

## Работы молодых ученых

УДК 551.21 (571.645)

### НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО МОРФОЛОГИИ ВНУТРИКАЛЬДЕРНЫХ ОЗЕР ОСТРОВОВ КУНАШИР И СИМУШИР

©2009 Д.Н. Козлов, Р.В. Жарков

*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, 693022; e-mail: kozlov@imgg.ru*

В работе приводятся результаты батиметрической съемки внутрикальдерных озер Горячее и Кипящее (кальдера Головнина, о. Кунашир), и Бирюзовое (кальдера Заварицкого, о. Симушир). Дано краткое описание кальдер, последних этапов их эруптивной деятельности и описано современное состояние. Предложена и детально описана современная методика для преобразования данных эхолотного профилирования в батиметрические схемы.

*Ключевые слова: фреатический взрыв, кальдера, озеро, эхолот, батиметрическая схема, газогидротермы.*

#### ВВЕДЕНИЕ

Вулканические озера являются типичными гидрологическими объектами для кальдер, в том числе и на Курильских островах (рис. 1). Изучение их морфологии и современной газогидротермальной активности – важнейшая задача для решения проблем, связанных с кальдерообразованием и решением задач по вулканопасности этих территорий. Вплоть до последнего десятилетия, на Курильских островах, не применялись современные приборы и программное обеспечение для подобных целей. Цифровые эхолоты позволяют провести детальное батиметрическое картографирование внутрикальдерных озер, которое достигается за счет межгалсового расстояния и шага съемки. Кроме того, такое оборудование позволяет проводить непрерывную съемку по профилю и обеспечивает высокую точность наблюдений.

С 2005 по 2009 гг. сотрудники лаборатории вулканологии и вулканопасности ИМГиГ ДВО РАН занимаются исследованием морфологии и генезиса внутрикальдерных озер островов Кунашир и Симушир. Основным используемым методом – эхолотный промер с синхронной GPS-привязкой эхолотных профилей, результат проведения съемки – картографирование внутри-

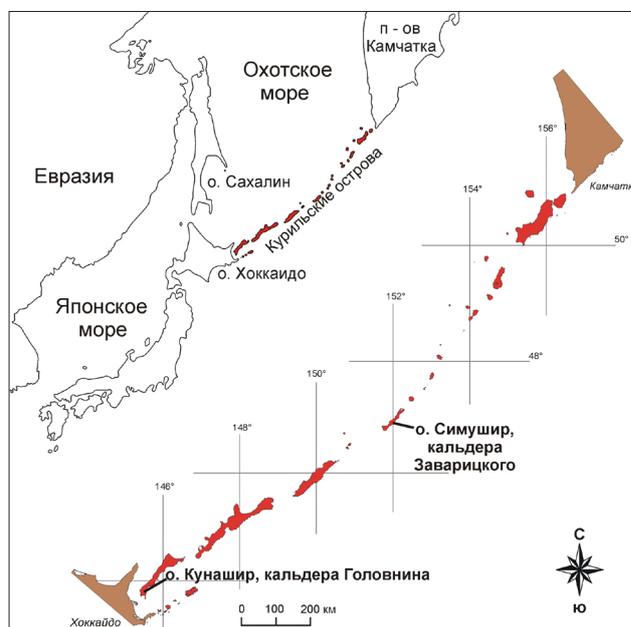


Рис. 1. Расположение кальдер Головнина и Заварицкого.

кальдерных озер, построение батиметрических схем и гипсометрических моделей. Предпринята попытка обоснования происхождения и видоизменения озер, наличия каких-либо эксплозивных форм донного рельефа и подводных газогидротермальных выходов. Использовались

эхолоты Lowrance Eagle SeaCharter 320 DX и Lowrance LMS-527cDF iGPS. С 2005 по 2006 гг. исследовались внутрикальдерные озера Горячее и Кипящее (кальдера Головнина, о. Кунашир), в 2007 г. – внутрикальдерное озеро Бирюзовое (кальдера Заварицкого, о. Симушир). На сегодняшний день наиболее интересные и значимые результаты, в виде детальных батиметрических схем, были получены именно для этих озер.

### МЕТОДИКА РАБОТ

При проведении батиметрической съемки на озерах Горячее, Кипящее и Бирюзовое, использовалась надувная резиновая лодка «Язь 12-М», рассчитанная на двух человек, и обладающая небольшой массой. На лодке были поочередно смонтированы эхолоты производства фирмы Lowrance: «Eagle SeaCharter 320 DX» и «LMS-527cDF iGPS». Обе модели эхолотов оснащены 12-канальным GPS-приемником и по своим эксплуатационным и техническим характеристикам практически одинаковы. Питание эхолота осуществлялось за счет компактных 12-вольтовых аккумуляторных батарей. Рабочая частота излучателя звуковых волн эхолота была установлена равной 200 кГц. Частота обновления сигнала GPS-приемника 10 Гц.

В большинстве случаев, объем каждого эхолотного профиля составляет от 5 до 30 тыс. измеряемых значений, в зависимости от частоты и времени записи в один файл. Каждое значение представляет собой информацию о координатах точки съемки, глубине, дате и времени эхолотного промера, температуре поверхности воды, смещении относительно предыдущей точки промера и другую вспомогательную информацию. В процессе обработки используются только значения координат и глубин. Выборка значений производится таким образом, чтобы на каждый квадратный метр площади озера приходилось одно усредненное значение глубины. Следует отметить, что используемая методика батиметрической съемки позволяет измерять глубины непосредственно в точке положения лодки с установленным эхолотом, поэтому количество отработанных профилей повышает качество конечных батиметрических схем. Система профилей выбирается таким образом, чтобы плотность покрытия ими озер была максимально равномерной (рис. 2).

В общих чертах, алгоритм для получения батиметрической схемы выглядит следующим образом: данные эхолотного профиля, в виде файла с расширением \*.slg экспортируются в программу Lowrance Sonar Viewer. Здесь он представляет собой двумерную визуализацию профиля с возможностью графической интерпре-

тации данных (устраняются помехи от поверхности воды, посторонние шумы, выявляются неоднородности водной толщи в виде газов или резких разностей температуры и т.д.). На этом этапе возможно изучение характеристик донного рельефа, а самое главное, из-за различной скорости звуковых волн в жидкости с различной минерализацией и содержанием пузырьков газа, видны подводные газогидротермальные выходы.

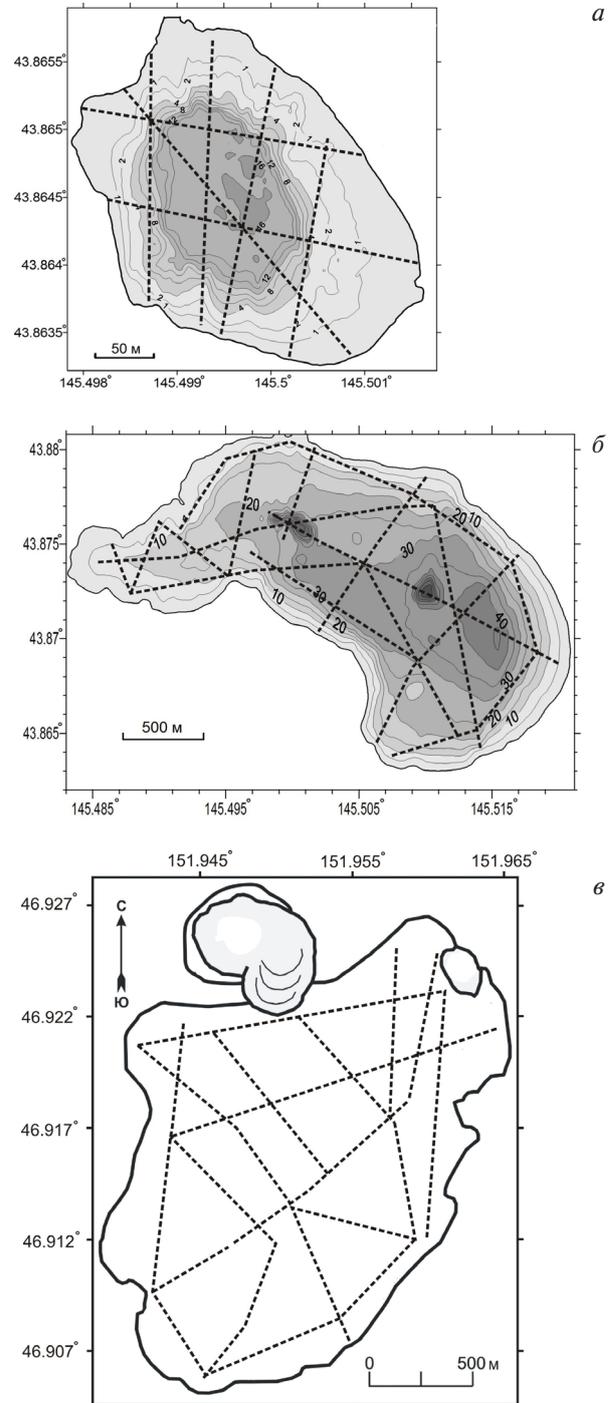


Рис. 2. Схематическое изображение сетки профилей: а – профили, отработанные на озере Горячее; б – профили, отработанные на озере Кипящее; в – профили, отработанные на озере Бирюзовое

Здесь же можно определить их координаты. Далее производится экспорт данных в текстовый файл формата \*.csv, который импортируется в редакторе таблиц, в стандартный табличный формат \*.xls. В этой таблице производится фильтрация информационного массива с целью получения только уникальных значений координат и глубин. Для этого используются GPS данные об изменении позиции. Полученная таблица экспортируется в программу Surfer, где создается файл расширения \*.srf, представляющий собой визуализированную таблицу. На этом этапе мы получаем площадную картину озера и можем оставить только необходимые данные, например, наиболее хорошо отснятые и видимые основные изобаты. Далее создается графический файл \*.jpg или \*.bmp, который открывается в редакторе для устранения оставшихся погрешностей, добавления недостающих фрагментов изображения или условных обозначений и шкалы глубины. В конечном итоге получается кондиционная батиметрическая схема.

#### КАЛЬДЕРА ГОЛОВНИНА

Озера Горячее и Кипящее располагаются в кальдере Головнина (абс. отметка 547 м) (рис. 3 на 3 стр. обложки). Ранее рельеф дна этих озер изучался при помощи лота: на озере Горячее донный рельеф картировали С.М. Фазлуллин и В.В. Батоян (1986), на озере Кипящее – А.В. Зотов, В.И. Сорокин и И.Б. Никитина (1988). Эти исследования дали лишь примерное представление о строении озер.

Кальдера Головнина находится на юге острова Кунашир, ее диаметр более 10 км в основании и 4.5 км по гребню. Дно кальдеры в основном ровное с небольшим уклоном на северо-восток. В центре кальдеры находятся два экструзивных купола андезидацитового состава: Центральный Восточный и Центральный Западный. Похожие куполы располагаются в северо-западной части кальдеры (купол Подушечный) и в ее юго-восточной части (купол Крутой) (Мархинин, 1959; Федорченко, 1962). В настоящее время, на отдельных участках дна кальдеры проявляется постоянная сольфатарная деятельность с температурой сольфатар не более 101°C (Жарков, 2008). Последнее проявление эруптивной деятельности в кальдере связано с фреатическим взрывом, в результате которого образовался кратер диаметром около 350 м, заполненный озером Кипящее. Образование этой воронки взрыва, по разным оценкам, произошло от 640–680 л.н. (Фазлуллин, Батоян, 1989) до 1000 л.н. (Разжигаяева, Ганзей, 2006).

В 2005–2006 гг. нами было проведено детальное изучение продуктов фреатического извер-

жения, образовавшего воронку взрыва – озеро Кипящее. На основании площадного картирования был вычислен объем выброшенного материала, который составил 0.00241 км<sup>3</sup>, что почти совпало с объемом воронки озера, – 0.00245 км<sup>3</sup>. Эти данные еще раз доказывают то, что воронка озера Кипящее была образована фреатическим извержением (Козлов, Белоусов, 2007; Kozlov, Belousov, 2006).

Воронка фреатического взрыва, заполненная озером Кипящее (рис. 4), врезана в озерные отложения и южную часть экструзивного купола Центральный Восточный. Высота кромки кратера до 195 м над уровнем моря, средняя глубина кратера 30 м, глубина озера, по данным А.В. Зотова с соавторами (1988), составляла 17 м, а по нашим данным – 16 м, площадь – 66000 м<sup>2</sup>. Температура воды в районе выходов термальных вод не превышает 95°C, температура водной поверхности в других частях озера варьирует от 30 до 60°C. Северная часть кальдеры занята озером Горячее. Максимальная глубина озера по нашим данным – 62.3 м. В настоящее время озеро занимает 3.1 км<sup>2</sup>, что составляет около одной трети всей площади дна кальдеры. Озеро сообщается с Охотским морем ручьем Озерный.

При проведении батиметрической съемки отработано 7 профилей на озере Кипящее (рис. 2), общей протяженностью около 1.5 км и 30 профилей на озере Горячее (рис. 2), протяженностью около 20 км (Козлов, Белоусов, 2007; Kozlov, Belousov, 2006). В результате работ составлены батиметрические схемы озер Кипящее (рис. 5 на 3 стр. обложки) и Горячее (рис. 6 на 3 стр. обложки), на которых отчетливо виден их донный рельеф и особенности строения. Во внутрикальдерном озере Горячее обнаружены две воронки, в западной и восточной частях озера. Размер



Рис. 4. Вид на озеро Кипящее с Юга. На заднем плане купол Центральный Западный, на переднем – склон купола Центральный Восточный. Фото Д.Н. Козлова.

западной воронки около 250×200 м, глубина 62 м. Размер восточной воронки 200×150 м, глубина 60 м. Обе воронки имеют обширные газогидротермальные выходы, которые хорошо видны на эхолотных профилях. Наличие этих выходов подтверждено подводной видеосъемкой. Такие же выходы располагаются по всему дну озера Кипящее.

### КАЛЬДЕРНЫЙ КОМПЛЕКС ЗАВАРИЦКОГО

Озеро Бирюзовое расположено в кальдере Заварицкого (абс. отметка 624 м), находящегося в центральной части острова Симушир. Кальдерный комплекс представляет собой три вложенных друг в друга кальдеры, размер самой молодой кальдеры около 2.5 км в диаметре, она заполнена водами Бирюзового озера. Внутренние стенки молодой кальдеры, местами почти отвесные, имеют высоту 300-350 м, в некоторых местах мощные слои отложений грубообломочного материала кальдерообразующих извержений и лавовых потоков прорезаны ручьями, и только с южной стороны имеется возможность для спуска без специального снаряжения. Размер озера составляет около 1.5×2 км, его площадь равна примерно 3 км<sup>2</sup>, уровень озера превышает уровень океана на 50 м. В северной части кальдеры располагаются Северный экструзивный и Восточный эффузивный куполы. 12 ноября 1957 г. произошло сильное извержение, в результате которого образовался Северный экструзивный купол (Горшков, 1967б; Мархинин, 1960). После извержения, в районе купола, длительное время проявлялась фумарольная активность. В юго-западной части кальдеры на берегу озера находились термальные источники с температурой 90-100°С (Зеленов, Канакина, 1962).

В 2007 году нами была проведена батиметрическая съемка внутрикальдерного озера Бирюзовое (Козлов, Жарков, 2009). Отработано 30 профилей общей протяженностью 16 км (рис. 2). На основании полученных данных впервые составлена подробная батиметрическая схема озера (рис. 7). На схеме отчетливо показана морфология озера и его структурные элементы. Подтвердилось наличие на дне субмеридиональной впадины, простирающейся с юго-запада на северо-восток которую Г.С. Горшков (1967а) называл «эксплозивным рвом меридионального простираения», за счет образования и частичного обрушения которого и возникла внутренняя кальдера вулкана Заварицкого.

Кроме того, на дне озера были обнаружены три воронки. Одна воронка находится в южной части озера и имеет максимальную глубину 87 м. Вторая воронка находится южнее купола Восточный, в северо-восточной части озера.

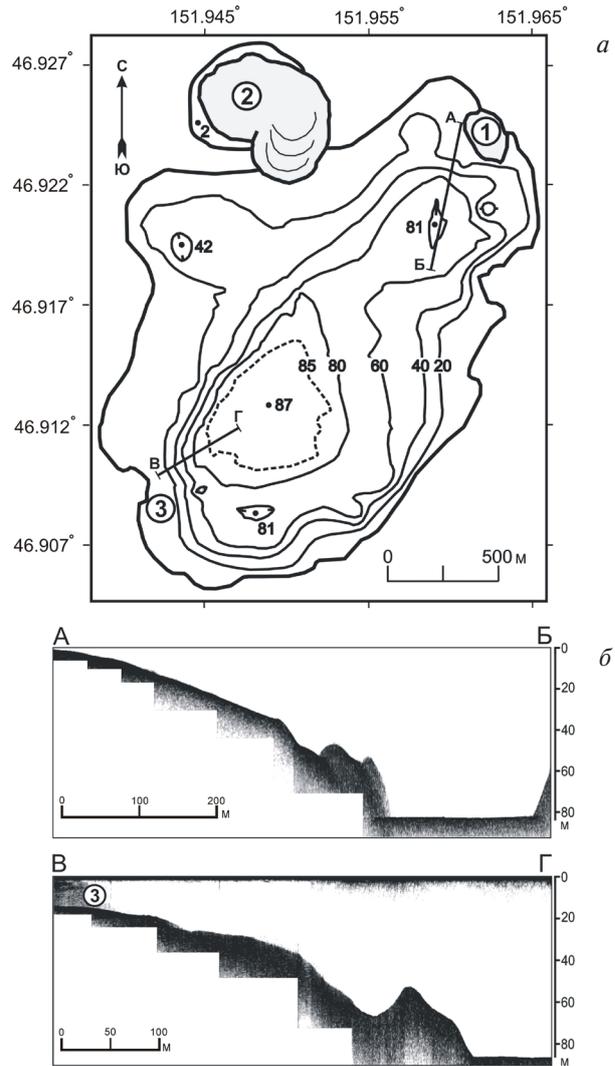


Рис. 7. Результаты батиметрической съемки озера Бирюзовое: а – батиметрическая схема, основные изобаты проведены через 20 м; цифрами обозначены: 1 – Восточный эффузивный купол; 2 – Северный экструзивный купол и лавовый поток; 3 – место выхода со дна газогидротерм; б – эхолотные профили по линиям АБ и ВГ.

Ее максимальная глубина 81 м. Третья воронка, с максимальной глубиной 42 м, обнаружена в северо-западной части озера. Воронки имеют эксплозивный генезис. По своим морфологическим характеристикам они схожи с воронками, изученными во внутрикальдерных озерах Горячее и Кипящее. Следует отметить, что в пределах воронок внутрикальдерных озера Горячее и Кипящее существуют интенсивные выходы подводных газогидротерм, а в пределах воронок озера Бирюзовое таких выходов не обнаружено.

Тот факт, что воронки не были засыпаны продуктами извержений и донными осадками, может говорить о том, что они образовались сравнительно недавно. По сравнению с данными промеров, выполненных К.К. Зеленовым и М.А. Канакиной (1962) в 1958 г., за 49 лет глубина

озера увеличилась на 12 м. Однако, по данным (Зеленов, Канакина, 1962), после извержения 1957 года уровень озера понизился на 6-8 м, а к 1959 году – еще на 2 м. На профилях, отработанных в юго-западной части озера, хорошо виден участок, на котором располагались термальные источники, описанные исследователями в 1940-50 гг. (Зеленов, Канакина, 1962; Корсунская, 1958; Мархинин, 1960).

Здесь были зафиксированы выходы щелочных (рН 8.4), хлоридных натриевых термальных вод с температурой 90-100°C и минерализацией около 4 г/л (Зеленов, Канакина, 1962). В настоящее время в этом месте вода прогрета до 40°C, при средней температуре вод озера около 14°C, а на ее поверхности видны пузырьки газов и парение (рис. 8). По нашим измерениям, произведенным портативным рН-метром HANNA-Hi9025 и электронным термометром Digitron T200KC, песок на берегу озера в этом районе прогрет до температуры 20-91.2°C, рН воды составляет 7.5. За прошедшее время, после извержения 1957 г., уровень озера Бирюзовое поднялся примерно на 10 м.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отработанная методика изучения донного рельефа внутрикальдерных озер оказалась весьма эффективной. Ее применение возможно на любых других гидрологических объектах, особенно труднодоступных и недостижимых для крупногабаритной техники, судов и экспедиций с тяжелым оборудованием.

Можно предположить, что обе воронки на дне оз. Горячее образовались в результате фреатических извержений. Эти извержения были подобны извержению, образовавшему воронку озера Кипящее. Кроме этого, на эхолотных профилях отчетливо прослеживаются акустические помехи, создаваемые подводными выходами газов, так как последние отчетливо видны и на поверхности. Это свидетельствует о постоянной газогидротермальной активности на дне озер кальдеры Головнина.

Основным результатом работы в кальдере вулкана Заварицкого стало создание батиметрической схемы озера Бирюзовое. Главное преимущество этой схемы, перед опубликованной в 1962 г. (Зеленов, Канакина, 1962), состоит в том, что для ее создания было использовано высокоточное оборудование, а так же достаточно равномерная и плотная сетка профилей. Это позволило получить более точную, по сравнению с предыдущей, батиметрическую схему. Впервые на дне озера обнаружены три воронки, приуроченные к эксплозивному рву. Эти воронки, по видимому, имеют схожий генезис с воронками



**Рис. 8.** Парение и выход газов на месте затопленных юго-западных термальных источников. Снимок сделан с южного берега озера Бирюзовое. Фото Р.В. Жаркова.

внутрикальдерных озер Горячее и Кипящее. Однако, по сравнению с воронками кальдеры Головнина, в них не было установлено выходов газов и термальных вод. Это может быть связано с тем, что в кальдере вулкана Заварицкого в последнее время активность, по сравнению с наблюдениями 1950-60 гг., существенно снизилась, а ее видимые проявления сохранились только в юго-западной части кальдеры, на месте затопленных термальных источников. По всей вероятности, прекращение фумарольной активности в северной части кальдеры Заварицкого, связано с тем, что продукты последнего извержения вулкана были представлены преимущественно средне-основными породами. Эти породы менее продуктивны для стационарной фумарольной активности, чем более кислые породы кальдеры Головнина. Большую роль играет глубина и размеры магматического очага, а так же возможность доступа к нему грунтовых вод.

Работа выполнена при поддержке грантов № ARC-0508109 Национального Научного Фонда США, гранта РФФИ № 07-05-10070К, грантов ДВО РАН № 06-II-CO-08-031, № 06-III-B-08-371 и № 07-III-D-08-097.

## Список литературы

- Горшков Г.С.* Вулканизм Курильской островной дуги // М.: Наука, 1967а. 182 с.  
*Горшков Г.С.* Кальдера Заварицкого // Бюл. вулканол. станции. 1967б. № 30. С. 31-49.  
*Жарков Р.В.* Типы термальных вод Южных Курил и севера Сахалина и их влияние на ландшафты. Автореф. дисс. канд. геогр. наук. Хабаровск, 2008. 26 с.  
*Зеленов К.К., Канакина М.А.* Бирюзовое озеро (кальдера Заварицкого) и изменение химизма

- его вод в результате извержения 1957 г. // Бюл. вулканол. станции. 1962. № 32. С. 33-44.
- Зотов А.В., Сорокин В.И., Никитина И.Б.* Некоторые особенности современной гидротермальной деятельности в кальдере вулкана Головнина (о-в Кунашир) // Современные гидротермы и минералообразование. М.: Наука, 1988. С. 54-68.
- Козлов Д.Н., Белоусов А.Б.* Современные методы исследований внутрикальдерных озер активных вулканов (на примере вулкана Головнина, о. Кунашир, Курильские о-ва) // Материалы XIII научного совещания географов Сибири и дальнего востока, Иркутск, 2007 г. Т. 1. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2007. С. 142-144.
- Козлов Д.Н., Жарков Р.В.* Результаты исследования внутрикальдерного озера Бирюзовое на вулкане Заварицкого (о. Симушир, Курильские острова) // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз: III Сахалинская молодежная научная школа, Южно-Сахалинск, 3-6 июня 2008 г., сб. материалов. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2009. С. 57-62.
- Корсунская Г.В.* Вулканы острова Симушир // Бюл. вулканол. станции. 1956. № 24. С. 61-65.
- Мархинин Е.К.* Извержение вулкана Заварицкого на острове Симушир осенью 1957 г. // Бюл. вулканол. станции. 1960. № 29. С. 7-15.
- Мархинин Е.К.* Вулканы острова Кунашир // Тр. Лаб. вулканологии. 1959. Вып. № 17. С. 43-51.
- Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А.* Обстановки осадконакопления островных территорий в плейстоцен-голоцене // Владивосток: Дальнаука, 2006. 247 с.
- Фазлуллин С.М., Батоян В.В.* Донные соадки кратерного озера вулкана Головнина // Вулканология и сейсмология. 1989. № 2. С. 44-55.
- Федорченко В.И.* Основные этапы послекальдерного периода формирования вулкана Головнина (о. Кунашир) // Тр. СахКНИИ. 1962. Вып. № 12. С. 127-141.
- Kozlov D.N., Belousov A.B.* Hydrothermal eruption – the most probable scenario of volcanic disaster in the Golovnina Caldera, Kunashir Island, Southern Kuriles // 5th Biennial Workshop on Subduction Processes emphasizing the Japan-Kuril-Kamchatka-Aleutian Arcs (JKASP-5) and International Volcanological Field School for Graduate Students. Linkages among tectonics, magma genesis, and eruption in the northern Pacific arc. Hokkaido University International Congress Hall, Sapporo, Hokkaido, Japan, July 9-14, 2006. P. 140-141.

## NEW DATA ABOUT MORPHOLOGY OF INTRAKALDERAL LAKES OF KUNASHIR AND SIMUSHIR ISLANDS

**D.N. Kozlov, R.V. Zharkov**

*Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022*

The results of the conducting of the bathymetrical echo sounding survey of the intracalderal lakes Goryachee and Kipyashchee (Golovnin Caldera, Kunashir Island) and Biryuzovoe (Zavaritskii caldera, Simushir Island) are given in the work. Brief description of the calderas and last stages of their eruptive activity were shown, and modern state is described. Modern methods for transformation of data of echo profiling to bathymetrical schemes are suggested and described in details.

*Keywords: phreatic explosion, caldera, lake, sonar, bathymetric scheme, gas-hydrotherms.*