

УДК 550.834:550.838.2:551.214.6(571.645)

КОМПЛЕКСНЫЕ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДВОДНОГО ВУЛКАНА ЛИСЯНСКОГО (КУРИЛЬСКАЯ ОСТРОВНАЯ ДУГА)

© 2022 г. Ю. И. Блох^а, *, В. И. Бондаренко^б, А. С. Долгаль^с, П. Н. Новикова^с, В. В. Петрова^д,
О. В. Пилипенко^е, В. А. Рашидов^а, **, А. А. Трусов^г

^аИнститут вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, бульвар Пийпа, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия

^бКостромской ГУ, ул. 1 Мая, 16, Кострома, 156961 Россия

^сГорный институт УрО РАН, ул. Сибирская, 78а, Пермь, 614007 Россия

^дГеологический институт РАН, Пыжевский пер., 7, стр. 1, Москва, 119017 Россия

^еИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия

^гАО «ГНПП Аэрогеофизика», Походный проезд, 19, Москва, 125373 Россия

*e-mail: yuri_blokh@mail.ru

**e-mail: rashidva@kscnet.ru

Поступила в редакцию 25.05.2022 г.

После доработки 10.06.2022 г.

Принята к публикации 27.06.2022 г.

Выполненные комплексные геолого-геофизические исследования подводного вулкана Лисянского, расположенного в Симуширской вулканической зоне Курильской островной дуги, показали, что нижние горизонты вулканической постройки сложены пироксен-роговообманково-плагиоклазовыми порфировыми базальтами, а верхние горизонты — пироксен-плагиоклазовыми андезибазальтами и андезитами. Впервые для данного вулкана выявлены отчетливые минералогические признаки фумарольно-гидротермальной деятельности. Высокие значения намагниченности базальтов обусловлены значительной концентрацией зерен титаномagnetита, имеющих псевдооднородную структуру. Образование подводного вулкана Лисянского, как и других вулканов Курильской островной дуги, происходило в период геомагнитных инверсий. В вулканической постройке выделены подводящие каналы субвертикального, северо-восточного и северо-западного направлений и периферические магматические очаги на глубинах около 1 км и 2.5–3 км. Максимальная эффективная намагниченность подводного вулкана Лисянского равна 3.8 А/м.

Ключевые слова: подводный вулкан Лисянского, Курильская островная дуга, комплексные геолого-геофизические исследования

DOI: 10.31857/S0203030622050030

К северо-западу от пролива Дианы в центральной части Курильской островной дуги (КОД) расположена сложно построенная долгоживущая Симуширская вулканическая зона, входящая в состав Расшуа-Симуширского звена [Подводный ..., 1992], протягивающаяся на 35–40 км в пределы Курильской глубоководной котловины (рис. 1).

Большая крутизна склонов и значительная высота подводных вулканов, развитых в этой зоне, а также высокая сейсмичность региона способствуют развитию здесь обвально-оползневых процессов. В районе Симуширской вулканической зоны обнаружено несколько крупных тел осадочных отложений, занимающих “висячее” положение на крутых склонах вулканических построек. Обрушение подобных тел может приводить к возникновению цунами.

В пределах Симуширской вулканической зоны находится подводный вулкан Лисянского (5.6, по [Подводный ..., 1992]), комплексному исследованию которого с помощью современного оборудования и современных компьютерных технологий и программных продуктов посвящена настоящая статья.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Первые сведения о подводном вулкане Лисянского приведены в работе московских океанологов [Безруков и др., 1958], где вулкан получил свое название в честь известного российского мореплавателя Юрия Федоровича Лисянского (1773–1837). Вулкан был пересечен двумя галсами эхолотного промера, а на его вершине обнаруже-

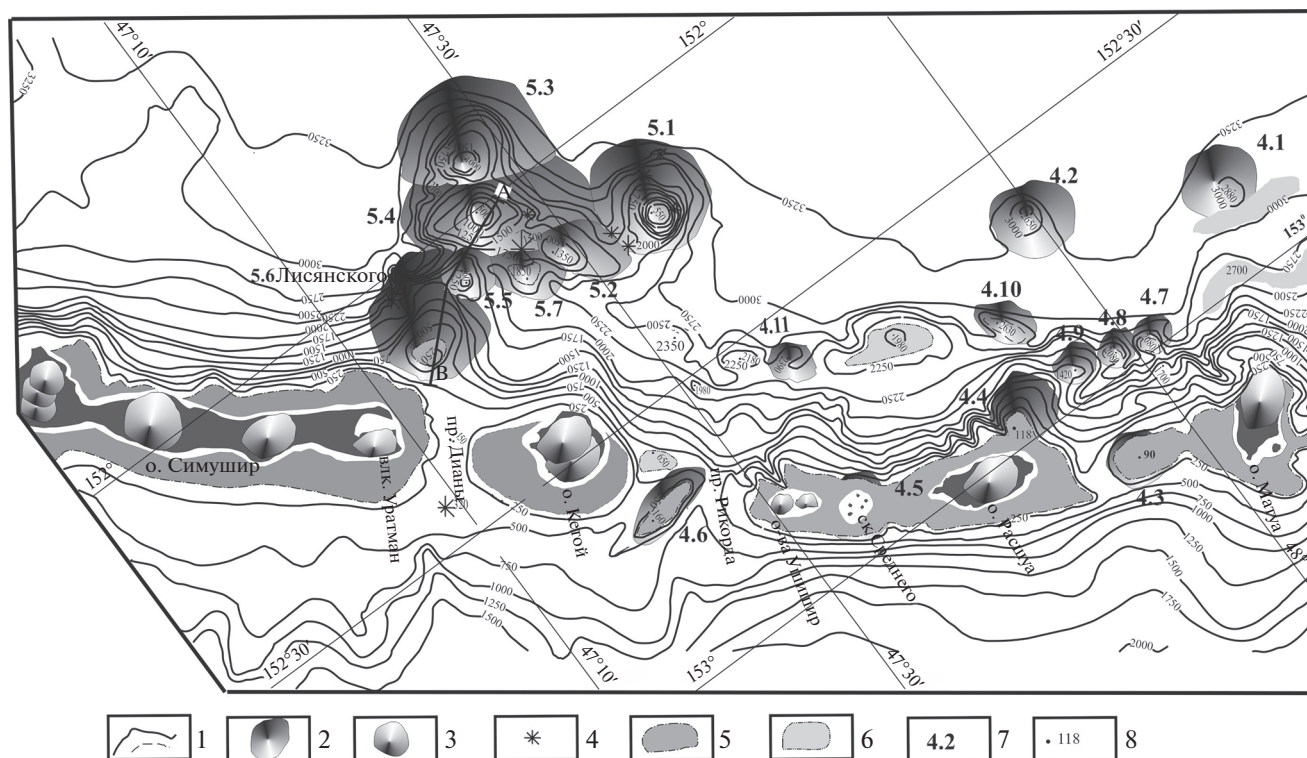


Рис. 1. Карта подводных вулканов Расшуа-Симуширского звена КОД.

1 — изобаты, м; 2 — подводные вулканы; 3 — наземные вулканы; 4 — предполагаемые небольшие побочные вулканические постройки; 5 — шельф и плоские вершины подводных вулканов на глубинах, соответствующих доголоценовому положению уровня моря (120–160 м); 6 — уплощенные участки рельефа дна на глубинах, превышающих величину голоценового повышения уровня моря; 7 — номера подводных вулканов, согласно [Подводный ..., 1992]; 8 — отличительные отметки глубин. А–В — профиль непрерывного сейсмоакустического профилирования, представленный на рис. 3.

ны пески, галька и валуны. Минимальная глубина, отмеченная на вершине, составляла 151 м.

Позднее в 1971 г. с борта научно-исследовательского судна (НИС) “Пегас” сахалинские ученые выполнили на вулкане Лисянского драгирование в интервале 500–200 м и подняли рогообманковые андезиты и двупироксеновые рогообманковые андезибазальты [Ерохов и др., 1975; Каталог ..., 1992; Кичина и др., 1980; Остапенко, 1976, 1978; Остапенко, Кичина, 1982]. Опробованные андезибазальты имеют порфировую и серийно-порфировую структуры, а андезиты — порфировую и гломерпорфировую структуры.

Судя по всему, профиль непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСП), отработанный в 1980 г. и проходящий через постройку подводного вулкана Лисянского, представлен в работах [Ломтев, Патрикеев, 2015а, 2015б].

Подводный вулкан Лисянского был исследован камчатскими учеными в 6 рейсах НИС “Вулканолог” в 1982–1991 гг.

В 15 рейсе НИС “Вулканолог” в 1982 г. на подводном вулкане Лисянского были выполнены три станции драгирования [Подводный ..., 1992]. Одна станция отработана у подножия вулкана на за-

паде в интервале 1650–1430 м, вторая — на северо-западном склоне в интервале глубин 450–250 м, а третья — на вершине в глубинном интервале 250–185 м (рис. 2а).

На вершине вулкана опробованы порфировые оливин-клинопироксен-плагиоклазовые андезибазальты и пироксен-плагиоклазовые андезиты, у подножия — оливин-клинопироксен-плагиоклазовые базальты (табл. 1). Состав всех пород относится к умеренно-калиевой серии нормального по щелочности ряда. Базальты и основные андезибазальты соответствуют толеитам, более кислые андезибазальты и андезиты — известково-щелочным породам [Подводный ..., 1992, табл. 1]. Эти данные хорошо совпадают с результатами, полученными сахалинскими учеными [Ерохов и др., 1975].

Остаточная намагниченность горных пород изменяется в диапазоне 6.6–21.6 А/м [Подводный ..., 1992, табл. 1].

В результате изучения драгированных в рейсах НИС “Вулканолог” образцов установлено, что для подводного вулкана Лисянского значение тяжелого изотопа кислорода $\delta^{18}\text{O}$ в образце андезибазальта В15-27/1 равно 7.2 [Покровский, Волюнец,

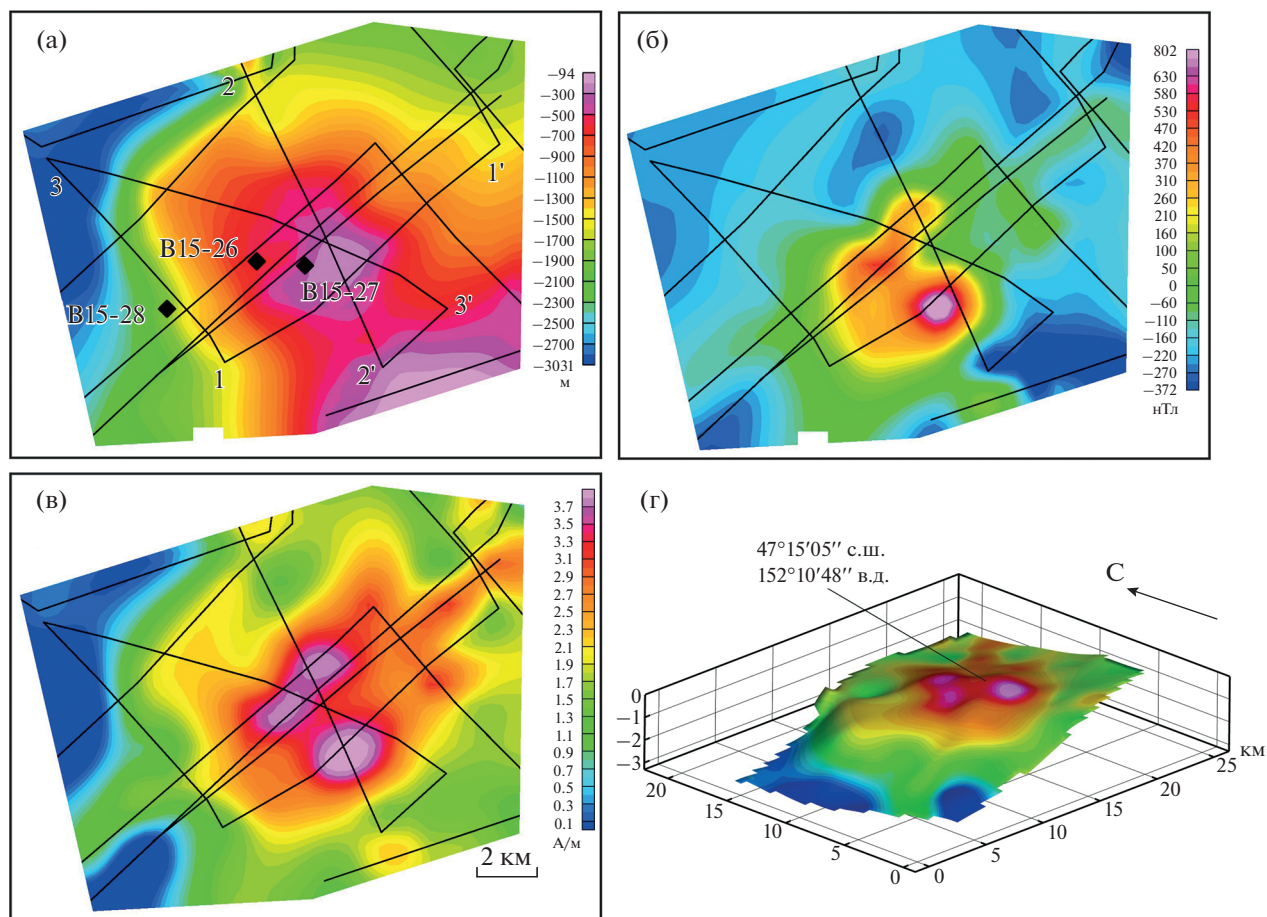


Рис. 2. Подводный вулкан Лисянского.

а – батиметрия; б – аномальное магнитное поле ΔT_a ; в – распределение эффективной намагниченности $J_{эф}$; г – распределение эффективной намагниченности $J_{эф}$, изображенное на поверхности вулкана. Цифрами обозначено местоположение профилей, приведенных на рис. 9. Ромбами обозначено местоположение драг.

1999]. Соотношение изотопов стронция $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ для этого образца равно 0.703306 ± 0.00003 , а изотопов неодима $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ – 0.513036 ± 0.000017 [Авдейко и др., 1986; Журавлев и др., 1985, 1986; Zhuravlev et al., 1987].

Концентрация радиоактивных элементов в лавах подводного вулкана Лисянского равна 1.0, 2.6 и 1.37 соответственно для урана, тория и калия, а соотношение $\text{Th}/\text{U} = 2.6$ [Пузанков и др., 1991]. Драгированные в 15 рейсе НИС “Вулканолог” породы содержат умеренное количество редкоземельных элементов, определенных только для одного образца [Антонов и др., 1987; Подводный ..., 1992], которые приведены в табл. 1.

Чтобы в дальнейшем при изучении подводных вулканов КОД избежать путаницы, необходимо отметить, что в работах [Авдейко и др., 1986; Журавлев и др., 1985, 1986; Покровский Волинец, 1999; Zhuravlev et al., 1987] результаты изучения изотопов образцов, драгированных на подводном вулкане 5.5 (см. рис. 1), по непонятным причинам,

отнесены к подводному вулкану Лисянского. В приложении к работе [Покровский, Волинец, 1999] перепутано название острова и ошибочно написано, что подводный вулкан Лисянского расположен в 10 км северо-западнее северного окончания о. Парамушир. В работе [Пузанков и др., 1991] подводному вулкану Лисянского вместо каталожного номера 5.6 [Подводный ..., 1992] присвоен номер 5.5.

Подводный вулкан Лисянского был изучен авторским коллективом с помощью эффективной технологии количественной интерпретации материалов гидромагнитной съемки в комплексе с эхолотным промером, непрерывным сейсмоакустическим профилированием и анализом петромагнитных свойств и химического состава драгированных горных пород [Блох и др., 2018, 2019, 2020б].

От о. Симушир подводный вулкан Лисянского отделяется понижением в рельефе дна до 550 м, от вулкана 5.5 – седловиной с глубинами до 1400 м. Вулкан имеет плоскую вершину (см. рис. 2а).

Таблица 1. Пороодообразующие (мас. %), редкие (ppm) и редкоземельные (ppm) элементы подводного вулкана Лисянского

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Обр. №	B15-28/1	B15-28/56	B15-28/4	B15-28/4	B25-28/5	B15-28/2	B15-28/3	B15-27/3	B15-27/4	B15-27/1	B15-27/1	B15-27/1	B15-27/8	B15-27/2
Содержание в мас. %														
SiO ₂	50.21	51.24	51.53	51.64	52.55	53.07	53.40	53.60	54.73	55.90	56.00	56.7	56.7	59.21
TiO ₂	0.84	0.83	0.93	0.82	0.95	0.81	0.83	0.88	0.85	0.69	0.71	0.71	0.83	0.75
Al ₂ O ₃	17.31	22.32	18.38	22.23	19.54	20.97	20.44	17.45	18.62	18.60	18.16	18.75	17.47	17.07
Fe ₂ O ₃	2.88	2.75	4.70	2.99	4.75	2.64	2.29	5.31	3.25	2.53	2.58	2.88	4.97	2.93
FeO	5.39	4.01	3.56	3.77	4.02	4.02	4.76	6.02	4.69	3.98	4.19	4.13	3.33	4.22
MnO	0.19	0.13	0.12	0.13	0.15	0.15	0.15	0.23	0.16	0.15	0.17	0.18	0.16	0.17
MgO	5.25	1.44	3.38	1.49	2.27	2.87	2.90	3.73	2.51	3.27	3.62	3.81	2.10	3.55
CaO	11.49	11.07	10.31	10.78	9.80	9.71	9.32	9.31	9.18	8.54	8.39	8.06	7.40	7.03
Na ₂ O	2.66	3.23	3.13	3.24	3.12	2.89	3.60	2.62	3.38	3.44	3.19	3.07	3.55	3.19
K ₂ O	0.95	1.34	1.12	1.33	1.17	1.39	1.45	0.51	1.17	1.43	1.44	1.36	0.95	1.77
P ₂ O ₅	0.19	0.21	0.19	0.20	0.15	0.24	0.21	0.11	0.12	0.20	0.25	0.27	0.17	0.19
п.п.п.	2.53	0.85	2.08	0.84	0.93	1.03	0.60	0.04	0.68	0.87	0.79	0.66	0.80	0.13
Сумма	99.88	99.41	99.44	99.45	99.41	99.31	99.95	99.76	99.34	99.60	99.93	100.58	99.81	100.15
Содержание в ppm														
S	—	0.0021	0.0033	0.0023	0.0031	—	—	—	0.0025	—	—	—	0.0034	—
CO ₂	—	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	—	—	—	0.30	—	—	—	0.47	—
As	270	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	—	—	—	<5.0	—	—	—	<5.0	—
Ba	45	308	283	294	246	310	360	н. обнар.	266	315	320	320	225	370
Co	81	13	22	15	21	17	21	28	18	18	32	—	17	20
Cr	76	7.4	55	8.0	5.0	17	20	3	16	140	32	—	15	19
Cu	—	60	117	49	84	70	75	63	41	57	55	—	67	17
Ga	—	20	18	18	18	—	—	—	17	—	—	—	15	—
Mo	—	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0	—	—	1.0	<2.0	—	1.0	—	<2.0	1.0
Nb	88	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0	—	—	—	<2.0	—	3.1	—	<2.0	2.3
Ni	—	8.9	23	11	8.7	12	21	16	10	10	24	—	10	18
Pb	18	7.4	7.6	6.6	7.7	—	—	4.6	7.5	—	6.0	—	7.5	6.3
Rb	—	35	26	38	26	30	32	7	24	37	31.3	26	21	28
Sc	500	<100	107	<100	<100	—	—	—	<100	—	—	—	<100	—
Sr	—	507	420	502	435	590	560	320	403	460	500	500	327	400

Таблица 1. Окончание

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Обр. №	B15-28/1	B15-28/56	B15-28/4	B15-28/5	B25-28/6	B15-28/2	B15-28/3	B15-27/3	B15-27/4	B15-27/1	B15-27/1	B15-27/1	B15-27/8	B15-27/2
Th	—	3.1	3.0	3.5	<2.0	—	—	—	2.0	—	2.3	—	<2.0	2.9
U	395	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0	—	—	—	<2.0	—	0.95	—	<2.0	1.5
V	—	211	290	205	298	260	325	380	243	220	310	—	212	240
Y	74	21	22	22	22	—	—	—	22	88	—	18	28	—
Zn	—	66	87	61	96	92	72	190	135	—	125	—	66	140
Zr	—	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	—	—	—	<5.0	—	185	—	<5.0	180
Li	5	—	—	—	—	7	7	6	—	—	7	—	—	10
Sn	—	—	—	—	—	—	—	2/3	—	—	2.1	—	—	2.3
W	0.66	—	—	—	—	—	0.33	0.24	—	—	0.33	—	—	0.39
Be	0.60	—	—	—	—	0.75	0.60	0.65	—	—	0.50	—	—	1.00
B	25	—	—	—	—	25	29	28	—	—	32	—	—	19
F	250	—	—	—	—	290	370	330	—	—	700	—	—	250
Ta	—	—	—	—	—	—	—	0.1	—	—	н. обнар.	—	—	0.1
Hf	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.5	—	—	4.0
La	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	12	—	—
Ce	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	27	—	—
Pr	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3.4	—	—
Nd	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	13.0	—	—
Sm	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4.5	—	—
Eu	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.72	—	—
Gd	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3.5	—	—
Dy	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3.2	—	—
Ho	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.66	—	—
Er	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.4	—	—
Yb	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.4	—	—

Примечание. Анализы 1, 6–8, 11, 14 – из работы [Подводный ..., 1992]; анализ 10 – из работы [Zhuravlev et al., 1987], анализ 12 – из работы [Антонов и др., 1987]; анализы 2–5, 9, 13 выполнены в химической лаборатории Геологического института РАН методом рентгенофазового анализа (зав. лабораторией С.М. Ляпунов). н. обнар. – компонент не обнаружен; “—” – компонент не определяется.

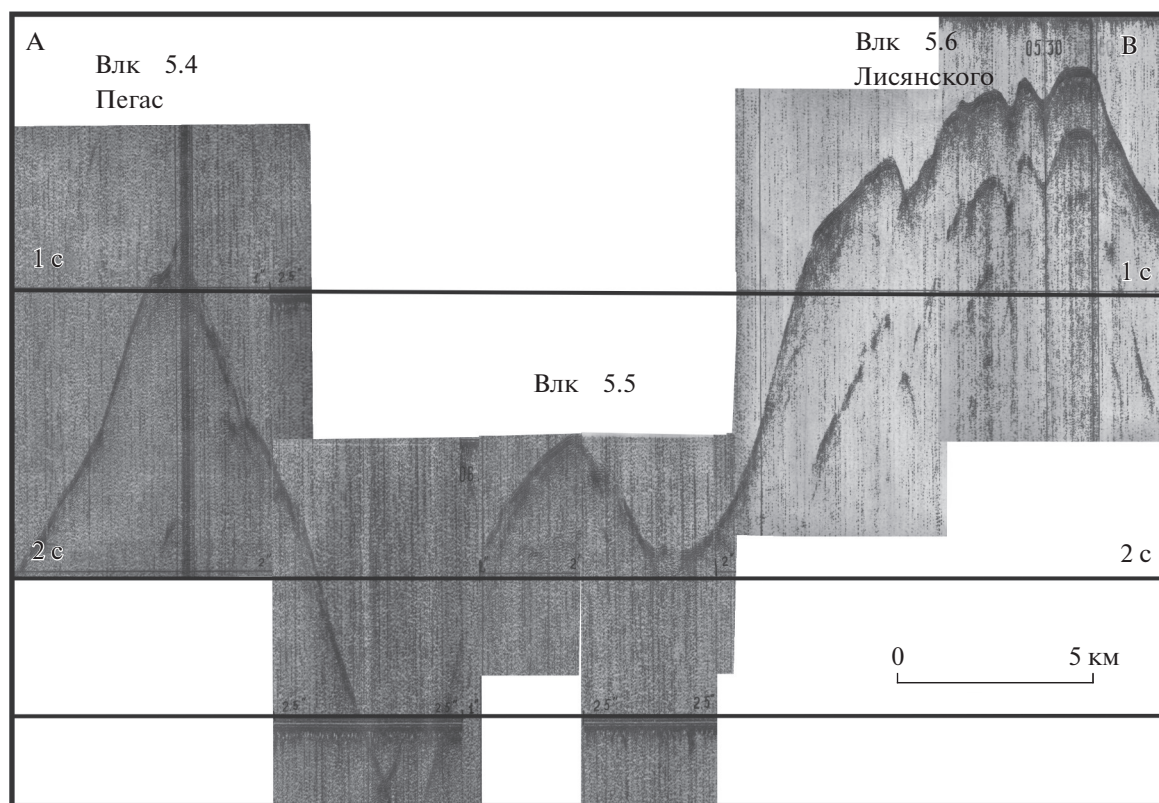


Рис. 3. Фрагмент профиля НСП через подводные вулканы Пегас (5.4), 5.5 и Лисянского (5.6) в 4.45–7.00 23.10.1978 г. Местоположение профиля представлено на рис. 1.

Минимальная зарегистрированная глубина вершины в ее юго-восточной части достигает 160 м, что на 9 м меньше определенной московскими океанологами [Безруков и др., 1958]. Плоская вершина наклонена к северо-западу. Угол наклона ее — 3° – 5° . Северо-западный край ее погружается до глубины 350–400 м. Далее к северо-западу эта поверхность небольшой ложбиной глубиной 100–150 м отделяется от еще одного участка плоской наклонной поверхности дна. Этот участок прослеживается на глубинах от 40–450 м до 600–700 м. Угол наклона дна здесь несколько больше — 5° – 7° . На западном склоне уплощенная наклонная поверхность дна с углами наклона 7° – 10° прослеживается от глубин 450–500 м до глубины 1000–1050 м. Нижние части склонов очень крутые — до 15° – 25° . На западе они погружаются до глубины около 2500 м, на севере — 1700–1800 м. У западного подножия вулкана по данным НСП выделяются два небольших холма, характеризующихся сильным рассеянием сейсмических сигналов, по-видимому, существенно лавовые побочные вулканические конусы или экструзии (рис. 3). Восточный склон обрезан сбросами, вследствие чего он имеет ступенчатый профиль, с углами наклона уступов до 25° – 30° .

Судя по характеру сейсмоакустического изображения на сейсмограммах НСП, вулкан Лисянского в основном сложен плотными эффузивными породами. Рыхлые осадочные или вулканогенно-осадочные отложения практически отсутствуют. Лишь плоская вершинная поверхность может быть перекрыта маломощным слоем осадочных отложений. Западное подножие вулкана перекрывается довольно мощной толщей осадочных отложений (до 0.6 с удвоенного времени распространения сигнала), что может указывать на его довольно древний возраст. Об этом же свидетельствуют положение и морфология вершинной части вулкана.

По-видимому, плоская вершинная поверхность сформировалась в результате абразии в приповерхностных условиях. В настоящее время эта поверхность наклонена к северо-западу и располагается на глубинах от 151 до 400 м. Еще один плоский участок дна, также с наклоном к северо-западу, располагается на глубинах от 450–500 м до 1000 м. Вряд ли можно связывать формирование этих поверхностей с позднеплейстоценовым понижением уровня моря, т. к. в этом случае придется допустить очень значительное, не менее 300 м, погружение северо-западного края привершинной плоской поверхности в голоцене. Скорее всего, вулкан Лисянского имеет дочетвер-

тичный возраст. Судя по всему, он образован двумя тесно слившимися вулканическими конусами, поднимавшимися до уровня моря. В результате абразии их вершины были срезаны и образовались плоские поверхности. Затем произошло значительное асимметричное погружение массива. Амплитуда погружения увеличивается в северо-западном направлении — от нескольких десятков метров на юго-восточном краю плоской вершинной поверхности юго-восточного вулкана до 1000 м или даже больше на северо-западной окраине вулкана.

Диаметр основания подводного вулкана Лисянского 10–12 км, а объем $\sim 30 \text{ км}^3$ [Блох и др., 2020а, 2020в; Подводный ..., 1992].

В дополнение к имеющимся анализам горных пород [Подводный, 1992] нами выполнены химические анализы еще 6 драгированных образцов (см. табл. 1). Нужно отметить, что анализы, опубликованные ранее, по сравнению с нашими, охватывают более широкий диапазон химических составов драгированных лав. Тем не менее, химизм всех пород соответствует базальтам, андезибазальтам и андезитам (рис. 4). Из анализов, впервые публикуемых в настоящей статье, один состав (обр. В15-27/4) отвечает андезибазальту, другой (В15-27/6) относится к андезиту, а остальные четыре анализа попадают в пограничную зону базальт-трахибазальт-андезибазальт с некоторым тяготением к составу базальта.

Петрографическая классификация пород может несколько отличаться от химической. В петрографической номенклатуре учитываются колебания в количестве вкрапленников и основной массы, их минеральный состав, в частности присутствие или отсутствие оливина, ромбического пироксена, роговой обманки, биотита, состав плагиоклаза, а также степень преобразования исходной породы. В связи с этим изученные вулканы можно разделить на три типа: 1) базальты и андезибазальты пироксен-плагиоклазовые с рудным минералом и небольшим и переменным количеством оливина, средне-крупнопорфировый, отношение вкрапленники/основная масса от 1/1 до 1/5 (образцы В15-27/4, В15-27/8, В15-28/4). Образец В-15-28/4 отличается более высокой пористостью, присутствием единичных измененных кристаллов роговой обманки и гидротермально проработан (стекло основной массы полностью замещено хлоритом. Хлорит так же имеет место быть в свободных пространствах). Вероятно, это краевая часть потока. Образец В15-27/8, также значительно затронут поздними процессами, что хорошо видно по измененным кристаллам рудного минерала (рис. 5); 2) базальт пироксен-плагиоклазовый с небольшим количеством рудного минерала, без оливина и без роговой обманки, порфировый. Отношение вкрапленни-

ки/основная масса изменяется от 1.1 до 1.5 (образцы В15-28/5а и В15-28/6); 3) базальт и андезибазальт пироксен-роговообманково-плагиоклазовый с рудным минералом и, возможно, единичными кристаллами оливина и биотита. Слабо порфировый. Отношение вкрапленники/основная масса составляет 3/1 (образцы В15-28/5б и В-15-27/6).

Представляется, что наиболее ранней и глубинной является порода первого типа. Более низкотемпературный и менее глубокого заложения — безоливиновый базальт второго типа. Роговообманковая порода, вероятно, самая поздняя, дайковая или субповерхностная. Хлоритизация пород и окисление рудных компонентов свидетельствуют о наличии поздних фумарольно-гидротермальных проявлений (рис. 6).

Выполненные петромагнитные исследования 6 образцов драгированных пород показали, что остаточная намагниченность изменяется в широком диапазоне от 1.66 до 18.93 А/м (табл. 2), что хорошо согласуется с данными предыдущих исследований [Подводный ..., 1992]. Высокие значения намагниченности обусловлены содержанием высокой концентрации кристаллов титаномагнетита (объемная концентрация ферромагнетика достигает 1.78%, магнитная восприимчивость изменяется в диапазоне $(8-44) \times 10^{-3} \text{ СИ}$). Породы содержат низкокоэрцитивные магнитные зерна ($B_{\text{сг}} = 18.5-28.2 \text{ мТл}$) с невысокой степенью окисления (медианное магнитное поле изменяется от 5 до 22 мТл).

Зерна титаномагнетита в большинстве исследованных образцов имеют невысокую степень окисления (медианное магнитное поле изменяется от 5 до 22 мТл). Фактор Кёнигсбергера изменяется в диапазоне от 1.49 до 13.61, степень магнитной анизотропии образцов невысокая и не превышает 4%. Возможно, кристаллизация базальта имела место во внешних частях лавовых потоков.

Терромагнитный анализ (ТМА) по температурной зависимости магнитного момента насыщения $M_s(T)$ шести образцов, драгированных с подводного вулкана Лисянского, показал, что образцы разбиваются на три группы (рис. 7).

В первой группе образцов (В15-27/4, В15-28/4, В15-28/5а) на кривой первого нагрева присутствует два перегиба, соответствующие двум диапазонам температур: 210–350°C и 350–500°C. Эти два диапазона отвечают содержанию титана X в титаномагнетите $\text{Fe}_{(3-X)}\text{Ti}_X\text{O}_4$ соответственно: 0.3–0.5 и 0.09–0.3 (см. рис. 7, жирная кривая). После нагрева до 700°C на кривой второго нагрева имеет место единственный перегиб, температура которого лежит в диапазоне 500–550°C, приближаясь к температуре Кюри магнетита (тонкая кривая). Кривая второго нагрева проходит выше кривой первого нагрева. В этих образцах имеют место две генерации титаномагнетита с высоким

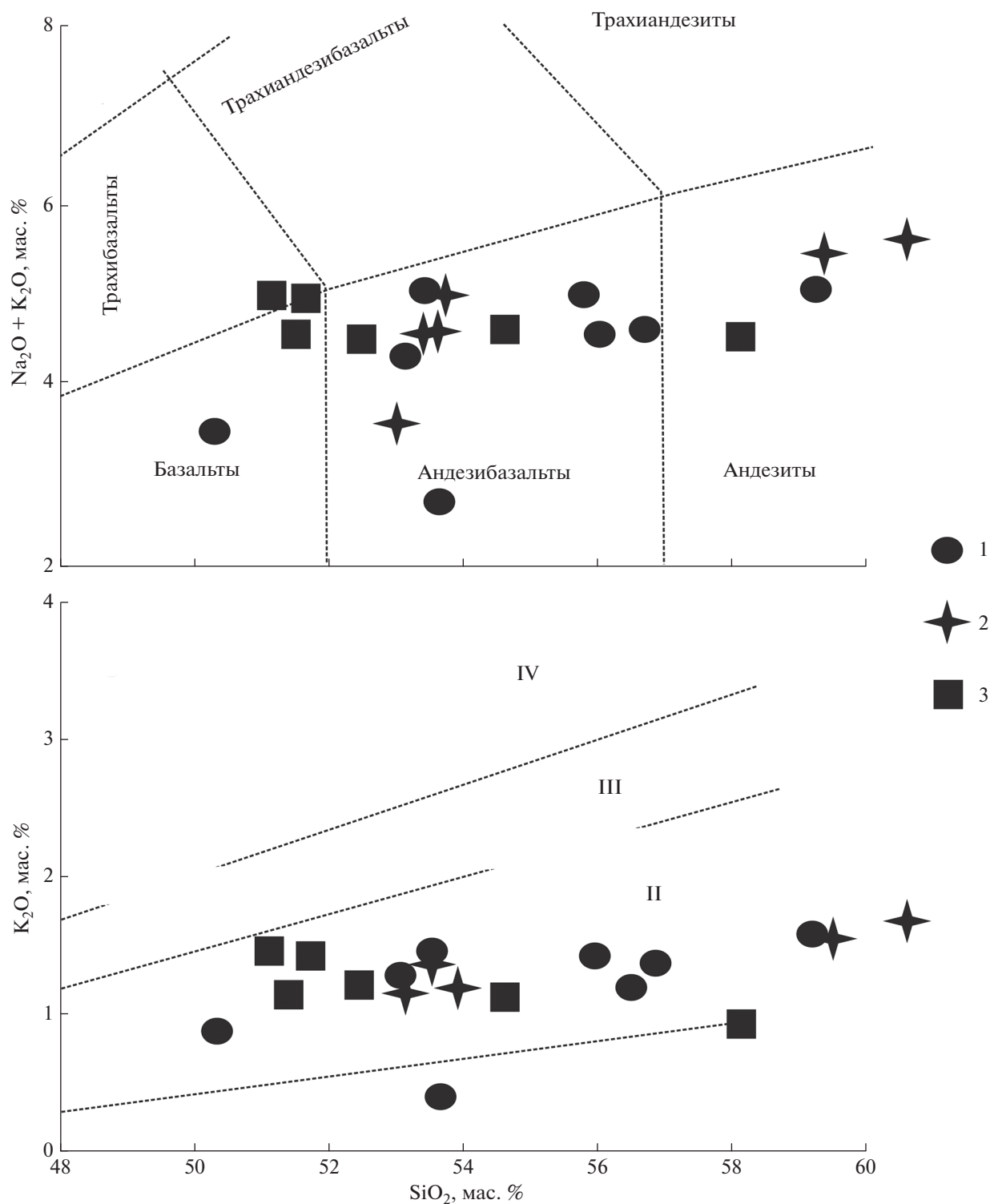


Рис. 4. Классические классификационные диаграммы вулканических пород ряда базальт–андезибазальт–андезит. 1 – данные из работ [Антонов и др., 1987; Подводный ..., 1992; Zhuravlev et al., 1987]; 2 – данные из работы [Ерохов и др., 1975]; 3 – данные авторов настоящей статьи. I – низкокалиевые, II – умереннокалиевые, III – высококалиевые и IV – щелочные вулканы, согласно [Pecerrillo, Taylor, 1976].

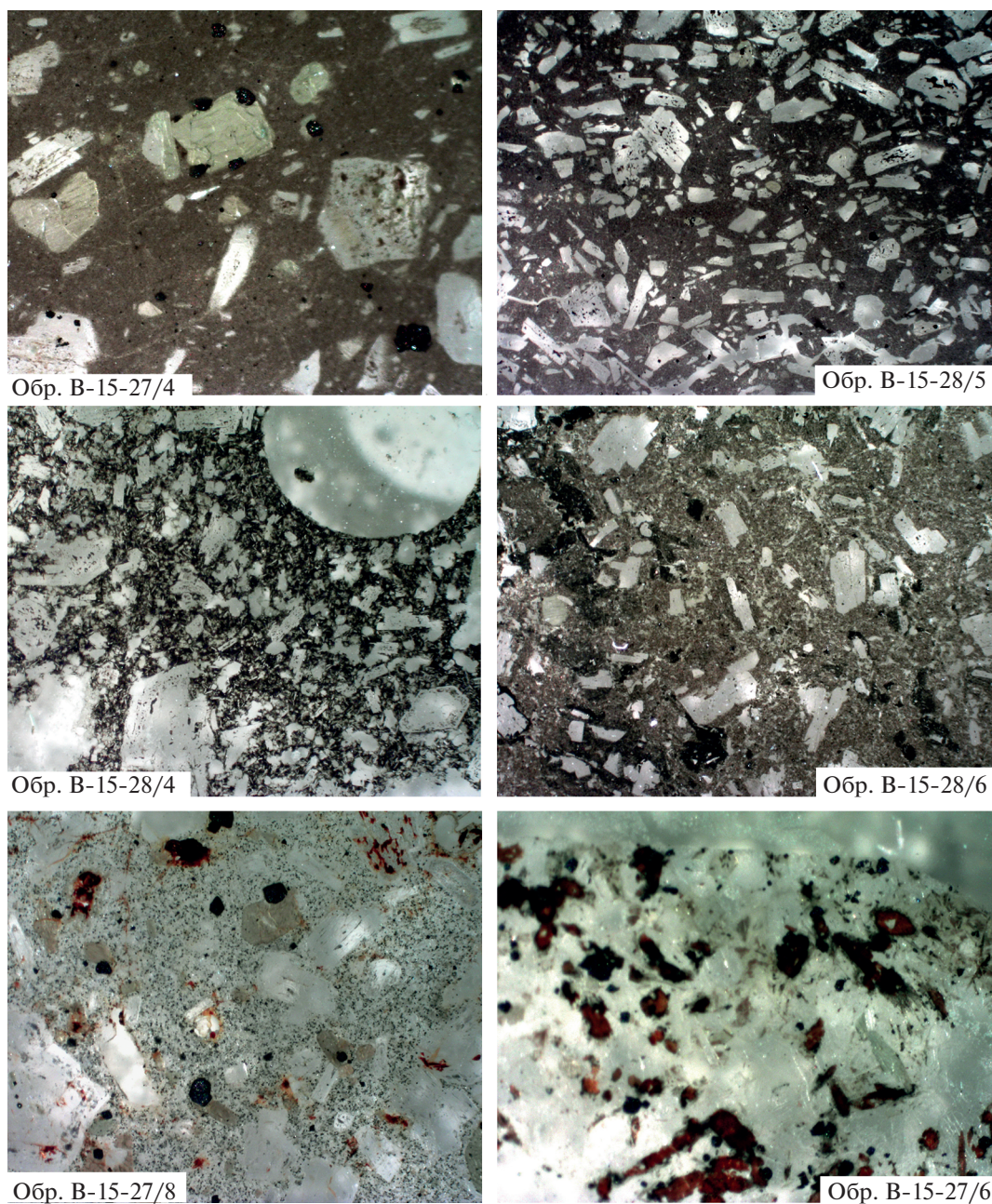


Рис. 5. Структуры базальтов и андезибазальтов.

и низким содержанием титана. В ходе нагрева происходит гетерофазное разложение титаномагнетита до титаномагнетита с меньшим содержанием титана и ильменита.

Во второй группе образцов (В15-27/6, В15-27/8) на кривой первого нагрева имеет место единственная точка Кюри, лежащая в диапазоне 500–550°C, приближающаяся к точке Кюри магнетита и отвечающая титаномагнетиту с низким содержанием титана $X: 0.02–0.09$ формульных единиц (ф. е.). Кривая второго нагрева проходит ниже

кривой первого нагрева, необратима и имеет перегиб в районе 550–580°C. В ходе нагрева в этом образце произошло однофазное окисление титаномагнетита до маггемита.

В третью группу попал образец В15-28/6. На кривой нагрева имеет место единственная точка Кюри 400°C, отвечающая содержанию титана $X = 0.23$ ф. е. в титаномагнетите $Fe_{(3-X)}Ti_XO_4$. Кривая второго нагрева проходит выше кривой первого нагрева, необратима и имеет единственную точку Кюри в районе 500°C, соответствующую

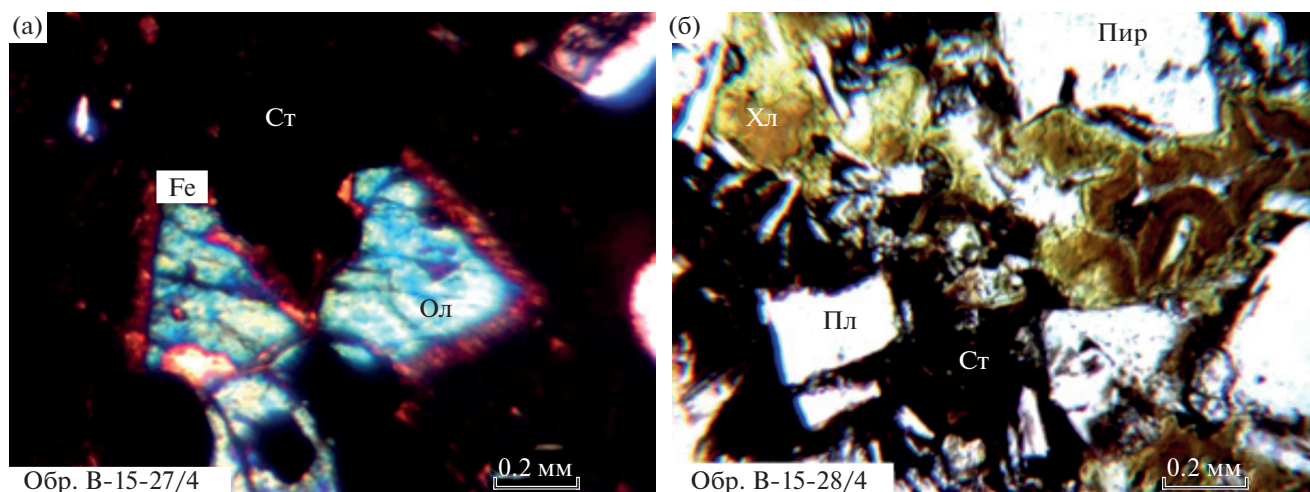


Рис. 6. Позднее преобразование базальтов.

а – оторочки гидроксидов железа вокруг вкрапленников оливина; б – развитие хлоритовых оторочек внутри свободных пространств в базальте. Ст – стекло, Ол – оливин, Пир – пироксен, Пл – плагиоклаз, Хл – хлорит.

низкому содержанию титана $X = 0.09$ ф. е. В этом образце в ходе нагрева произошло гетерофазное разложение титаномагнетита с относительно высоким содержанием титана на титаномагнетит, по своему составу приближающийся к магнетиту, и ильменит.

Петромагнитные исследования хорошо согласуются с петрографическими. Как показано выше образцы В-15-27/4 и В-15-28/4 (первый петромагнитный тип) предположительно относятся к оливинсодержащим породам наиболее глубинно-

го генезиса, образец В15-18/6 (третий петромагнитный тип) характеризует породы менее глубинного генезиса. В их составе отсутствуют как оливин, так роговая обманка. Образцы В15-27/8 и В15-27/6 (второй петромагнитный тип) сильно гидротермально изменены, что хорошо видно на фото (см. рис. 6).

К подводному вулкану Лисянского приурочена положительная магнитная аномалия ΔT_a , осложненная несколькими локальными экстремумами с размахом ~ 1300 нТл (см. рис. 26).

Таблица 2. Петромагнитные характеристики драгированных образцов горных пород, слагающих подводный вулкан Лисянского

№ образца	Jn, А/м	α , 10^{-3} СИ	Qn	P'	$B_{0.5}$, мТл	Mrs, $\mu A \cdot m^2$	Ms, $\mu A \cdot m^2$	Mrs/Ms	Bcr, мТл	Bc, мТл	Bcr/Bc	Структура	C, %
B15-27/4-1	10.30	28.87	8.96	1.034	6.16	33.93	280.30	0.1	22.3	7.9	2.8	PSD	0.46
B15-27/4-2	1.73	29.11	1.49	1.041									0.3
B15-27/6-1	2.85	15.96	4.49	1.010	69.09	21.62	256.00	0.1	28.2	8.8	3.2	PSD	0.89
B15-27/6-2	2.328	28.5	2.05	1.006									
B15-27/8-1	1.927	30.64	1.58	1.021	7.43	52.33	681.90	0.1	18.5	5.7	3.2	PSD	1.78
B15-27/8-2	1.665	26.34	1.59	1.020									
B15-28/4-1	3.395	7.525	11.34	1.010	22.07	53.24	227.70	0.2	25.4	14.4	1.8	PSD	0.09
B15-28/4-2	1.657	7.114	5.85	1.003									0.18
B15-28a/5-1	10.02	18.5	13.61	1.013	4.57	81.86	309.80	0.3	19.1	10.5	1.8	PSD	0.53
B15-28a/5-2	7.842	17.18	11.47	1.006									0.17
B15-28/6-1	18.93	42.98	11.07	1.033	11.53	101.8	783.80	0.1	23.4	7.9	3.0	PSD	1.17
B15-28/6-2	13.04	43.6	7.51	1.020									

Примечание. Jn – естественная остаточная намагниченность; α – магнитная восприимчивость; Qn – фактор Кёнигсберга, P' – степень анизотропии магнитной восприимчивости; Bcr – остаточная коэрцитивная сила; $B_{0.5}$ – медианное поле; Bc – коэрцитивная сила; Mrs – остаточный магнитный момент насыщения; Ms – магнитный момент насыщения; PSD – псевдо-однодоменные зерна; C – объемная концентрация ферромагнетика.

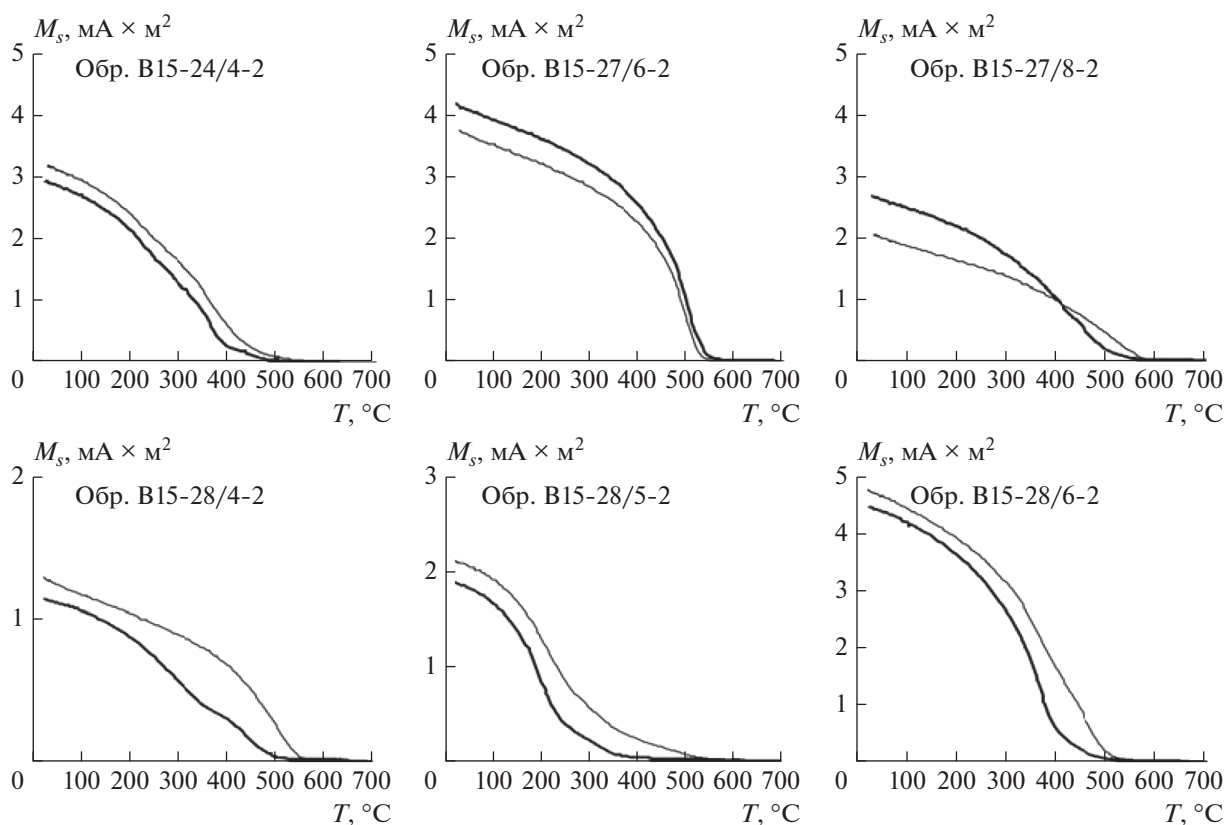


Рис. 7. Термоманитные кривые $M_s(T)$ для подводного вулкана Лисянского.

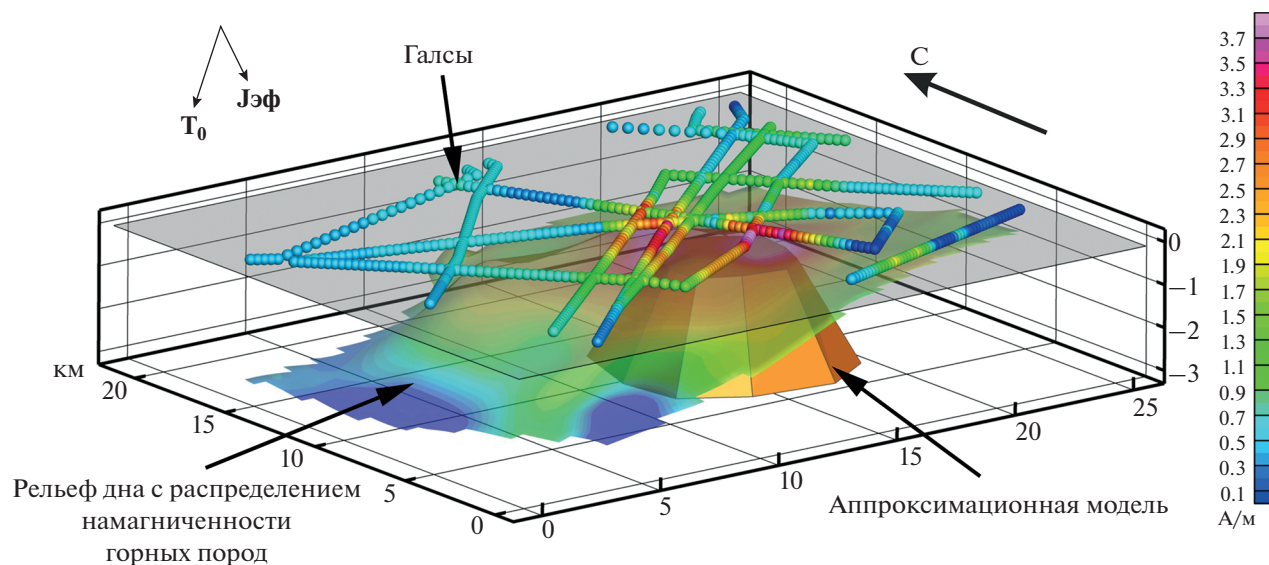


Рис. 8. Уточнение направления вектора эффективной намагненности $J_{\text{эф}}$ подводного вулкана Лисянского с помощью программы ИГЛА.

С помощью программы ИГЛА [Блох, Трусов, 2007] установлено, что вектор эффективной намагненности горных пород $J_{\text{эф}}$ имеет склонение 72.2° , наклонение 43.1° и развернут относи-

тельно нормального магнитного Земли на 49° (рис. 8), что свидетельствует о приуроченности времени образования подводного вулкана Лисянского, как и других вулканов КОД [Блох и др.,

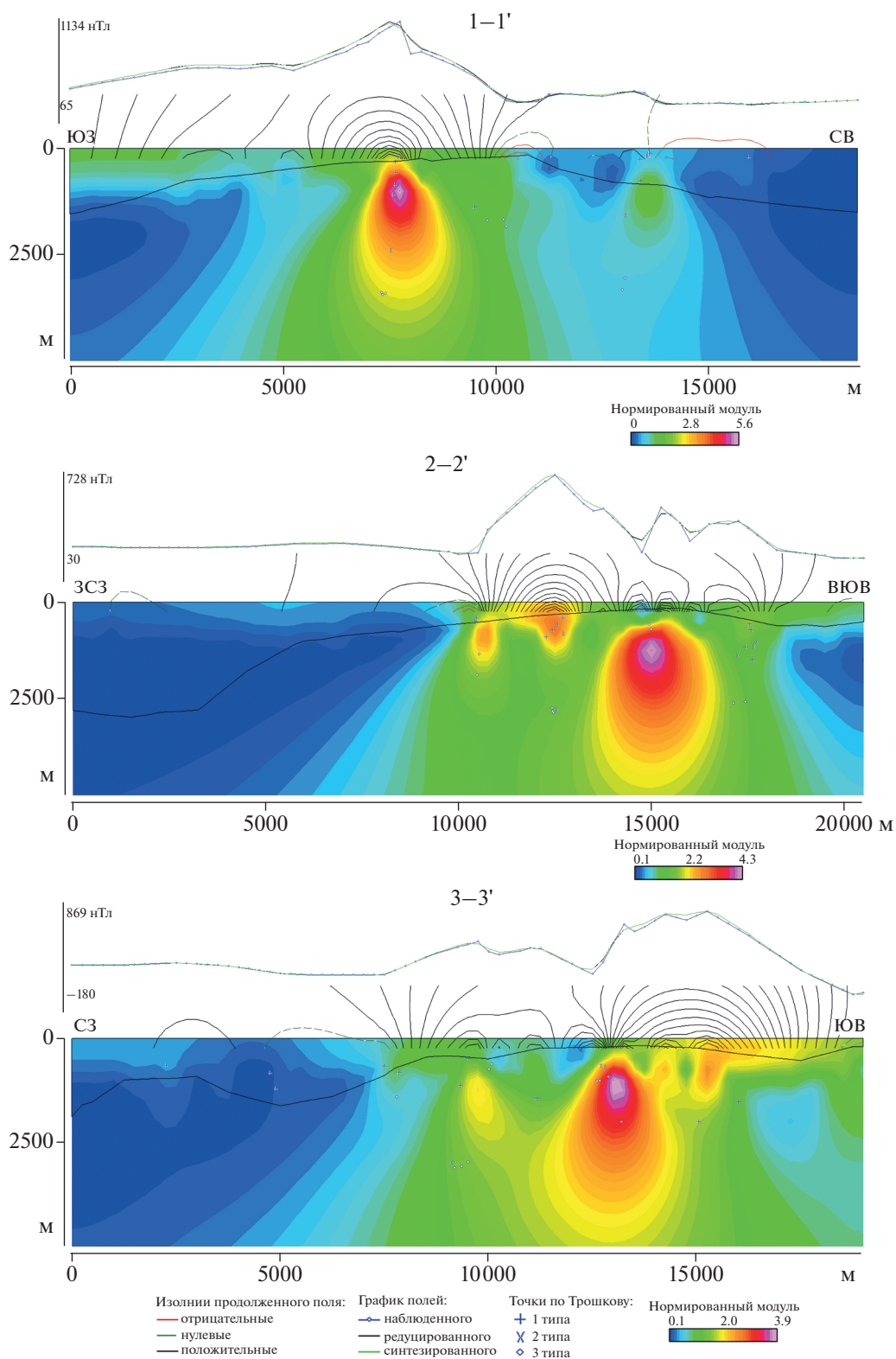


Рис. 9. Изображение, синтезированное системой СИНГУЛЯР для локализации особых точек функции, описывающее аномальное магнитное поле ΔT_a подводного вулкана Лисянского, наложенное на рельеф дна. Местоположение профилей представлено на рис. 2а.

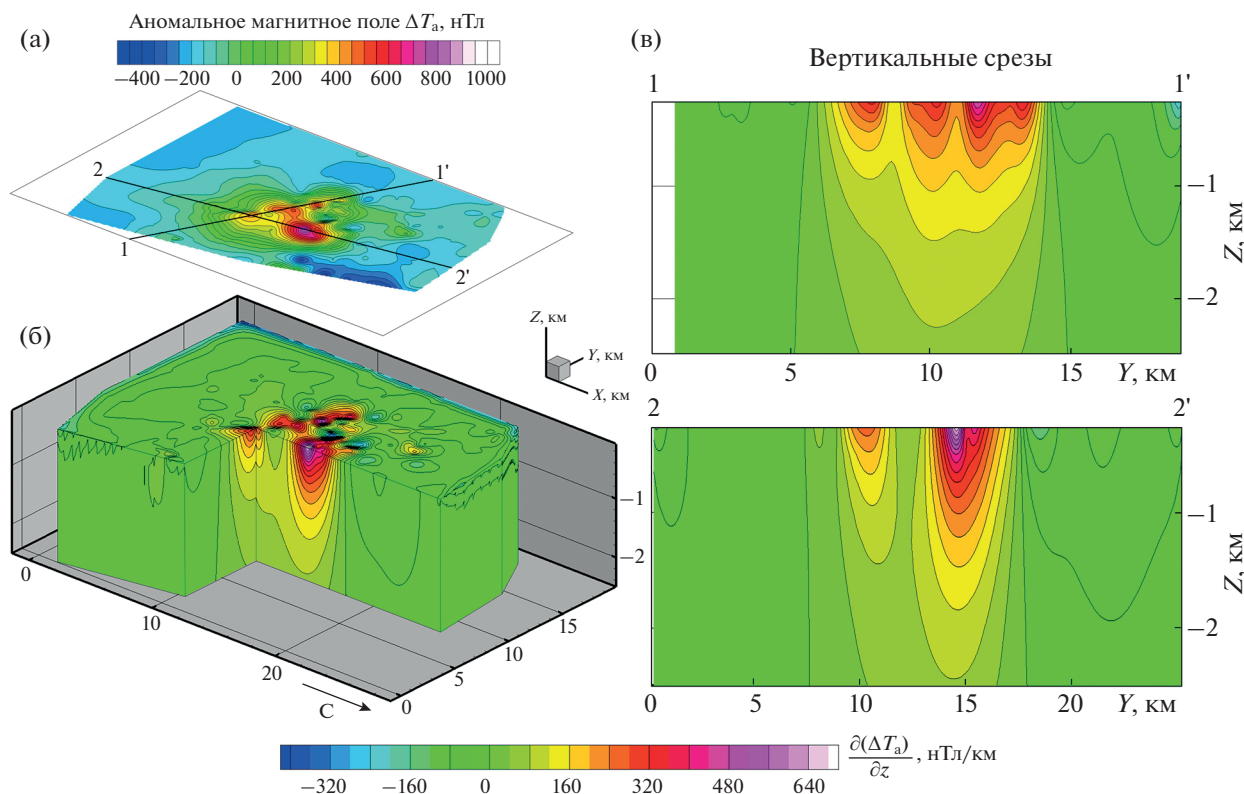


Рис. 10. Томографическая интерпретация аномального магнитного поля подводного вулкана Лисянского. Изолинии аномального магнитного поля ΔT_a (а), 3D-диаграмма, отражающая пространственное распределение квазинамагниченности горных пород, составляющих постройку подводного вулкана Лисянского (б), и ее вертикальные срезы (в).

2015, 2018, 2019, 2020б, 2021а, 2021б], к периоду геомагнитных инверсий.

Анализ особых точек функций с помощью интегрированной системы СИНГУЛЯР [Блох и др., 1993, 2021а] показал приуроченность основных особенностей функций, описывающих аномальные поля, к верхней кромке вулканических пород, а также позволил предположить наличие подводящих каналов субвертикального, северо-восточного и северо-западного направлений, и периферических магматических очагов на глубинах около 1 км и 2.5–3 км (рис. 9).

Трехмерное моделирование вулканической постройки с помощью пакета структурной интерпретации гравитационных и магнитных аномалий СИГМА-3D [Бабаянц и др., 2004] показало, что максимальная эффективная намагниченность подводного вулкана Лисянского составляет 3.8 А/м (см. рис. 2в, г), что хорошо согласуется с данными петромагнитных исследований. При этом среднеквадратическая погрешность подбора аномального магнитного поля после 93 итераций оказалась равной 29 нТл. Участки максимальной намагниченности вулканической постройки приурочены к ее вершине, а также к северному и се-

веро-западным участкам привершинной части склонов.

Томографическая интерпретация, направленная на изучение глубинного строения подводного вулкана Лисянского, была осуществлена с использованием первой вертикальной производной магнитного поля. На 3D-диаграмме выделена линейная область с четырьмя локальными субвертикальными положительными зонами, прослеживающимися до эффективной глубины 1 км (рис. 10). На юго-востоке можно выделить еще одну обособленную интенсивную субвертикальную положительную зону с эффективной глубиной залегания нижней кромки порядка 2 км. На одном из вертикальных срезов возможно проследить взаимный наклон зон линейной области и обособленной зоны и предположить, что все выделенные объекты могут иметь один генезис.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных комплексных геолого-геофизических исследований получены новые сведения о строении подводного вулкана Лисянского, петромагнитных свойствах горных по-

род, слагающих вулканическую постройку, их химическом и минеральном составе.

На вершине вулкана опробованы порфировые оливин-клинопироксен-плагиоклазовые андезит-базальты и пироксен-плагиоклазовые андезиты, у подножия — оливин-клинопироксен-плагиоклазовые базальты.

Впервые для данного вулкана выявлены отчетливые минералогические признаки фумарольно-гидротермальной деятельности.

Высокие значения намагниченности базальтов обусловлены значительным содержанием зерен титаномагнетита, имеющих псевдооднородную структуру.

В пределах вулканической постройки выделены периферические магматические очаги и установлено направление подводных каналов.

Установлено, что подводный вулкан Лисянского, как и другие изученные нами вулканы КОД, образовался во время геомагнитных инверсий.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по теме НИР № 0282-2019-0004 Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

Петролого-минералогические исследования выполнены по теме НИР № 0135-2019-0050 “Геодинамика океанических бассейнов в мезо-кайнозойской истории Земли и формирование с вязанных с ними полезных ископаемых” Геологического института РАН.

Петромагнитные исследования выполнены в Центре коллективного пользования “Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм” Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН в рамках Государственного задания № FMWU-2022-0005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авдейко Г.П., Антонов А.Ю., Волинец О.Н. и др. Вариации вещественного состава и изотопных отношений стронция и неодима в четвертичных лавах Курильской островной дуги и их петрогенетическое значение // Океанический магматизм: эволюция, геологическая корреляция. М.: Наука, 1986. С. 153–169.

Антонов А.Ю., Волинец, О.Н., Авдейко Г.П. и др. Редкоземельные элементы в четвертичных вулканических образованиях Курильской островной дуги в связи с проблемой генезиса островодужных магм // Геохимия магматических пород современных и древних активных зон. Новосибирск: Наука, 1987. С. 36–55.

Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусов А.А. Возможности структурно-вещественного картирования по данным магниторазведки и гравитаразведки в пакете программ СИГМА-3D // Геофизический вестник. 2004. № 3. С. 11–15.

Безруков П.Л., Зенкевич Н.Л., Канаев В.Ф., Удинцев Г.Б. Подводные горы и вулканы Курильской островной гряды // Тр. Лаборатории вулканологии. 1958. Вып. 13. С. 71–88.

Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С. и др. Подводный вулканический массив Рикорда (Курильская островная дуга) // Вулканология и сейсмология. 2018. № 4. С. 26–42.

<https://doi.org/10.1134/S0203030618040028>

Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С. и др. Комплексные геолого-геофизические исследования подводного вулканического массива Архангельского (Курильская островная дуга) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2019. № 4. Вып. № 44. С. 35–50.

<https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-4-44-35-50>

Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С. и др. Комплексные исследования подводного вулкана Лисянского (Курильская островная дуга) // Материалы XXIII Региональной научной конференции “Вулканизм и связанные с ним процессы”, посвященной Дню вулканолога, 2020 г. / Главный редактор д. г.-м. н. А.Ю. Озеров. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2020а. С. 91–94.

Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С. и др. Комплексные геолого-геофизические исследования подводного вулканического массива Ратманова (Курильская островная дуга) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2020б. № 2. Вып. № 46. С. 55–71.

<https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-2-46-55-71>

Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С. и др. Новые данные о строении подводных вулканов Центральных и Южных Курил // Труды IX Международной научно-практической конференции “Морские исследования и образование (MARESEDU-2020)”. Тверь: ООО “ПолиПРЕСС”, 2020в. Т. III(III). С. 482–485.

Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С. и др. Вулканический массив Райкоке (Курильская островная дуга) // Вулканология и сейсмология. 2021а. № 4. С. 61–80.

<https://doi.org/10.31857/S0203030621030020>

Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С. и др. Комплексные геолого-геофизические исследования подводного вулканического 7.10 (Курильская островная дуга) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2021б. № 3. Вып. № 51. С. 23–40.

<https://doi.org/10.31431/1816-5524-2022-3-51-23-40>

Блох Ю.И., Каплун Д.В., Коняев О.Н. Возможности интерпретации потенциальных полей методами особых точек в интегрированной системе “СИНГУЛЯР” // Известия вузов. Геология и разведка. 1993. № 6. С. 123–127.

Блох Ю.И., Рашидов В.А., Трусов А.А. Оценка остаточной намагниченности подводных вулканов Курильской островной дуги с применением программы ИГЛА // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. № 2. Вып. № 26. С. 5–10.

Блох Ю.И., Трусов А.А. Программа “IGLA” для интерактивной экспресс-интерпретации локальных гравитационных и магнитных аномалий // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей // Материалы 34-й сессии международного семинара им. Д.Г. Успенского. М: ИФЗ РАН, 2007. С. 36–38.

Ерохов В.Ф., Кичина Е.Н., Остапенко В.Ф. Петрохимические особенности лав подводных вулканов Курильских островов // Труды СахКНИИ ДВНЦ АН СССР. 1975. Вып. 35. С. 21–26.

Журавлев Д.З., Журавлев А.З., Чернышев И.В. Изотопная зональность Курильской островной дуги по данным $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ // Докл. АН СССР. 1985. Т. 280. № 2. С. 486–491.

Журавлев Д.З., Цветков А.А., Журавлев А.З. и др. Изотопный состав ниобима и стронция в четвертичных вулканитах Курильской островной дуги в связи с проблемой генезиса островодужных магм // Эволюция системы кора–мантия. М.: Наука, 1986. С. 62–78.

Каталог станций драгирования в Охотском море. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1992. 54 с.

Кичина Е.Н., Неверов Ю.Л., Остапенко В.Ф. Новые данные о подводных вулканах акватории острова Симушир (Курильские острова) // Геология дна северо-запада Тихого океана. Владивосток: САХНИИ ДВО АН СССР, 1980. С. 61–66.

Ломтев В.Л., Патрикеев В.Н. Новые черты строения подводных конических гор и холмов у подножия Охотской окраины Курильской дуги (по данным НСП) // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2015а. № 1. С. 32–45.

Ломтев В.Л., Патрикеев В.Н. Новое в строении подводных конических гор и холмов у подножия Охотской окраины Курильской дуги (по данным НСП) // Вулканология и сейсмология. 2015б. № 2. С. 44–45.

Остапенко В.Ф. Некоторые аспекты новейшей истории прикурильской части Охотского моря в свете изучения подводных вулканов этого региона // Вулканизм Курило-Камчатского региона и о. Сахалин. Южно-Сахалинск: Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 34–42.

Остапенко В.Ф. Подводные вулканы прикурильской части Охотского моря, и их значение для понимания новейшей истории этого региона // Докл. АН СССР. 1978. Т. 242. № 1. С. 168–171.

Остапенко В.Ф., Кичина Е.Н. Латеральные вариации петрографического состава лав наземных и подводных вулканов Большой Курильской дуги // Рельеф и вулканизм Курильской островодужной системы. Владивосток: Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1982. С. 74–90.

Покровский Б.Г., Вольнец О.Н. Геохимия изотопов кислорода в эффузивах Курило-Камчатской дуги // Петрология. 1999. Т. 7. № 3. С. 227–251.

Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги / Отв. ред. академик Ю.М. Пушаровский. М.: Наука, 1992. 528 с.

Пузанков Ю.М., Вольнец О.Н., Авдейко Г.П. и др. Геохимия микроэлементов в четвертичных вулканитах Курильской гряды. Радиоактивные элементы // Геохимические ассоциации редких и радиоактивных элементов в рудных и магматических комплексах. Новосибирск: Наука, 1991. С. 81–97.

Pecerillo A., Taylor S.R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamuonu area, northern Turkey // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1976. V. 58. P. 63–81.

Zhuravlev D.Z., Tsvetkov A.A., Zhuravlev A.Z. et al. $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Ratios in recent magmatic rocks of the Kurile Island Arc // Chemical Geology (Isotope Geoscience Section). 1987. V. 66. P. 227–243.

Integrated Geological and Geophysical Investigations of the Underwater Lisyansky Volcano (Kuril Island Arc)

Yu. I. Blokh^{1, *}, V. I. Bondarenko², A. S. Dolgal³, P. N. Novikova³,
V. V. Petrova⁴, O. V. Pilipenko⁵, V. A. Rashidov^{1, **}, and A. A. Trusov⁶

¹Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences,
bul'var Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia

²Nekrasov State University, 1 Maya str., 16, Kostroma, 156961 Russia

³Mining Institute, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Sibirskaya str., 78a, Perm', 614007 Russia

⁴Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky lane, 7, bld. 1, Moscow, 119017 Russia

⁵Shmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,
Bolshaya Gruzinskaya str., 10, bld. 1, Moscow, 123242 Russia

⁶AO GNPP Aerofizika, Pokhodnyi proezd, 19, Moscow, 125373 Russia

*e-mail: yuri_blokh@mail.ru

**e-mail: rashidva@kscnet.ru

The complex geological and geophysical studies of the underwater volcano Lisyansky, located in the Simushir volcanic zone of the Kuril Island arc, showed that the lower horizons of the volcanic structure are composed of pyroxene-hornblende-plagioclase porphyritic basalts, and the upper horizons are pyroxene-plagioclase basaltic andesites and andesites. For the first time, distinct mineralogical signs of fumarole-hydrothermal activity have been revealed for this volcano. The high values of basalt magnetization are due to a significant concentration of titanomagnetite grains with a pseudo-single-domain structure. The formation of the underwater Lisyansky volcano, as well as other volcanoes of the Kuril Island arc, occurred during the period of geomagnetic inversions. The volcanic edifice has subvertical, northeastern, and northwestern supply channels and peripheral magma chambers at depths of about 1 km and 2.5–3 km. The maximum effective magnetization of the Lisyansky submarine volcano is 3.8 A/m.

Keywords: underwater Lisyansky volcano, Kuril Island arc, complex geological and geophysical studies