

ПЕРМОТРИАСОВЫЕ БАЗАЛЬТЫ ФУНДАМЕНТА ЗАПАДНО-СИБИРСКОГО БАССЕЙНА, ВСКРЫТЫЕ СВЕРХГЛУБОКОЙ СКВАЖИНОЙ ЕН-ЯХИНСКАЯ СГ-7

© 2016 г. С. В. Берзин, К. С. Иванов, М. В. Зайцева

*Институт геологии и геохимии УрО РАН
6500016, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15*

Поступила в редакцию 24.09.2015 г.

Принята к печати 18.04.2016 г.

Приводятся минералогические исследования пермотриасовых базальтов из керна Ен-Яхинской сверхглубокой скважины СГ-7 Уренгойского нефтегазодобывающего района с глубин 7673, 8009 и 8250 м. Изучение состава минералов показало, что преобразование пород происходило в условиях зеленосланцевой и пренит-пумпеллиитовой фаций метаморфизма при более высоких температурах, чем современные пластовые. Показана близость пород по ряду геохимических признаков с пермотриасовыми базальтами других районов Западно-Сибирской плиты, а также траппами Сибирской платформы, тем самым доказываемая связь базальтов скважины СГ-7 с заложением системы рифтов в фундаменте Западно-Сибирской плиты. Изотопные отношения Pb, впервые рассмотренные в двух пробах базальтов, показывают преобладание в источнике магмагенерации мантийных изотопных резервуаров типа PREMA и EM1.

Ключевые слова: *Западно-Сибирский бассейн, доюрский фундамент, Ен-Яхинская СГ-7, Сибирская трапповая провинция, пермотриасовые базальты, метаморфизм, геохимия изотопов Pb.*

ВВЕДЕНИЕ

Параметрическая сверхглубокая скважина Ен-Яхинская СГ-7 находится в пределах Уренгойского НГР в 150 км к северу от города Новый Уренгой. Скважина пробурена на северном склоне Ен-Яхинского мегавала, на седловине между Ен-Яхинским и Песцовым газовыми месторождениями [14 и др.] (рис. 1). Ен-Яхинская сверхглубокая скважина является уникальной и одной из немногих скважин наряду с Тюменской СГ-6, Уренгойской 414 и др., вскрывших пермотриасовые трапповые базальты на территории Ямало-Ненецкого АО. Скважина пройдена до глубины 8250 м. Начиная с глубины 6921 м она прошла по пермотриасовым вулканогенно-осадочным отложениям, сложенным преимущественно трапповыми базальтами и их туфами, аналогичными установленным в коротчаевской свите туринской серии, вскрытым в том же районе скважиной СГ-6 [10]. Залегающие выше (6504–6921 м) песчано-алевритовые терригенные толщи отнесены А.И. Киричковой к тюряхинской и трыбьяхской свитам нижнего-среднего триаса на основании определения возраста по остаткам флоры [8, 10, 13].

Пермотриасовые базальты фундамента Западно-Сибирской платформы, в особенности ее северной части, залегающие на значительной глубине (более 5–6 км) в арктической зоне, характеризуются

крайне слабой изученностью. В частности, ранее в них не рассматривали геохимию изотопов Pb, Sr, Nd. Задача исследования – изучение минерального состава и геохимических особенностей пермотриасовых базальтов из уникальной скважины Ен-Яхинская СГ-7.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом для изучения послужили образцы базальтов из керна сверхглубокой скважины Ен-Яхинская СГ-7 с глубин 7673, 8009 и 8250 м. Исследование состава минералов и съемку в отраженных электронах производили на электронно-зондовом микроанализаторе Cameca SX-100 в ИГГ УрО РАН, аналитик Д.А. Замятин. Содержания главных породообразующих окислов определялись методом рентгено-флуоресцентного анализа на приборах СРМ-18 и XRF-1800 в ИГГ УрО РАН, аналитики Н.П. Горбунова, Л.А. Татарина, Т.М. Ятлук, В.П. Власов, Г.С. Неупокоева. Микроэлементный состав проб определяли методом ICP-MS на приборе ELAN-9000 в ИГГ УрО РАН, аналитики Н.Н. Адамович, Д.В. Киселева.

Изотопные отношения измеряли методом $Tl_N MS$ ICP-MS на многоколлекторном масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой Neptune Plus в ЦКП “Геоаналитик” ИГГ УрО РАН. Процедура подготовки образцов для анализа заключалась в следу-

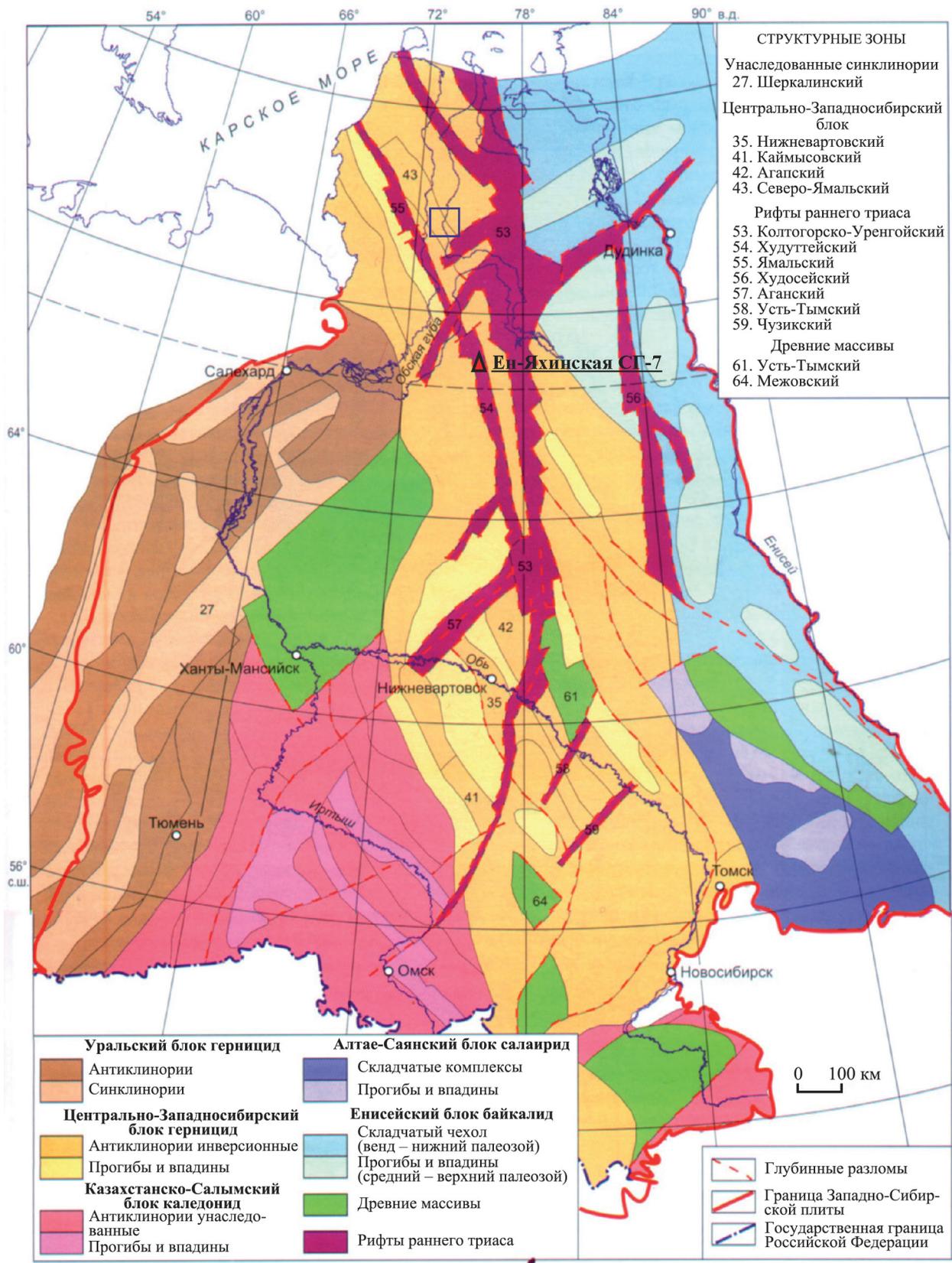


Рис. 1. Тектоническая карта фундамента Западно-Сибирской плиты [18] и положение скважины Ен-Яхинская СГ-7.

Fig. 1. The tectonic map of basement of the West Siberian Plate [18] with the position of hole Yen-Yakhinskaya SG-7.

юшем: кислотное вскрытие (HF + HNO₃) при 120°C в закрытых сосудах PFA Savillex® с последующей обработкой HCl; хроматографическое выделение свинца на анионообменной смоле Bio Rad AG 1×8 по стандартной схеме HBr–HCl [25]. Параметры измерения на МС ICP-MS Neptune Plus: ионные пучки изотопов свинца измерялись в статическом режиме на семи коллекторах Фарадея: ²⁰²Hg (коллектор L3-F), ²⁰³Tl (L2-F), ²⁰⁴Pb (L1-F), ²⁰⁵Tl (C-F), ²⁰⁶Pb (H1-F), ²⁰⁷Pb (H2-F) и ²⁰⁸Pb (H3-F); общее время измерения – около 7 мин; мощность радиочастотного генератора – до 950 Вт; расход плазмообразующего газа Ar – 15 л/мин; расход вспомогательного газа Ar – 0.9 л/мин; расход транспортирующего газа Ar – до 1 л/мин.

Параметры масс-спектрометра оптимизировались на ежедневной основе для достижения максимальной интенсивности сигнала свинца по стандарту NIST SRM 981. Результаты изотопных отношений свинца нормировались по эталонному значению ²⁰³Tl/²⁰⁵Tl = 0.418922 по экспоненциальному закону (таллийсодержащая метка вводилась в раствор образца перед измерением); к изотопным отношениям свинца ²⁰⁴Pb/²⁰⁶Pb, ²⁰⁴Pb/²⁰⁷Pb, ²⁰⁴Pb/²⁰⁸Pb применялась коррекция интерференций по отношению ²⁰²Hg/²⁰⁴Hg = 4.350370. Правильность и воспроизводимость исследования изотопного состава свинца контролировались повторными измерениями стандарта NIST SRM 981: ²⁰⁴Pb/²⁰⁶Pb = 0.059061 ± 2, ²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb = 2.16799 ± 3, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb = 0.914514 ± 9 (2σ_{ед} по 21 измерению).

МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОБ

Образец 7673 м представлен метаморфизованным базальтом с редкими порфиоровыми вкрапленниками плагиоклаза. Последний в базисе замещен

альбитом (An₁₋₂) (табл. 1) и заметно сосюритизирован, в порфиоровых вкрапленниках практически полностью замещен пренитом. Фемические минералы в образце замещены хлоритом и эпидотом (рис. 2в). Хлорит по составу занимает промежуточное положение между клинохлором и шамозитом (Fe/(Fe + Mg) = 0.50–0.52), в нем отмечены незначительные примеси Cr₂O₃ – 0.25–0.74% и MnO – 0.42–0.53% (табл. 2). Состав пренита близок к идеальному стехиометрическому, в нем отмечена примесь FeO_{сум} – 0.24–0.56% (табл. 3).

Образец 8009 м является метаморфизованным миндалекаменным базальтом (см. рис. 2б) с мелкопорфиоровой, гломеропорфиоровой структурой. Вкрапленники представлены таблитчатыми зернами плагиоклаза размером до 1.0–1.5 мм и их сростками. В базисе породы прослеживаются реликтовая интерсертальная структура с микролитами плагиоклаза, промежутки между которыми сложены метаморфогенными минералами, преимущественно хлоритом и эпидотом. Плагиоклаз как во вкрапленниках, так и в базисе замещен альбитом (An₁) (см. табл. 1) и заметно сосюритизирован, по нему развиваются эпидот и пренит. Хлорит по составу соответствует клинохлору (Fe/(Fe + Mg) = 0.42–0.44), в нем отмечены существенные примеси Cr₂O₃, варьирующие от околофоновых до 7.6% (см. табл. 2). Такие вариации примеси Cr₂O₃ в хлорите, скорее всего, связаны с неравномерным перераспределением хрома в силикатных минералах при полном метаморфическом замещении зерен хромовой шпинели. В прените наблюдается примесь FeO_{сум} – до 5.5%, замещающего Al в октаэдрической позиции (см. табл. 3).

Образец 8250 м представляет собой мелкопорфиоровый миндалекаменный базальт с порфиоровыми вкрапленниками плагиоклаза (см. рис. 2а, г). Плагиоклаз замещается альбит-олигоклазом (An₅₋₁₈)

Таблица 1. Состав плагиоклаза из образцов базальтов скважины Ен-Яхинская СГ-7

Table 1. Plagioclase Compositions of basalt samples from Yen-Yakhinskaya SG-7 hole

Компонент	Образец											
	7673 м			8009 м						8250 м		
	Номер анализа											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SiO ₂	67.92	68.73	69.01	69.13	69.04	68.81	69.44	68.52	68.68	62.82	64.63	65.85
TiO ₂	0	0	0.03	0.01	0	0.05	0	0.01	0.04	0	0.02	0.04
Al ₂ O ₃	19.07	19.05	19.12	18.85	19.09	19.11	19.09	19.01	19.00	20.72	20.35	20.14
Cr ₂ O ₃	0.03	0.03	0	0.10	0.01	0.05	0	0.06	0.05	0.03	0.02	0.05
FeO*	0.36	0.23	0.26	0.06	0.08	0.08	0.11	0.54	0.20	0.75	0.48	0.41
MnO	0.01	0	0.03	0	0	0	0.02	0	0.08	0.02	0.05	0
MgO	0	0.01	0	0.01	0	0.01	0.01	0.13	0	0.05	0.03	0
CaO	0.23	0.35	0.22	0.19	0.21	0.24	0.23	0.13	0.26	3.84	1.52	1.78
Na ₂ O	11.77	11.68	11.81	11.64	11.70	11.83	11.66	11.74	11.96	9.38	10.40	10.91
K ₂ O	0.17	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05	0.20	0.10	0.03	0.42	0.04
Сумма	99.55	100.11	100.52	100.01	100.19	100.21	100.60	100.33	100.37	97.65	97.91	99.22
An _i , %	1	2	1	1	1	1	1	1	1	18	7	8

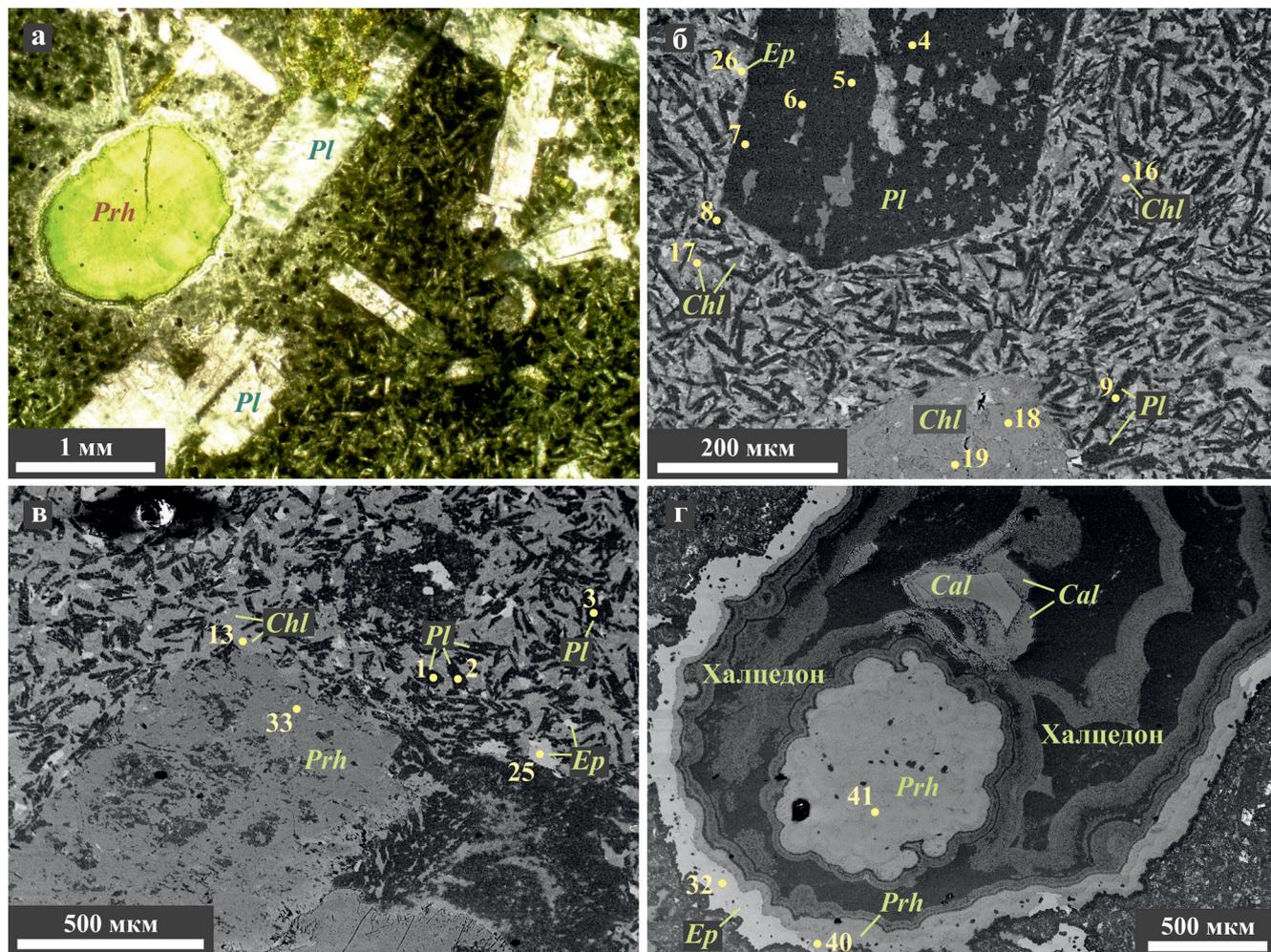


Рис. 2. Структура образцов базальтов скважины Ен-Яхинская СГ-7. Изображения в проходящем свете с анализатором (а) и в отраженных электронах (б–г).

а, г – обр. 7673 м, б – обр. 8009 м, в – обр. 8250 м. Номера точек соответствуют номерам микрозондовых анализов в табл. 1–4. *Cal* – кальцит, *Chl* – хлорит, *Ep* – эпидот, *Pl* – плагиоклаз, *Prh* – пренит.

Fig. 2. The structure of the basalt samples from hole Yen-Yakhinskaya SG-7. Images in transmitted light (а) and in back scattered electron (BSE) (б–г).

а, г – simple 7673 m, б – simple 8009 m, в – simple 8250 m, г – simple 7673 m. The number of points corresponds to number of microprobe analysis in table 1–4. *Cal* – calcite, *Chl* – chlorite, *Ep* – epidote, *Pl* – plagioclase, *Prh* – prhenite.

(см. табл. 1). Несмотря на то, что по нему развиваются пренит и эпидот, это может говорить о неполной трансформации плагиоклаза в альбит. Также встречаются псевдоморфозы хлорита и эпидота по зернам пироксена. В породе присутствует рутил, часто практически полностью замещенный титанитом. Химический состав хлорита занимает промежуточное положение между составами клинохлора и шамозита ($Fe/(Fe + Mg) = 0.49–0.50$) (см. табл. 2). Эпидот близок к идеальной стехиометрической формуле (табл. 4). В прените отмечена постоянная примесь $FeO_{сум} = 1–6\%$ (см. табл. 3).

Во всех образцах наблюдаются миндалины, выполненные пренитом, халцедоном, реже

хлоритом и кальцитом. Наиболее выразительное строение миндалины показано на рис. 2г. Здесь обнаружена последовательная кристаллизация на стенках полости эпидота, пренита, халцедона, между разными слоями которого отмечаются различия в содержании примесей тонкозернистого кальцита, включающего микровыделения халцедона, и монокристаллического кальцита (в самом центре). Подобная смена кристаллизующихся минералов, очевидно, указывает на изменение температуры и состава гидротермальных флюидов.

Температура образования хлорита в базисе породы, рассчитанная по разным термометрам [20,

Табл. 2. Состав хлорита из образцов базальтов скважины Ен-Яхинская СГ-7

Table 2. Compositions of chlorite of basalt samples from hole Yen-Yakhinskaya SG-7

Компонент	Образец											
	7673 м			8009 м						8250 м		
	Номер анализа											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
SiO ₂	26.79	27.10	27.19	27.10	28.11	29.32	28.26	29.25	28.33	27.87	28.25	27.80
TiO ₂	0	0	0	0.08	0.06	0.02	0	0	0.05	0.01	0	0
Al ₂ O ₃	17.67	17.07	17.54	14.63	15.40	15.19	17.19	15.08	16.06	17.04	16.52	16.79
Cr ₂ O ₃	0.74	0.25	0.54	7.61	3.75	0.15	0.18	0.12	1.15	0.27	0.29	0.37
FeO*	26.43	26.99	25.96	19.37	20.91	23.83	22.92	23.99	22.81	25.24	24.75	24.48
MnO	0.53	0.42	0.52	0.23	0.20	0.28	0.36	0.34	0.30	0.46	0.50	0.43
MgO	13.48	13.67	14.64	14.72	15.73	17.40	17.53	17.44	16.61	14.37	14.67	14.54
CaO	0.17	0.19	0.08	0.43	0.35	0.09	0.02	0.13	0.25	0.17	0.22	0.21
Na ₂ O	0.06	0.06	0.06	0.13	0.13	0.05	0.01	0.04	0.05	0.04	0.03	0.05
K ₂ O	0.05	0.03	0.03	0.03	0.07	0.02	0	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01
Сумма	85.91	85.78	86.55	84.34	84.70	86.34	86.47	86.39	85.62	85.50	85.23	84.69
Формульные коэффициенты, расчет на 10 катионов												
Si	2.94	2.98	2.94	3.03	3.09	3.13	3.00	3.12	3.06	3.05	3.10	3.06
Al	2.28	2.21	2.23	1.93	1.99	1.91	2.15	1.90	2.04	2.20	2.13	2.18
Cr	0.06	0.02	0.05	0.67	0.33	0.01	0.02	0.01	0.10	0.02	0.03	0.03
Fe	2.42	2.48	2.35	1.81	1.92	2.13	2.03	2.14	2.06	2.31	2.27	2.26
Mn	0.05	0.04	0.05	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.04
Mg	2.20	2.24	2.36	2.45	2.57	2.77	2.77	2.77	2.67	2.34	2.40	2.39
Fe/(Fe+Mg)	0.52	0.53	0.50	0.42	0.43	0.43	0.42	0.44	0.44	0.50	0.49	0.49
Т (°С) по термометрам												
[20]	280	268	280	251	232	218	261	221	242	244	229	239
[23]	282	274	280	256	243	235	262	237	250	256	246	252
[21]	287	275	285	255	236	222	265	225	246	250	235	245

Табл. 3. Состав пренита из образцов базальтов скважины Ен-Яхинская СГ-7

Table 3. Compositions of prhenite of basalt samples from hole Yen-Yakhinskaya SG-7

Компонент	Образец								
	7673 м			8009 м			8250 м		
	Номер анализа								
	33	34	35	37	38	39	40	41	
SiO ₂	43.43	43.98	43.67	42.65	42.24	43.15	42.33	42.06	
TiO ₂	0.12	0	0	0.04	0.06	0.02	0.02	0.01	
Al ₂ O ₃	23.42	23.28	23.47	19.64	21.59	22.62	19.58	19.21	
Cr ₂ O ₃	0	0	0	0.01	0.05	0.02	0.05	0	
FeO*	0.56	0.24	0.40	5.50	2.28	1.08	5.60	6.06	
MnO	0	0.10	0	0.08	0	0.05	0.15	0.08	
MgO	0.05	0.02	0	0.05	0.31	0	0.11	0.21	
CaO	26.73	26.68	27.02	26.10	24.99	25.45	25.54	25.48	
Na ₂ O	0.03	0.02	0	0.01	0.04	0.26	0.02	0.01	
K ₂ O	0.01	0	0.01	0	0.03	0.02	0.01	0.01	
Сумма	94.35	94.32	94.58	94.09	91.58	92.67	93.39	93.13	
Формульные коэффициенты, расчет на 7 катионов									
Si	3.03	3.07	3.04	3.03	3.05	3.06	3.03	3.02	
Al	1.92	1.91	1.92	1.64	1.84	1.89	1.65	1.63	
Fe	0.03	0.01	0.02	0.33	0.14	0.06	0.34	0.36	
Mg	0.01	0	0	0.01	0.03	0	0.01	0.02	
Ca	2.00	1.99	2.01	1.99	1.93	1.94	1.96	1.96	

24, 26], варьирует для каждого из образцов в незначительных пределах (°С): обр. 8250 м – 229–256, обр. 8009 м – 218–265, обр. 7673 м – 268–287 (см. табл. 2).

Табл. 4. Состав эпидота из образцов базальтов скважины Ен-Яхинская СГ-7**Table 4.** Compositions of epidote of basalt samples from hole Yen-Yakhinskaya SG-7

Компонент	Образец							
	7673 м	8009 м				8250 м		
	Номер анализа							
	25	26	27	28	29	30	31	32
SiO ₂	37.16	37.16	37.31	36.90	36.86	36.31	36.46	36.35
TiO ₂	0.02	0.06	0.03	0.06	0.05	0.09	0.42	0.01
Al ₂ O ₃	20.07	20.81	21.27	21.32	21.21	21.11	21.11	19.62
Cr ₂ O ₃	0.02	0.14	0.07	0.07	0.02	0.21	0	0.01
Fe ₂ O ₃ *	16.64	14.86	15.51	15.44	15.37	14.13	13.84	16.62
MnO	0.05	0.08	0.22	0.12	0.19	0.26	0.19	0.08
MgO	0.06	0.17	0.02	0.18	0.05	0.01	0.01	0.23
CaO	22.49	21.68	22.84	22.53	21.98	21.97	22.09	22.06
Na ₂ O	0.02	0.01	0.01	0	0	0	0.03	0.01
K ₂ O	0	0.04	0	0	0	0.01	0.01	0.01
Сумма	96.53	95.01	97.28	96.62	95.73	94.10	94.16	95.00
Формульные коэффициенты, расчет на 8 катионов								
Si	3.04	3.08	3.02	3.00	3.03	3.03	3.04	3.03
Al	1.94	2.03	2.03	2.05	2.06	2.08	2.07	1.93
Fe	1.03	0.93	0.95	0.95	0.95	0.89	0.87	1.04
Mn	0	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01
Ca	1.97	1.92	1.98	1.97	1.94	1.96	1.97	1.97

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВУЛКАНИТОВ

Исследованные пробы вулканитов относятся к толеитовым базальтам нормальной щелочности ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 2.63\text{--}4.03\%$) низко- (обр. 7673, 8250 м) и умеренно-калиевой (обр. 8009 м) серий. Они характеризуются умеренными содержаниями $\text{TiO}_2\text{--}0.9\text{--}1.3\%$ и невысокой железистостью $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})_{\text{мол}} = 0.38\text{--}0.51$ (табл. 5). Пробам базальтов свойственны наклонные тренды распределения РЗЭ ($\text{La}_n/\text{Yb}_n = 2.9\text{--}3.9$) при сумме лантаноидов 90–130 г/т (рис. 3а). Во всех пробах наблюдается слабая отрицательная Eu-аномалия ($\text{Eu}_n/\text{Eu}_n^* = 0.68\text{--}0.75$). На спайдер-диаграмме распределения несовместимых элементов в пробах отмечаются минимумы по Cs, Rb, Nb, Sr и максимум по U (рис. 3б). В целом по содержанию редкоземельных и некогерентных элементов породы близки к полям составов пермотриасовых нормальнощелочных базальтов из фундамента Западной Сибири [2, 12]. При сравнении с трапповыми базальтами Сибирской платформы изученные пробы по распределению микроэлементов проявляют большее сходство с базальтами рифтогенного, а не покровного этапа развития этой провинции [1]. Также при сравнении с данными перечисленных источников рассмотренные образцы отличаются выдержанной отрицательной европиевой аномалией и незначительно повышенным содержанием U – до 7.9 г/т.

На дискриминационной диаграмме AFM [27] точки составов базальтов попадают в поле составов толеитов вблизи границы с полем известково-

щелочных базальтов (рис. 4а). На диаграммах $\text{MnO--TiO}_2\text{--P}_2\text{O}_5$ [29], $\text{Th--Zr}/117\text{--Nb}/16$, $\text{Th--Hf}/3\text{--Nb}/16$ [32] фигуративные точки находятся в области составов островодужных базальтов (рис. 4б, д, е). На диаграмме $\text{Zr}/4\text{--Nb}\cdot 2\text{--Y}$ [28] точки попадают в поле островодужных и внутриплитных базальтов нормальной щелочности (см. рис. 4в). На диаграмме $\text{La}/10\text{--Y}/15\text{--Nb}/8$ [19] изучаемые породы оказываются в области границы известково-щелочных и континентальных базальтов (см. рис. 4г). На всех рассмотренных диаграммах изученные пробы попадают в поля составов пермотриасовых базальтов Западной Сибири [12]. При этом на диаграмме $\text{MnO--TiO}_2\text{--P}_2\text{O}_5$ [29] точки значительно отстоят от поля составов пермотриасовых базальтов зоны сочленения Северного Урала и Западно-Сибирской платформы по данным Т.П. Батуриной с соавторами [2] (см. рис. 4б).

ИЗОТОПНАЯ СИСТЕМАТИКА СВИНЦА

Впервые для пермотриасовых базальтов из фундамента Западно-Сибирского мегабассейна измерены изотопные отношения свинца. В двух проанализированных пробах базальтов (8009 и 8250 м) наблюдается заметная разница в величине отношений $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (табл. 6). На диаграммах $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (рис. 5) фигуративные точки обеих проб после корректировки на возраст 250 млн лет ложатся внутри так называемого мантийного тетраэдра. На обеих диаграммах (см. рис. 5) пробы занимают промежуточное положение между внутритетраэдрически-

Табл. 5. Содержание главных петрогенных элементов (мас. %) и элементов-примесей (г/т) в базальтах скважины Ен-Яхинская СГ-7

Table 5. Major-element (wt %) and trace elements (ppm) in basalt samples from hole Yen-Yakhinskaya SG-7

Компонент	Образец			Компонент	Образец		
	7673 м	8009 м	8250 м		7673 м	8009 м	8250 м
SiO ₂	44.67	50.95	51.01	Nb	11.2	7.1	7.8
TiO ₂	0.98	0.88	1.30	Cd	0.09	0.05	0.07
Al ₂ O ₃	14.19	14.78	14.70	Sn	2.3	1.1	1.9
Fe ₂ O ₃	6.13	5.94	8.54	Sb	0.7	0.3	2.6
FeO	5.20	4.60	4.20	Te	0.04	0.01	0.02
MnO	0.183	0.178	0.174	Cs	0.14	0.17	0.33
MgO	5.98	8.92	6.50	Ba	119	397	338
CaO	12.12	5.35	6.03	La	20.18	14.99	19.26
Na ₂ O	2.44	2.86	2.66	Ce	44.67	33.49	43.65
K ₂ O	0.19	1.17	0.26	Pr	5.65	4.31	5.94
P ₂ O ₅	0.25	0.15	0.22	Nd	23.25	17.68	25.50
П.п.п.	7.60	4.00	4.50	Sm	5.65	4.12	6.53
Сумма	99.75	99.60	99.92	Eu	1.33	1.10	1.56
Li	11.0	8.2	12.3	Gd	6.31	4.85	7.33
Be	1.3	0.8	0.9	Tb	0.99	0.74	1.20
Sc	20.7	23.8	23.8	Dy	6.19	4.54	7.30
Ti	5063	4106	5694	Ho	1.32	0.95	1.58
V	124	106	110	Er	4.07	2.89	4.81
Cr	19	189	57	Tm	0.63	0.42	0.71
Mn	671	618	592	Yb	4.27	2.79	4.80
Co	44	38	24	Lu	0.65	0.43	0.73
Ni	12	14	19	Hf	4.55	2.79	4.82
Cu	21	13	21	Ta	2.95	1.71	1.66
Zn	83	66	99	Tl	0.15	0.28	0.30
Rb	3	24	5	Pb	5.17	2.72	7.00
Sr	60	73	441	Bi	0.01	0.01	0.01
Y	30.3	22.1	36.7	Th	5.58	2.96	3.96
Zr	150	86	146	U	7.91	4.24	5.09

ми резервуарами PREMA [34] и F [15], с одной стороны, и обогащенной мантией первого типа EM1 [34] – с другой.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наши данные подтверждают, что базальты претерпели метаморфические изменения в условиях зеленосланцевой и прениг-пумпеллиитовой фаций регионального метаморфизма, тогда как лежащие выше по разрезу триасовые известково-щелочные базальты и риолиты не подверглись значительным зеленокаменным преобразованиям [4]. Согласно другим авторам [14, 16], вышележащие толщи триасовых и юрских песчаников в скважине СГ-7 (равно как и в СГ-6) несут лишь следы катагенетических преобразований, но более высоких фаций катагенеза, чем предусматривают современные пластовые температуры и давление. Полученные нами данные по метаморфическим преобразованиям пород не противоречат предположению о связи зеленокаменного метаморфизма и катагенетических преобразований высоких степеней с про-

гревом и дегидратацией нижележащих толщ под воздействием тепла Сибирского суперплюма, высказанному в работах [14, 16]. При этом в образце 8250 м широкое развитие кальциевых минералов – пренига, эпидота, кальцита (последний встречается в миндалинах), возможно, является следствием неизохимичности процесса зеленокаменного метаморфизма, выраженного в привносе кальция. Следствием этого, скорее всего, служат высокие содержания Sr (441 г/т) и большая окисленность железа ($Fe^{3+}/Fe^{2+}_{\text{мол}} = 1.83$).

Затруднительным представляется определение температуры образования халцедона и кальцита, встречающихся в центральных частях некоторых миндалин. Учитывая то, что эти минералы могут формироваться в достаточно широком диапазоне температур и давлений, а также то, что в забое на глубине 8250 м по данным организации, проводившей бурение, пластовая температура составила 210°C и **пластовое давление – 1.6 кбар, не исключена кристаллизация этих минералов в относительно недавнем промежутке времени.**

По геохимическим характеристикам изученные нами базальты сверхглубокой скважины

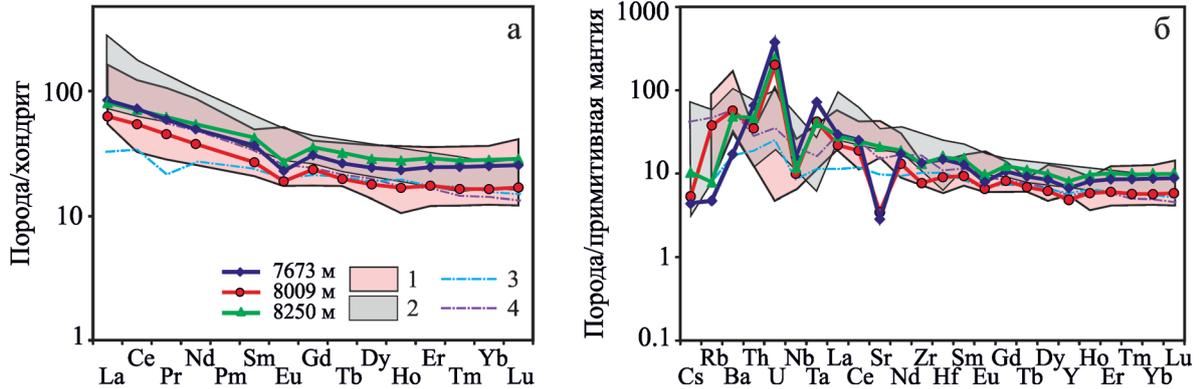


Рис. 3. Спайдер-диаграммы распределения РЗЭ (а) и некогерентных элементов (б), нормированных на хондрит CI и примитивную мантию соответственно [31].

1 – нормально-щелочные пермотриасовые базальты Западно-Сибирского бассейна [12]; 2 – нормально-щелочные пермотриасовые базальты бассейна р. Северная Сосьва в западной части Западно-Сибирской плиты [2]; 3, 4 – средние составы пермотриасовых базальтов рифтогенного (4) и покровного (3) этапов Сибирской платформы [1].

Fig. 3. Spider-diagrams of REE (a) and incoherent elements (б), normalized by CI-chondrite and primitive mantle respectively [31].

1 – low alkaline basalts of Permian-Triassic West Siberian Basin [12]; 2 – low alkaline basalts of Permian-Triassic of Severnaya Sos'va river, west area of West Siberian plate [2]; 3, 4 – Permian-Triassic basalts average compositions rift (4) and the cover (3) stages of the Siberian Platform by [1].

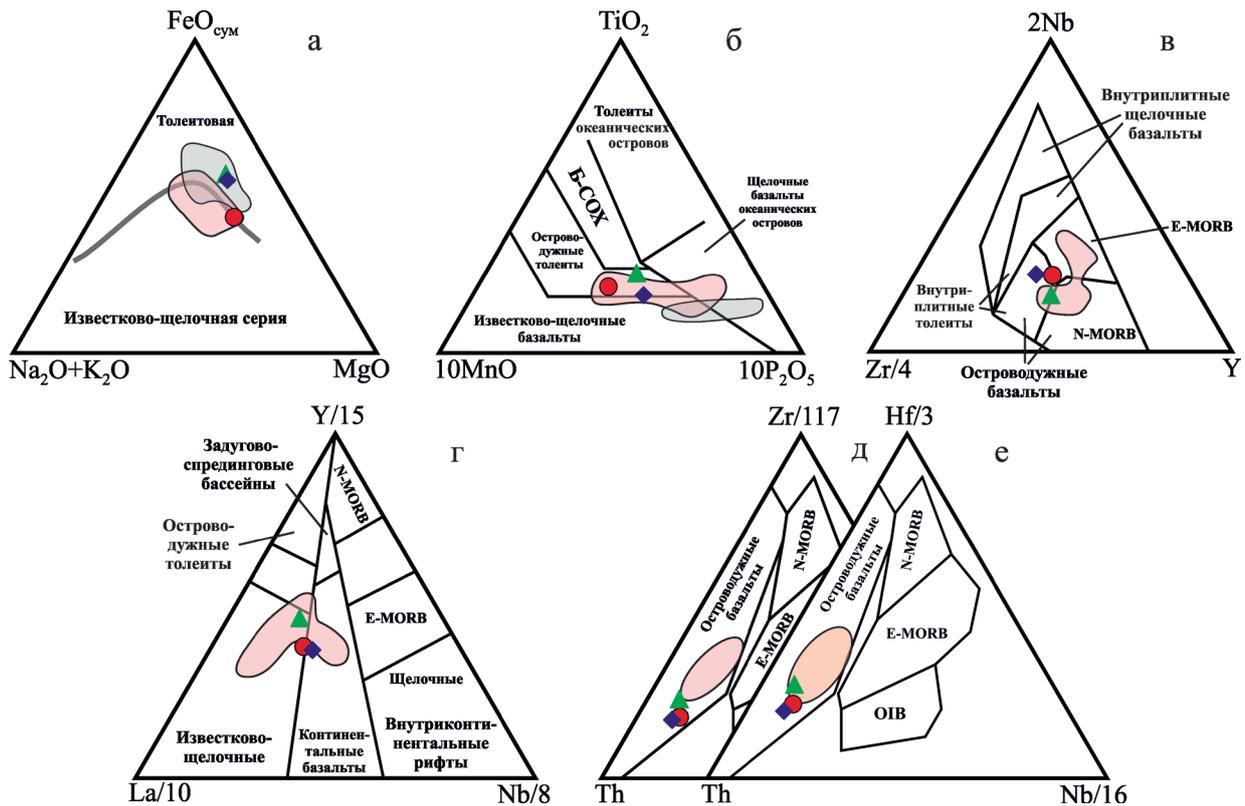


Рис. 4. Положение точек составов базальтов на дискриминационных диаграммах.

а – AFM [27], б – 10MnO–TiO₂–10P₂O₅ [29], в – Zr/4–2Nb–Y [28], г – La/10–Y/15–Nb/8 [19], д – Th–Zr/117–Nb/16 [32], е – Th–Hf/3–Nb/16 [32]. Условные обозначения см. на рис. 3.

Fig. 4. Basalt samples on the diagrams.

а – AFM [27], б – MnO–TiO₂–P₂O₅ [29], в – Zr/4–Nb·2–Y [28], г – La/10–Y/15–Nb/8 [19], д – Th–Zr/117–Nb/16 [32], е – Th–Hf/3–Nb/16 [32]. Legend in fig. 3.

Табл. 6. Изотопные соотношения Pb для образцов базальтов из скважины Ен-Яхинская СГ-7

Table 6. Pb isotopic ratios for basalt samples from hole Yen-Yakhinskaya SG-7

Проба	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	Std.Err.	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	Std.Err.	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	Std.Err.
8009 м	22.070	0.005	15.7348	0.0006	38.6314	0.0015
8250 м	20.213	0.005	15.6349	0.0005	38.1335	0.0013

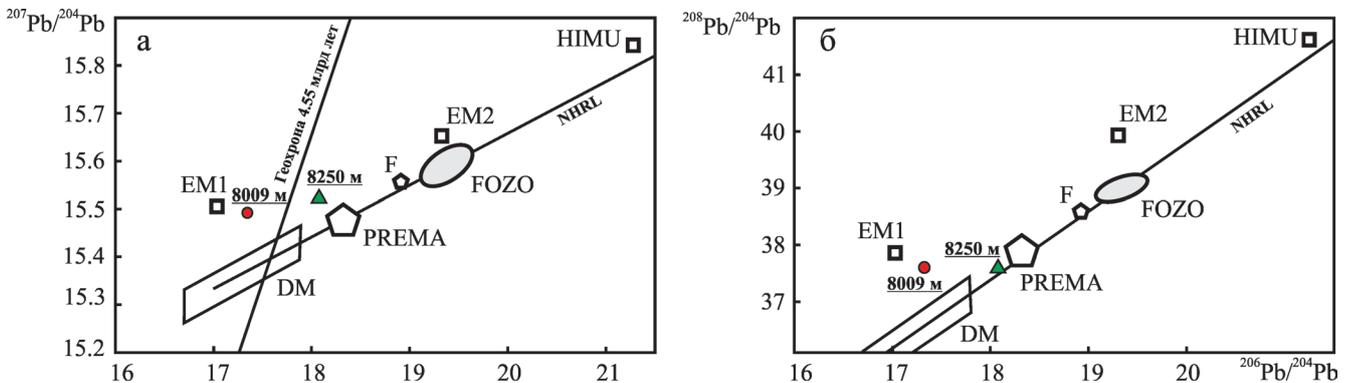


Рис. 5. Диаграммы $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (а) и $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (б) для базальтов из скважины Ен-Яхинская СГ-7 с глубин 8009 и 8250 м.

Мантийные резервуары: DM, EM1, EM2, HIMU, PREMA – по [34]; NHRL – Northern hemisphere reference line, MORB Тихого океана – по [30], резервуар F – по [15], FOZO – по [21, 22, 33]. Корректировка изотопных соотношений свинца проведена на возраст 250 млн лет. Погрешность определения изотопных соотношений меньше, чем размер точек.

Fig. 5. Diagrams of $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (a) and $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (б) for basalt samples 8009 and 8250 m from hole Yen-Yakhinskaya SG-7.

DM, EM1, EM2, HIMU, PREMA – by [34]; NHRL – Northern hemisphere reference line, MORB of Pacific ocean – by [30], reservoir F – by [15], FOZO – by [21, 22, 33]. Correction of lead isotope ratios carried out by 250 million years. Determination error the isotopic ratios less than the size of the points.

Ен-Яхинская СГ-7 на глубинах 7673, 8009 и 8250 м соответствуют пермотриасовым базальтам, вскрытым скважинами в фундаменте Западно-Сибирского мегабассейна [2, 12]. При этом отмечено их сходство с базальтами рифтогенного этапа пермотриасовых траппов Сибирской платформы [1]. Тот факт, что на некоторых дискриминационных диаграммах (см. рис. 4б–в, д–е) исследованные образцы базальтов, как и пермотриасовые базальты из других районов Западно-Сибирской плиты по данным [9, 12 и др.], попадают в поля составов островодужных вулканитов, может быть объяснен рециклингом субдуцируемого материала [9, 17 и др.].

Изучение изотопных отношений свинца показало, что в источнике расплавов пермотриасовых базальтов присутствовали как компоненты обогащенной мантии первого типа (EM1), так и “внутриконтинентальные” компоненты среднего состава мантии (PREMA и F). Относительно природы резервуара EM1 в настоящий момент нет единого мнения, но традиционно он рассматривается как вклад нижней континентальной литосферы [23 и др.]. Вовлечение последней в магмогенез в данном случае, вероятно, связано с утонением континентальной литосферы Западно-Сибирской плиты в результате

рассеянного рифтогенеза на границе перми и триаса.

Относительно формирования пермотриасовых траппов, связанных с системой рифтов в фундаменте Западно-Сибирской платформы, у исследователей на настоящий момент нет единой точки зрения. Наиболее популярной является гипотеза возникновения пермотриасовых траппов Западно-Сибирского мегабассейна, Тунгусской синеклизы, а также Кузнецкого бассейна и ряда других смежных областей в результате поднятия суперплюма от границы ядро-мантия [5–7 и др.]. Согласно другой точке зрения, источник пермотриасовых трапповых базальтов расположен в нижней континентальной коре, а причина их излияния кроется в стрессовом сжатии со стороны Урало-Алтайского орогена в процессе сурокайской фазы складчатости [3, 4, 11 и др.]. Согласно третьей гипотезе, впервые высказанной С.В. Аплоновым и наиболее близкой нам, формирование системы рифтов и последующее образование Западно-Сибирского осадочного мегабассейна произошли в результате “утыкания” зарождающегося Срединно-Океанического хребта в Урало-Казахстанский континент, консолидированный в верхнем палеозое. Это привело к расщепле-

нию новообразованной континентальной коры системой триасовых рифтов, постепенно разветвляющихся и угасающих к югу.

Исследование выполнено в рамках Программы Президиума РАН "Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны РФ" (проект "Фундамент северной части Западно-Сибирского нефтегазоносного мегабассейна: геодинамическая история, оценка перспектив нефтегазоносности").

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альмухамедов А.И., Медведев А.Я., Золотухин В.В. (2004) Вещественная эволюция пермотриасовых базальтов Сибирской платформы во времени и пространстве. *Петрология*, **12**(4), 339-353.
2. Батурина Т.П., Сараев С.В., Травин А.В. (2005) Каменноугольные и пермотриасовые вулканиты в зоне сочленения Урала и Западной Сибири. *Геология и геофизика*, **46**(5), 504-516.
3. Бочкарев В.С., Брехунцов А.М., Иванов К.С. (2013) Основные результаты сверхглубокого бурения скважин (СГ-6 Тюменской и СГ-7 Ен-Яхинской) в Западной Сибири. *Горные ведомости*, (12), 6-30.
4. Бочкарев В.С., Папин Ю.С. (2000) Триас Сибири и проблема определения его геохронологических рубежей. *Металлогения и полезные ископаемые. Материалы региональной конференции геологов Сибири, Дальнего Востока, и Северо-Востока России. Т. 2. Томск: ТПУ*, 321-323.
5. Гусев Г.С., Минц М.В., Мусатов Д.И. и др. (1991) Методика геодинамического анализа при геологическом картировании. М.: ИМГРЭ, 204 с.
6. Добрецов Н.Л. (2005) Крупнейшие магматические провинции Азии (250 млн лет): Сибирские и Эмейшаньские траппы (платобазальты) и ассоциирующие гранитоиды. *Геология и геофизика*, **46**(9), 870-890.
7. Добрецов Н.Л., Владимиров А.Г., Крук Н.Н. (2005) Пермскотриасовый магматизм АлтаеСаянской складчатой области как отражение Сибирского суперплюма. *Докл. АН*, **400**(4), 505-509.
8. Ехлаков Ю.А., Угрюмов А.Н., Брехунцов А.М., Бочкарев В.С., Кучеров Г.Г., Горбачев В.И. (2005) Особенности геологического строения доюрского комплекса Западной Сибири в связи с нефтегазоносностью. *Горные ведомости*, (2), 28-37.
9. Иванов К.П., Иванов К.С., Федоров Ю.Н. (2007) Геохимия триасовых вулканитов Западно-Сибирской плиты (на примере туринской серии). *Геодинамика, магматизм, метаморфизм и рудообразование*. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 767-790.
10. Киричкова А.И. (2011) Особенности литологии континентального триаса Западной Сибири. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*, **6**(1), 28 с. http://www.ngtp.ru/rub/2/3_2011.pdf
11. Кременецкий А.А., Гладкий В.С. (1997) Низкокальциевые толеитовые базальты – индикатор эволюции палеогеодинамических обстановок и прогноза углеводородного сырья (по данным Тюменской сверхглубокой скважины СГ-6). *Геохимия*, (6), 609-617.
12. Медведев А.Я., Альмухамедов А.И., Кирда Н.П. (2003) Геохимия пермотриасовых вулканитов Западной Сибири. *Геология и геофизика*, **44**(1-2), 86-100.
13. Могучева Н.К. (2005) Новые данные по стратиграфии триаса Западной Сибири. *Горные ведомости*, (12), 84-88.
14. Мясникова Г.П., Оксенойд Е.Е. (2012) Некоторые геологические результаты сверхглубокого бурения в Западной Сибири. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*, (3), 13-19.
15. Рундквист Д.В., Ряховский В.М., Миронов Ю.В., Пустовой А.А. (2000) Существует ли универсальный Sr-Nd-Pb изотопный индикатор нижнемантийных плюмов? *Докл. АН*, **370**(2), 223-226.
16. Симанович И.М., Горбачев В.И. (2011) Катагенез и метаморфизм погружения терригенных и вулканогенных толщ (разрез, вскрытый параметрической скв. СГ-7, Ен-Яхинской). *Литология и полез. ископаемые*, (1), 94-106.
17. Соболев А.В., Криволицкая Н.А., Кузьмин Д.В. (2009) Петрология родоначальных расплавов и мантийных источников магм Сибирской трапповой провинции. *Петрология*, **17**(3), 276-310.
18. Тектоническая карта фундамента Западно-Сибирской плиты (О.Г. Жеро, А.Э. Конторович, В.П. Коробейников, В.Н. Крамник, Л.В. Смирнов). (2004) (Под ред. В.С. Суркова).
19. Cabanis B., Lecolle M. (1989) Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8; un outil pour la discrimination des series volcaniques et la mise en evidence des processus de melange et/ou de contamination crustale. *C. r. Acad. Sci. Ser. 2*: **309**(20), 2023-2029.
20. Cathelineau M., Nieva D.A. (1985) Chlorite solid solution geothermometer. The Los Azufres (Mexico) geothermal system. *Contrib. Miner. Petrol.*, **91**(3), 235-244.
21. Hart S.R., Hauri E.H., Oschmann L.A., Whitehead J.A. (1992) Mantle Plumes and Entrainment: Isotopic Evidence. *Science*, **256**(5056), 517-520.
22. Haur E.H., Whitehead J.A., Hart S.R. (1994) Fluid dynamic and geochemical aspects of entrainment in mantle plumes. *J. Geophys. Res.*, **99**(B12), 24275-24300.
23. Ivanov A.V. (2010) Deep-level geodynamics: boundaries of the process according to geochemic and petrologic data. *Geodynamics & Tectonophysics*, **1**(1), 87-102.
24. Jowett E.C. (1991) Fitting iron and magnesium into the hydrothermal chlorite geothermometer. GAC/MAC/SEG Joint Annual Meeting. Program with Abstracts 16. Toronto, A62.
25. Kamber B.S., Gladu A.H. (2009) Comparison of Pb Purification by Anion-Exchange Resin Methods and Assessment of Long-Term Reproducibility of Th/U/Pb Ratio Measurements by Quadrupole ICP-MS. *Geostandards and Geoanalytical Res.*, **33**(2), 169-181.
26. Kranidiotis P., MacLean W.H. (1987) Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec. *Econ. Geol.*, **82**, 1898-1911.
27. Kuno H. (1968) Differentiation of basalt magmas. *Basalts: the poldervaart treatise on rocks of basaltic composition. V. 2. Interscience. N. Y.*, 623-688.

28. Meschede M. (1986) A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chem. Geol.*, **56**, 207-218.
29. Mullen E.D. (1983) MnO/TiO₂/P₂O₅: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **62**, 53-62.
30. Plank T., Langmuir C.H. (1998) The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. *Chem. Geol.*, **145**, 325-394.
31. Sun S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, **42**, 313-345.
32. Wood D.A. (1980) The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **50**(1), 11-30.
33. Workman R.K., Hart S.R., Jackson M., Regelous M., Farley K.A., Blusztajn J., Kurz M., Staudigel H. (2004) Recycled metasomatized lithosphere as the origin of the Enriched Mantle II (EM2) end-member: Evidence from the Samoan Volcanic Chain. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **5**(4), Q04008.
34. Zindler A., Hart S. (1986) Chemical geodynamics. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **14**, 493-571.

Permian-Triassic basalts from basement of the West Siberian basin from superdeep hole Yen-Yakhinskaya SG-7

S. V. Berzin, K. S. Ivanov, M. V. Zaitseva

Institute of Geology and Geochemistry Urals Branch of RAS

For the first time detailed mineralogical research of the Permo-Triassic basalt core samples of Yen-Yakhinskaya superdeep hole SG-7 from the depths of 7673 m, 8009 m and 8250 m was carried. The composition of minerals investigated. It is shown that the transformation of rock occurred in greenschist and prehnite-pumpellyite metamorphic facies at higher temperatures than today's reservoir temperatures. It is shown the proximity of a series of geochemical features to the samples of the Permo-Triassic basalts from other parts of the West Siberian plate, as well as to the trap basalts of rift phase of the Siberian platform. Isotopic ratios Pb were investigated, in one of the samples a significant effect of the tank PREMA and EM1 was revealed.

Key word: *West Siberian Basin, pre-Jurassic basement, Yen-Yakhinskaya SG-7, Siberian Trap Province, Permian-Triassic basalts, metamorphism, geochemistry of Pb isotopes.*

REFERENCES

1. Al'muhamedov A.I., Medvedev A.Ja., Zolotuhin V.V. (2004) Substantial evolution of the Permo-Triassic basalts of the Siberian platform in time and space. *Petrologiya*, **12**(4), 339-353. (In Russian)
2. Baturina T.P., Saraev S.V., Travin A.V. (2005) Carboniferous and Permo-Triassic volcanics in the junction zone of the Urals and Western Siberia. *Geol. Geofiz.*, **46**(5), 504-516. (In Russian)
3. Bochkarev V.S., Brehuntsov A.M., Ivanov K.S. (2013) The main results of deep drilling wells (SG-6 Tyumen and SG-7-Yong Yakhinskoye) in Western Siberia. *Gornye vedomosti*, (12), 6-30. (In Russian)
4. Bochkarev V.S., Papin Yu.S. (2000) Trias Siberia and the problem of defining its borders geochronology. *Metallogenija i poleznye iskopaemye. Mat-ly regional'noj konferentsii geologov Sibiri, Dal'nego Vostoka, i Severo-Vostoka Rossii. T. 2.* [Metallogeny and Mineral Resources: Proceedings of a regional conference of geologists in Siberia, the Far East and North-East of Russia. T. 2]. Tomsk, TPU, 321-323. (In Russian)
5. Gusev G.S., Mints M.V., Musatov D.I. i dr. (1991) *Metodika geodinamicheskogo analiza pri geologicheskoy kartirovanii* [Methods of geodynamic analysis for geological mapping]. Moscow, IMGRE, 204 p. (In Russian)
6. Dobretsov N.L. (2005) Largest igneous provinces of Asia (250 million years) Siberian and Emeishan traps (plateau basalts) and associated granitoids. *Geol. Geofiz.*, **46**(9), 870-890. (In Russian)
7. Dobretsov N.L., Vladimirov A.G., Kruk N.N. (2005) Permian-Triassic magmatism Altai-Sayany folded region as a reflection of the Siberian superplume. *Dokl. Akad. Nauk*, **400**(4), 505-509. (In Russian)
8. Ekhlakov Yu.A., Ugryumov A.N., Brehuntsov A.M., Bochkarev V.S., Kucherov G.G., Gorbachev V.I. (2005) Features of the geological structure of the pre-Jurassic complex of West Siberia in connection with oil and gas content. *Gornye vedomosti*, (2), 28-37. (In Russian)
9. Ivanov K.P., Ivanov K.S., Fedorov Yu.N. (2007) Geochemistry of Triassic volcanic rocks of the West Siberian Plate (on the example of the Turin series). *Geodinamika, magmatizm, metamorfizm i rudoobrazovaniya* [Geodynamics, magmatism, metamorphism and mineralization]. Ekaterinburg, IGG UB RAS, 767-790. (In Russian)

10. Kirichkova A.I. (2011) *Osobennosti litologii kontinental'nogo triasa Zapadnoj Sibiri* [Features of the lithology of the continental Triassic of West Siberia]. *Neftegazovaja geologija. Teorija i praktika*, **6**(1), 28 p. (In Russian) http://www.ngtp.ru/rub/2/3_2011.pdf
11. Kremenetskii A.A., Gladkii V.S. (1997) Low-K tholeiitic basalt – an indicator of the evolution paleogeodynamic environments and prediction of hydrocarbon raw materials (according to the Tyumen ultradeep well SG-6). *Geohimiya*, (6), 609-617. (In Russian)
12. Medvedev A.Ya., Al'muhamedov A.I., Kirda N.P. (2003) Geochemistry of Permo-Triassic volcanics of Western Siberia. *Geol. Geofiz.*, **44**(1-2), 86-100. (In Russian)
13. Mogucheva N.K. (2005) New data on the stratigraphy of the Triassic of West Siberia. *Gornye vedomosti*, (12), 84-88. (In Russian)
14. Myasnikova G.P., Oksenoid E.E. (2012) Some geological results of super-deep drilling in Western Siberia. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Neft' i gaz*, (3), 13-19. (In Russian)
15. Rundkvist D.V., Rjahovskij V.M., Mironov Yu.V., Pustovoj A.A. (2000) Is there a universal Sr-Nd-Pb-tracer of lower mantle plumes? *Dokl. Akad. Nauk*, **370**(2), 223-226. (In Russian)
16. Simanovich I.M., Gorbachev V.I. (2011) Catagenesis and dipping metamorphism of clastic and volcanic strata (the section uncovered parametric well SG-7, Yen-Yakhinskaya). *Litol. Polezn. Iskop.*, (1), 94-106. (In Russian)
17. Sobolev A.V., Krivolutskaja N.A., Kuz'min D.V. (2009) Petrology parental melts and mantle magma sources of the Siberian trap province. *Petrologiya*, **17**(3), 276-310. (In Russian)
18. Tectonic map of the basement of the West Siberian Plain (O.G. Geraud, A.E. Kontorovich, V.P. Korobeynikov, V.N. Kramnik, L.V. Smirnov). (2004) (Ed. V.S. Surkov). (In Russian)
19. Cabanis B., Lecolle M. (1989) Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8; un outil pour la discrimination des series volcaniques et la mise en evidence des processus de melange et/ou de contamination crustale. *C. r. Acad. Sci. Ser. 2*, **309**(20), 2023-2029.
20. Cathelineau M., Nieva D.A. (1985) Chlorite solid solution geothermometer. The Los Azufres (Mexico) geothermal system. *Contrib. Miner. Petrol.*, **91**(3), 235-244.
21. Hart S.R., Hauri E.H., Oschmann L.A., Whitehead J.A. (1992) Mantle Plumes and Entrainment: Isotopic Evidence. *Science*, **256**(5056), 517-520.
22. Haur E.H., Whitehead J.A., Hart S.R. (1994) Fluid dynamic and geochemical aspects of entrainment in mantle plumes. *J. Geophys. Res.*, **99**(B12), 24275-24300.
23. Ivanov A.V. (2010) Deep-level geodynamics: boundaries of the process according to geochemic and petrologic data. *Geodynamics & Tectonophysics*, **1**(1), 87-102.
24. Jowett E.C. (1991) Fitting iron and magnesium into the hydrothermal chlorite geothermometer. GAC/MAC/SEG Joint Annual Meeting. Program with Abstracts 16. Toronto, A62.
25. Kamber B.S., Gladu A.H. (2009) Comparison of Pb Purification by Anion-Exchange Resin Methods and Assessment of Long-Term Reproducibility of Th/U/Pb Ratio Measurements by Quadrapole ICP-MS. *Geostandards and Geoanalytical Res.*, **33**(2), 169-181.
26. Kranidiotis P., MacLean W.H. (1987) Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec. *Econ. Geol.*, **82**, 1898-1911.
27. Kuno H. (1968) Differentiation of basalt magmas. *Basalts: the poldervaart treatise on rocks of basaltic composition. V. 2. Interscience*. N. Y., 623-688.
28. Meschede M. (1986) A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chem. Geol.*, **56**, 207-218.
29. Mullen E.D. (1983) MnO/TiO₂/P₂O₅: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **62**, 53-62.
30. Plank T., Langmuir C.H. (1998) The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. *Chem. Geol.*, **145**, 325-394.
31. Sun S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, **42**, 313-345.
32. Wood D.A. (1980) The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **50**(1), 11-30.
33. Workman R.K., Hart S.R., Jackson M., Regelous M., Farley K.A., Blusztajn J., Kurz M., Staudigel H. (2004) Recycled metasomatized lithosphere as the origin of the Enriched Mantle II (EM2) end-member: Evidence from the Samoan Volcanic Chain. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **5**(4), Q04008.
34. Zindler A., Hart S. (1986) Chemical geodynamics. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **14**, 493-571.