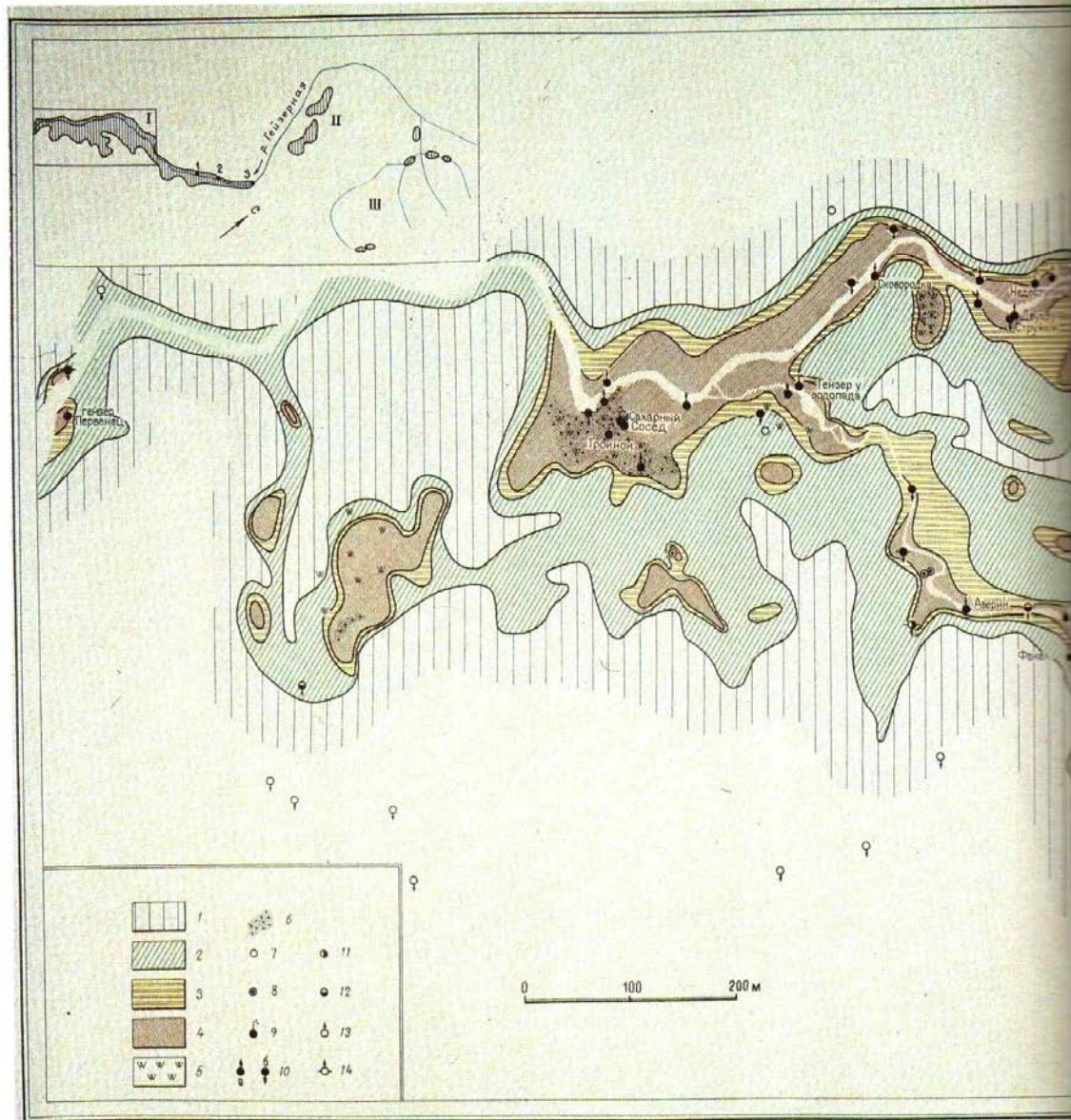


Рис. 71. Термометрическая карта Гейзерного термального поля Долины Гейзеров. Площади с температурой на глубине 1 м, °С: 1 — менее 20, 2 — 20—50, 3 — 50—70, 4 — более 70, 5 — участки гидротермально измененных пород; 6 — участки парящего грунта; 7 — паровые струи; 8 — грязевые и водные кипящие котлы; 9 — гейзеры; 10 — источники с температурой более 70°, а — восходящие, б — нисходящие; 11 — источники с температурой 50—70°, 12 — источники с температурой 35—50°; 13 — источники с температурой менее 35°; 14 — пластовый выход вод или группа источников.

На врезке — расположение основных термоаномалий Долины Гейзеров: I — Гейзерное термальное поле; II — Термальное поле Верхнегейзерных паровых струй; III — Кихпиничские термальные поля: 1 — гейзер Бурлашчий, 2 — гейзер Восьмерка, 3 — гейзер Верхний.

Fig. 71. Thermometric map of the Geyser thermal field of the Geyser Valley. Areas with temperature at the depth 1 m: 1 — less than 20°; 2 — 20—50°; 3 — 50—70°; 4 — over 70°; 5 — areas of hydrothermally modified rocks; 6 — areas of soaring ground; 7 — steam flows; 8 — mud and water boiling pots; 9 — geysers; 10 — springs with temperature over 70°; a — ascending; b — descending; 11 — springs with temperature 50—70°; 12 — springs with temperature 35—50°; 13 — springs with temperature less than 35°; 14 — discharge of water beds, or a group of springs.

Inset map shows the distribution of main thermal anomalies of the Geyser Valley: I — Geyser thermal field; II — thermal field of the Verkhnegeyser (Upper Geyser) steam flows; III — Kikhpinich thermal fields: 1 — Burlashchy geyser; 2 — Vosmerka geyser; 3 — Verkhny geyser.



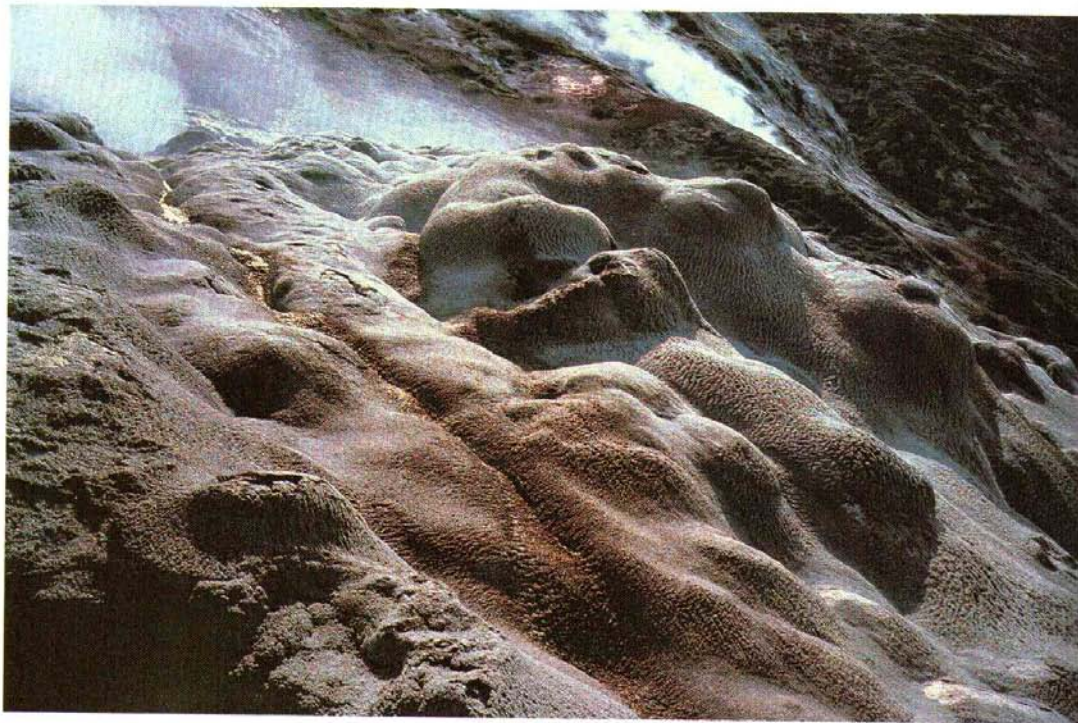


Рис. 78. Гейзеритовый щит (гейзер Тройной) (а). Фото В.Е. Гиппенрейтера  
Фрагмент диаграммы записи действия гейзеров (б): 1 — Первенец, 2 — Щель, 3 — Большой, 4 — Великан

Fig. 78. A geysite shield (the Troinoi geysers) (a). Photo by V.Ye. Gippenreiter  
Fragment of diagrams of recorded geysers activity (b): 1 — Pervenets; 2 — Shchel'; 3 — Bolshoi; 4 — Velikan

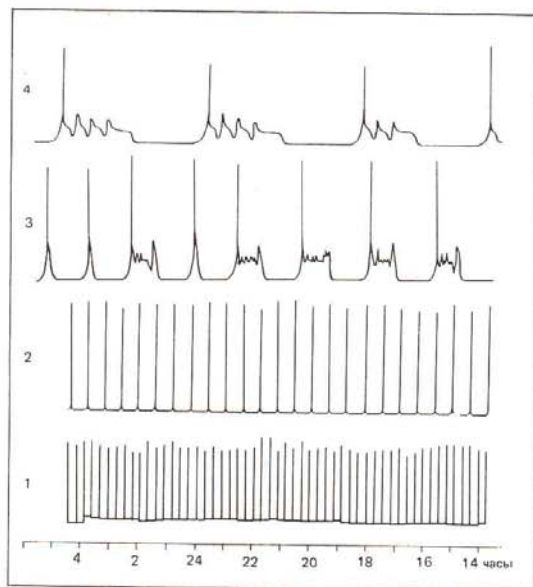


Рис. 79. Термальные котлы и следы каналов, подводщих газ и пар. Фото И.Е. Далецкой  
Fig. 79. Thermal pots and traces of gas- and steam-supplying canals. Photo by I.Ye. Daletskaya

## Uzon Caldera and Valley of Geysers

V.L. Leonov  
Ye.N. Grib  
G.A. Karpov  
V.M. Sugrobov  
N.G. Sugrobova  
M.I. Zubin

Synonym. Goryashi Dol.

**Location.** Coordinates of the western crest of Uzon caldera are 54°32'N, 160°05'E.

**Geographic position.** Uzon caldera and Valley of Geysers (Dolina Geizerov) are located in the Uzon-Geyser volcano-tectonic depression in the central part of the Eastern volcanic belt of Kamchatka.

**Geology of the basement.** The basement of Uzon caldera and Valley of Geysers is a complex of volcano-sedimentary strata and volcanic units dated as Early Pliocene (Shapinskaya suite) and Late Pliocene-Eopleistocene (Storozhevskaya suite).

**Morphology and structure.** Uzon caldera and Valley of Geysers are associated with the opposite ends of the WNW-trending Uzon-Geyser volcano-tectonic depression (Fig. 46). Uzon caldera is its western extreme. It is 9 by 12 km in size, with a flat bottom. It is framed on the south, west and north by steep scarps from 200-300 m to 800 m high (Figs 47, 48). On the outer side, the scarps grade into a weakly tilted plateau. The tallest point of the caldera's slope (Barany peak) is 1617 m high above sea level, the bottom of the caldera is at 700 m above sea level. Numerous lakes, streams and rivulets in the caldera give birth to the Shumnaya river which flows into the ocean. Valley of Geysers, associated with the eastern flank of the depression, is a steep canyon some 4 km long (Fig. 45).

Three complexes of rocks are distinguished in the structure of the region: pre-caldera, synchronous caldera and post-caldera ones. Fragments of units of the first complex outcrop now along the slopes of the Uzon-Geyser depression. They suggest that the depression was preceded by a group of volcanoes with basaltic to rhyolite-dacitic lavas and pyroclastics [Leonov, 1982].

The eve of its formation was marked by the ejection of tuffs and ignimbrites and bulging of extrusive domes, which was the major caldera-building phase of volcanism. These rocks build up the sections of the Uzon-Geyser slopes (Fig. 49) and compose two vast fields outside the depression that bound the depression on the north and southwest. The fields are oval in plan and 30-40 km along the longer axis. The visible thickness of ignimbrite layers in these fields ranges from 1-2 to 10-15 m. The ignimbrites section usually contains 2-3 thin strata separated by horizons of unwelded pyroclastics. Ignimbrites sheets dip at 3-7°, with the dipping periclinal with respect to the Uzon-Geyser depression.

Farther on mostly inside the depression are the post-caldera units. They comprise acid extrusions and pumice domes of the post-caldera volcanic phase, explosive strata basalts of the maar of the Dal'ny lake and multi-phase lacustrine and lacustrine-pyroclastic beds. Lacustrine sediments make up the bigger part of the post-caldera units. The Dal'ny lake maar is in the northeastern part of Uzon caldera (Fig. 50). The maar, 1 km in diameter, is surrounded by a ring swell 60 m high and 0.5-0.7 km wide formed 7.5 thousand years ago mostly with cinder, bombs, lapilli and boulders of andesite-basaltic lavas.

The southwestern part of Uzon caldera is occupied by a vast area of moraine deposits belonging to the second phase of the Upper Pleistocene glaciation. The end moraine crosses the caldera from the northwest to the southeast in the centre. The rampart is 20-40 m high. The moraines conceal most of the lacustrine section.

**Age and evolution.** The pre-caldera period was marked by synchronous eruption of basic and acid volcanoes. These rocks underlie ignimbrites and tuffs of the Bolshoi Semyachik caldera. They are Middle Pleistocene in age, with a negative magnetization suggesting an age of approximately 110 thousand years [Florensky, 1984]. The subsequent history can be subdivided into three stages (cycles) of activity [Belousov et al., 1983]. Each of the cycles features an explosive phase of pyroclastic eruption, and an extrusive-effusive one with released lavas ranging from andesites to rhyolites.

By the second phase of the Upper Pleistocene glaciation (some 20 thousand years ago) acid volcanism in the Uzon-Geyser depression had been almost over, probably due to the crystallization of most of the upper-crust magma chamber.

**Description of eruptions.** The historic times knew only phreatic eruptions in the Uzon-Geyser depression which were responsible for all of the thermal lakes and gryphons of major thermal springs in Uzon caldera. Such an eruption took place on 4 September, 1986, in the west of the Vostochny thermal field. Within a mere few seconds, a two-phase explosion gave off about 2000 m<sup>3</sup> of mixed gases and steam and 3 tons of stone material. Boulders of gravelites cemented by iron sulfides and weighing to 20 kg were fired to 30 km southwest. The resulting crater 1.5 m in diameter kept growing and a day later was 14 m wide and 10.5 m deep. The temperature at the bottom was up to 114°C.

**Products of eruptions.** The lavas belong to the calc-alkaline type and show a wide spectrum of rocks from basalts to rhyolites (Table 13). Basalts had been dominating before the caldera was formed, while acid lavas had built up a minor volcanic apparatus in the northeastern slope of the caldera. Formation of the caldera was accompanied by an ejection of big volumes of pyroclastics (ignimbrites), compositionally identified with andesites (north off the caldera) and dacites (Shirokoye plateau). The post-caldera, cyclic eruptions were represented by andesitic to rhyolitic lavas, a continuous basalt-andesite-dacite-rhyolite series can be distinguished.

The greater part of the rocks are porphyric; phenocrysts vary from 30-35% in basalts to 4-18% in rhyolites; the post-caldera andesites and dacites are highly crystallized: 25-30% of the volume of the rock. The main mineral phase is plagioclase.

In the pre-caldera basalts, dark coloured phenocryst minerals are represented by a clinopyroxene from diopside-augite series (*f*<sub>m</sub> 20-26%) and an olivine with variable Fe content (*f*<sub>m</sub> 20-50%). The plagioclase of phenocrysts in basalts is highly calcic, varying in composition from anorthosite to labradorite.

Andesites, dacites and rhyolites have a similar association of phenocryst minerals: plagioclase, ortho- and clinopyroxene, and titanomagnetite. Andesites and dacites may occasionally contain olivine in isolated grains with a basaltic glass coating. Some rhyolites contain hornblende.

Plagioclase of phenocrysts in acid lavas forms a wide spectrum of compositions, from bytownite to oligoclase.

Clinopyroxene is represented by a K-rich augite, or rarely by a diopside-augite (*f*<sub>m</sub> 26-36%); in andesites and dacites it predominates among dark minerals. Orthopyroxene-hypersthene (*f*<sub>m</sub> 30-38%) is developed both in phenocrysts and in the groundmass, though its iron content there grows considerably (*f*<sub>m</sub> 40-44%).

Hornblende is represented by a common ferro-magnesian variety with a higher Na (1.7-3.8%) and Ti content (1.2-1.8%).

Products of acid caldera volcanism typically show granitoid inclusions. They are particularly abundant in pumice-pyroclastic strata of Shirokoye plateau. The inclusions vary in composition from diorite to granite ["Volcanism...", 1974] and bear distinct traces of melting. Acid lavas occasionally show fine-grain inclusions of the basaltic composition. They have largely a framework texture, with acid porous glass in the interstices. Parageneses of phenocryst minerals in them are similar to those in basaltic lavas. Among these inclusions, there are also well crystallized ones with a gabbroid composition. Xenoliths of ignimbrite-forming pyroclastic flows are mostly by basalts.

**Geophysical characteristic.** There is a gravity minimum in the western part of the caldera which is a blast crater some 2 km deep and with the mass defect of  $3.2 \times 10^{13}$  g. In the eastern part of the caldera, gravity field is mosaic, with high-gradient zones coinciding with regions of  $\Delta T_a$  curve bends. A strong positive anomaly corresponds to the crest of Uzon caldera. Values of magnetic field tend to decrease stepwise eastward, to attain the minimum in the Geysernaya river valley. The geophysical data suggest a division of the Uzon-Geyser volcano-tectonic structure depending on the way it was formed; an explosion in its western part, and a collapse in the eastern part.

**Fumaroles, sublimes, springs, geysers and Uzon caldera.** The present gas-hydrothermal activity is concentrated in the north of the caldera, and is manifest in a narrow, less than 200-300 m wide, zone of thermal fields with boiling springs (Fig. 51), gas-steam jets, mudpots, small mud volcanoes (Figs 52, 53), thermal lakes and springs with colonies of blue-green algae and thio-bacteria (Figs 54, 55), trending almost continuously for 5 km in a sublatitudinal direction [Piip, 1937; Pilipenko, 1976].

There is a clear tectonic control of thermal manifestations which are associated with the intersection of sublatitudinal and ring faults. Five thermal fields are distinguished. The Southern thermal field, south of the Tsentral'noye lake, has not been thoroughly studied. The main thermal zone comprises 5 large and 7 smaller thermal lakes, and over a thousand of thermal springs of variable sizes and shapes (Figs 56-60). The thermoanomaly occupies an overall area of 61,000 m<sup>2</sup>, and the thermal losses are 288 Mw [Kovalev, 1969].

**Composition of thermal waters and gases.** Uzon caldera has a uniquely complete set of hydrochemical types of thermal waters [Pilipenko, 1976]. The most high-temperature (boiling) and highly mineralized waters released in zones of tectonic faults in the central part of the thermal field belong to the Pauzhetka-Vairakei type of hydrotherms. They are commonly rich in boron, silicon, and ammonium chloride, have high concentrations of alkali metals,

Li, Rb, and Cs, and ore elements: As, Sb and Hg; they show a pH higher than that of the water neutral point under the temperature of the spring. General mineralization at the vent is 3.5-5 g/l. The rest of the hydrotherms are sulfate-chloride-sodium, hydrocarbonate-sulfate-calcium-sodium and hydrocarbonate ("narzans") showing in general a pronounced horizontal zonation (Fig. 61). They are products of subsurface differentiation and mixing of chloride-sodium and surface waters.

Uzon therms have high concentrations of ore elements (mg/l): As — 0.1-30, average 5-6; Sb — 0.005-0.09; Hg — 0.009-0.029; Ag — 0.00012-0.00032; Au — 0.015-0.028; Ba — 0.05-0.15; Cu — 0.008-0.01; Zn — 0.03-0.45, average 0.05-0.01; Sr — 0.02-0.45.

There are variations in the composition of spontaneous gases depending on the thermal area of the caldera, and even on the spring. They are (in volume %): CO<sub>2</sub> — from 42.8 to 95.81; N<sub>2</sub> from 1.1 to 45.75; H<sub>2</sub> from 0.02 to 7.6; H<sub>2</sub>S from 0.03 to 6.5; CH<sub>4</sub> from 0.08 to 20.1.

Spontaneous gases of the Uzon hydrothermal system have been found to contain high concentrations of radon up to 10<sup>-7</sup> curie/l.

**Oil shows in the thermal fields of the caldera.** Uzon oil belongs to a methane-naphthene-aromatic type with resin content up to 9.3%, sulfur up to 2% and paraffins to 2.1% ["Volcanism...", 1974]. It has an extraordinary high optical activity ( $\alpha_D = 24.2^\circ$ ). This has been regarded as evidence of the biogenic nature of the oil.

**Hydrothermally altered rocks.** They are developed in the caldera along tectonic dislocations aligning the submeridional and sublatitudinal lines of thermal springs and their intersection with ring faults. The section of hydrothermally altered rocks has a distinct vertical zonation of opalites, kaolinites and smectite-propilites ["Volcanism...", 1974]. Separate intervals may show gypsumatization and carbonatization. Zeolitization is common, and almost ubiquitous is pyritization [Karpov, Pavlov, 1976]. A summary lithologic section, and the character of hydrothermal alterations for the UC=1 well is shown in Fig. 62.

**Ore mineralization.** The caldera shows two types of ore mineralization: sulfurous and mercury-antimony-arsenic. The sulfurous type is represented by relics, lenses and beach deposits of almost monomineral sulfur (with opal and clay minerals contamination) of a crater-lake genesis. The sulfur resources total 100 thousand tons. Major shows of sulfur are concentrated at the First (Fig. 63) and Second (Fig. 64) areas of the Eastern (Vostochny) thermal field.

Zones of mercury-antimony-arsenic ore mineralization within the Uzon thermal anomaly are the most distinct in the section of the Central (Second) area of the Eastern thermal field (Fig. 65a, b) and underwater in the eastern slope of the Fourth (Eastern) bay of the Fumarolnoye lake (Figs 66, 67). The most developed is the realgar-orpiment facies.

Table 13  
Average Chemical Composition of Uzon Caldera Rocks, per cent of Mass

Oxides	Complex										
	Pre-caldera					Caldera-building			Post-caldera		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO <sub>2</sub>	51.64	52.16	51.85	56.60	67.86	61.26	64.55	67.28	72.00	64.79	56.36
TiO <sub>2</sub>	1.16	1.06	1.11	1.15	0.90	1.36	1.07	0.86	0.52	0.88	1.35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.96	16.37	19.53	17.57	13.93	15.78	15.08	13.50	13.13	15.41	15.76
FeO	4.92	4.86	4.02	0.62	2.68	2.58	2.36	2.36	1.20	1.15	3.10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.05	4.85	5.41	8.21	1.60	3.90	3.06	2.71	2.30	3.77	8.00
MnO	0.24	0.45	0.20	0.17	0.11	0.20	0.19	0.22	0.17	0.15	0.12
MgO	4.12	4.24	3.40	3.41	1.34	2.15	1.28	1.18	0.15	1.35	2.82
CaO	10.01	9.66	9.41	6.97	3.47	5.56	4.22	3.70	2.26	4.47	6.87
Na <sub>2</sub> O	3.22	3.44	3.16	3.52	4.46	4.59	4.17	4.92	4.54	4.52	3.80
K <sub>2</sub> O	0.67	0.84	0.81	1.14	2.58	1.74	2.04	2.12	3.48	2.03	1.37
H <sub>2</sub> O	0.06	0.40	0.13	0.19	0.36	0.52	0.02	0.12	0.24	1.10	0.30
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.12	0.50	0.65	0.05	0.29	0.27	1.07	0.43	0.28	0.30	0.14
CO <sub>2</sub>	0.46	0.30	0.24	0.29	0.08	0.30	0.36	0.36	0.10	0.22	—
Total:	99.63	99.13	99.92	99.89	99.66	100.20	99.47	100.54	100.37	100.14	100.14

Note: 1 — basalts of the western flank of the caldera (3 an.); 2 — basalts of the northern flank (3 an.); 3 — Uzon volcano basalts (4 an.); 4 — andesites of the southwestern flank (2 an.); 5 — dacites of the northeastern flank; 6 — ignimbrites of the pyroclastic flow north of the caldera (3 an.); 7 — gabbroids of the northern flank of the caldera; 8 — ignimbrites of Shirokoye

plateau; 9 — rhyolites of Ozernaya extrusion, the first cycle of acid volcanism (5 an.); 10 — dacites of Belaya extrusion, the second cycle of acid volcanism (7 an.); 11 — andesite-basalts of the maar, Dalneye lake. In brackets, the number of analyses.

By the present time, 65 hydrothermal minerals have been distinguished and characterized within caldera thermal fields sections: antimonite, realgar (4 modifications), orpiment, usonite - a new arsenic sulphide discovered here; cinnabar, metacinnabarite, scorodite, pyrite (three modifications), marcasite, pyrrhotite, arsenopyrite, chalcopyrite, magnetite, native mercury, native gold, native zinc, native silver, native copper, sphalerite, bornite, chalcocite, covellite, hematite, hydrogoethite, hedrargillite. Non-ore minerals identified are: opal,  $\alpha$ -cristobalite, tridymite, quartz, adular, albite, calcite, fluorite, alunite, gypsum, sylvite, sulfur, barite, analcime, desmine, laumontite, mordenite, natrolite, clinoptilolite, chabasite, scolecite, actinolite, chlorite, montmorillonite, kaolinite, a mixed-layer clay mineral, allophane, beidellite, and halloysite. There are also bitumens, oil, alunogen, halotrychite, picheingite and tschermigite.

A variable isotopic composition of sulfur, from  $\delta^{34}\text{S}_{\text{ph}} = -30.3\text{‰}$  in pyrites to  $+22.4\text{‰}$  in sulfates, points to a wide isotopic fractionation in thermal fields under a closed cycle and contributed by biogenic processes. Radiocarbon dating shows that the upper zone of mostly orpiment-realgar mineralization 0.6-1 m thick formed over a period between 2 and 8 thousand years. Calculations show that fluids along faulting zones have given off some 175,000 tons of As and 20,000 tons of Sb. The ore zones contain over 7000 tons of As, 350 tons of Sb and 200 tons of Hg. Conclusions on a surface-ward migration of a number of juvenile components have been derived from the carbon isotope of spontaneous  $\text{CO}_2$  ( $\delta^{13}\text{C} = -2.1 \div -7.1\text{‰}$ ), deuterium in high-temperature solutions ( $\delta\text{D} = -98 \div -112\text{‰}$ ), strontium in waters and rocks ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7035$ ),  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios in gases ( $0.6-1.13 \cdot 10^{-5}$ ), and correlation dependencies. These juvenile components are lithium, rubidium, caesium, zinc, arsenic, lead and mercury.

**Valley of Geysers.** Modern hydrothermal activity is observed in the Geysernaya river valley and its upper reaches, at the SW foot of Kikhpinch volcano. Variable forms of surface hydrothermal activities feature geysers, first discovered and described by T.I. Ustinova in 1941 [Ustinova, 1955] on the left tributary of the Shumnaya river which was named Geysernaya (Figs 68-70).

Geysers and other forms of hydrothermal activity are surface manifestations of a large, Geysernaya hydrothermal system. Immediate surface thermal shows are caused by the discharge or the subsurface circulation of high-temperature hydrotherms associated with an artesian-slope type of hydrogeologic structure within the southeastern part of the Uzon-Geysers volcano-tectonic depression (Fig. 71).

Surface thermal manifestations of the system form three main thermal fields: Geysers field in the lower reaches of the Geysernaya river; that of Upper Geysers steam jets, and the Kikhpinch one (Fig. 72).

Table 14  
Characteristic of Major Geysers (Observation Periods of 1941-1987)

Geysers	Duration of complete cycle, min (min.-max.)	Duration of eruption, min.	Sampling date	Gen. mineralization, g/l	pH	Major chemical components in mg/l									
						$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{H}_2\text{BO}_3$	$\text{H}_2\text{SiO}_4$	
Pervenets	0-140	2	17.VIII 1987	1.4	8.9	3.6	67	115	440	330	26	18	65	308	
Troinoy	127-220	8	27.V 1987	1.9	9.0	6.6	71	138	659	460	46	13	103	398	
Gates to Geysernaya	110-610	220	5.X 1984	1.6	9.1	6.0	61	115	546	405	31	10	87	300	
Cone	18-28	2	26.V 1987	1.6	8.7	2.4	61	125	596	436	32	16	88	271	
Maly	35-37	5	26.V 1987	1.6	8.7	2.7	71	106	567	412	25	14	79	300	
Bolshoi	60-140	5-6	8.IX 1985	2.1	8.7	2.1	57	163	794	555	37	23	126	370	
Shchel	35-38	1	26.V 1987	2.1	8.6	1.8	59	144	823	546	44	18	96	368	
Fontan	8-28	3-4	26.V 1987	1.9	8.9	3.6	65	92	780	488	57	18	114	278	
Velikan	90-480	2	7.X 1986	2.2	8.4	1.5	75	154	831	572	55	23	104	378	
Zhemchuzhny	230-330	4	1.X 1985	2.4	8.7	3.0	76	154	868	600	51	22	149	466	
Gorizontalny	90-150	0.7	26.V 1987	2.1	8.8	3.0	61	131	809	541	57	19	113	366	
Rozovy konus	13-17	0.6	26.V 1987	1.9	8.8	3.6	66	106	702	482	36	18	101	357	
Burlyashchy	10-63	2-11	25.V 1987	1.4	8.4	0.6	54	115	486	345	20	23	75	278	
Vosmerka	8-68	0.5-1	20.X 1985	1.9	8.9	3.3	60	144	702	482	29	30	120	381	
Verkhny	7-16	1-8	7.X 1984	1.8	8.8	2.7	57	120	626	448	33	26	102	387	

Thermal waters with temperatures over  $100^\circ\text{C}$ , discharged in boiling springs and geysers in the middle and lower reaches of the river where the water under pressure exceeds surface values, form the Geysers thermal field. It is the biggest surface anomaly of the Valley of Geysers. It trends continuously up the stream from the estuary for 3.5 km (Fig. 71). It comprises almost all of the known and outstanding geysers of the Valley of Geysers with strong fountains of mixed gas and steam, high discharge level, noted for scenery and size of geyserite constructions. Nearly 30 in number, they include Pervenets, Troinoy, Konus, Maly, Bolshoy, Velikan, Zhemchuzhny and others (Figs 73-77; 78a, b; 79). Each has its own rhythm of operation. Duration of cycles of separate geysers may vary from several minutes to a couple of hours (Table 14). The figure illustrates the periodic activity of Pervenets (1), Shchel' (2), Bolshoy (3) and Velikan (4) geysers. Vertical lines correspond to fountain periods, and time intervals, to the stage of rest, discharge and boiling.

The geysers are located in the topographic lows aligning fissured zones of the main ring faults, the northeastern faults and the transecting longitudinal and submeridional dislocations.

Many years of observations of geysers have proved constancy of the regime, with brief effects of hydrometeorological factors, thus suggesting stability of thermal and water parameters of the thermal complex throughout a 40 year period [Sugrobova, 1982].

The biggest deviations in the geyser regime are produced by strong cyclones that affect the environment in the Valley of Geysers. This is evidenced by in particular by the changes generated by cyclone Elsa of 1981 [Sugrobova, Sugrobov, 1985].

In contrast to the Geysers thermal fields, thermal shows of the other two big fields in the upper Geysernaya river are represented by gas-steam jets and their derivatives, springs, and boiling mudpots, the water in them is a mixture of different proportions of steam and gas condensates and surface waters. Their temperature will commonly reach the boiling point corresponding to the given altitude and is reduced to various values when diluted by colder waters. There are springs of water with a temperature of  $27-30^\circ\text{C}$  on the high and steep banks of the Geysernaya river that give birth to a number of warm creeks. Those are discharged ground waters warmed up by the steam rising from high-temperature hydrotherms.

One of the areas of the Kikhpinch thermal fields with cold gas jets mostly hydrogen sulfide in composition has been nicknamed the Death Valley, for the dead animals (bear, fox, mouse, etc.) and birds found there. They were poisoned by hydrogen sulfide gas which may sometimes accumulate in calm weather.

Distribution of the areas of intensely discharging thermal waters and steam is defined by that of the springs and spots

of heated rock (thermal anomalies) contoured by a 20°C isotherm at a depth of 1 m, and by the changes in the chemical composition of waters and gases of thermal manifestations (Fig. 71).

The overall area of the Valley of Geysers' thermal manifestations within 20° isotherm contours at a depth of 1 m is  $1.3 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ . The highest concentration of hot patches due to intense discharge can be seen at a  $0.9 \cdot 10^6 \text{ km}^2$  area of the Geysir field.

Spatial distribution of thermal anomalies is controlled largely by the directions of major tectonic dislocations and the movement of hydrotherms towards the discharge zone.

There is a certain regular change in the chemical composition and the character of thermal manifestations from the assumed feeding source (Kikhpinych volcanic massif) to the identified discharge zone in the lower Geysernaya river. The variations are from acid sulfate water with a variable cation composition in mudpots of Kikhpinych volcano, steam jets and the Upper Geysir field with carbon dioxide gases to nitrogen-carbonic alkaline sodium-chloride boiling springs and geysers. The water in the boiling springs and geysers, reflecting the composition of that of a thermal water-bearing complex, belongs to a sodium-chloride type (Table 14) with a general mineralization below 2.4 g/l, an alkaline reaction, high concentrations of silicic acid (up to 430 mg/l), boric acid (up to 150 mg/l) and arsenic (from 0.4 to 1.7 mg/l). Apart from common elements, thermal springs contain also lithium, caesium, rubidium, antimony; discovered were also gold, silver, bismuth, lead, tin, zinc, copper,

barium, and strontium. The diversity of the observed types of ground waters is due to hydrotherm differentiation conditions under steam generation and degassing; those of cold water mixing and discharge conditions.

Determined with hydrochemical geothermometers (Na-K-Ca and  $\text{SiO}_2$ ), the maximum temperatures of the fluid at the depth within the thermal source area (before it is mixed with cold water) is 330°C, with an average value of 250°C. After it is mixed with cold ground waters at the discharge site, the depth temperatures of hydrotherms are estimated at 180-190°C.

A hydrogeologic model of the Geysir system is an ascending water flow derived from the magma chamber of Kikhpinych volcanic massif, and comprising local infiltration waters and the regional ground-water flow that at definite levels reach a temperature of 250°C. Towards the surface, cooling adiabatically, giving off steam and mixing with cold ground waters, it grades into a lateral flow of hydrotherms with a temperature of about 180°C. Its main discharge is in the low reaches of the Geysernaya river.

The hydrogen and oxygen isotopic data agree with the model. Contribution of the juvenile component, whose magnitude is beyond the precision of isotopic techniques, is not ruled out either.

The general thermal waters discharge for many years of observations amounts to 250-300 l/sec.

The natural heat output determined from the discharge value and depth temperature (250°C) is up to 320 Mw.