

## ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИНФРАКРАСНОЙ СЪЕМКИ С БПЛА ТЕРМАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ В 2023 г.

© 2024 Т.А. Котенко

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006;  
e-mail: sinarka2017@mail.ru*

Поступила в редакцию 15.12.2023; после доработки 13.04.2024; принята в печать 25.06.2024

Для мониторинга труднодоступных термальных объектов методы дистанционного наблюдения с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), оснащенных тепловой инфракрасной камерой, представляют прогрессивную платформу для быстрого сбора информации. В настоящей работе представлены первые результаты подобного применения БПЛА для изучения пяти термальных объектов на Курильских островах. Четыре из них (р. Кипящая на о. Итуруп, оз. Бирюзовое на о. Симушир, о. Янкича и р. Юрьева на о. Парамушир) приурочены к действующим вулканам. Для всех участков газогидротермальной разгрузки получены тепловые карты с точной географической привязкой. Для р. Кипящая и о. Янкича выполнена верификация воздушной термометрии наземными данными и получены реальные коэффициенты атмосферного ослабления для разных высот полета при наблюдаемых метеорологических условиях. Получены первые данные о параметрах теплового шлейфа горячей р. Юрьева, впадающей в Охотское море.

*Ключевые слова: БПЛА, аэрофотосъемка, инфракрасный, Курильские острова, горячие источники, фумаролы.*

### ВВЕДЕНИЕ

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) все шире используются для разнообразных исследований в вулканологии. Обзор современного применения БПЛА с тепловыми камерами представлен в работе (James et al., 2020) — это создание температурных карт с географической привязкой высокого разрешения для мониторинга фумарольных полей, термальных источников, горячих кратерных озер; видеосъемка или съемка с высокой частотой кадров вулканических взрывов; определение теплового потока из жерл извержения и потоков лавы и т.д. Применение БПЛА позволяет проводить быструю и безопасную съемку объектов, расположенных в труднодоступной местности, как, например, многие из Курильских островов. Однако для Курильских островов известна только одна детальная работа, посвященная применению БПЛА, оснащенного инфракрасной (ИК) камерой, для изучения вулкана Эбеко, о. Парамушир (Walter et al., 2020). В этой работе авторы картировали более 300 горячих точек в двух кратерах

вулкана и в их окружении в 2019 г., используя полученные данные вместе с современным ортофотопланом для структурного анализа термальной активности. Также коротко сообщалось о составлении тепловой карты для вулкана Эбеко в 2021 г. (Котенко и др., 2022), оз. Кипящее в кальдере Головнина, о. Кунашир (Калачева и др., 2023) и тепловой съемке на вулканах Эбеко и Алаид (Большаков и др., 2023).

В настоящем исследовании приводятся результаты инфракрасной съемки с применением БПЛА в 2023 г. термальных объектов на четырех Курильских островах: Итуруп, Симушир, Янкича и Парамушир. В результате получены тепловые карты участков гидротермальной и газовой разгрузки с точной географической привязкой, которые могут быть использованы в дальнейшем для современного мониторинга этих объектов.

### МЕТОДЫ

Фотосъемка в инфракрасном спектре выполнялась с помощью квадрокоптера DJI Mavic 3T, оснащенного тепловизионной камерой

с разрешением 640×512 пикселей. Шаг пикселя 12 мкм. Тип теплового сенсора: неохлаждаемый микроболометр на оксиде ванадия VOx. Диагональный угол обзора объектива 61°, фокусное расстояние 9.1 мм, диафрагма f/1.0, фокусное расстояние от 5 м до бесконечности. Диапазон измеряемой длины волны 8–14 мкм. Точность измерения температуры ±2°C. Был выбран диапазон яркостных температур 0–150°C, достаточный для предполагаемых термальных аномалий и дающий большую детализацию объектов. Обработка ИК-изображений выполнялась в программе DJI Thermal Analysis Tool 3, в которой выполнялся расчет максимальной температуры внутри прямоугольной области, круга или в точке. Фотографии в видимом спектре с разрешением 4000×3000 пикселей получены широкоугольной камерой Mavic 3t Hasselblad.

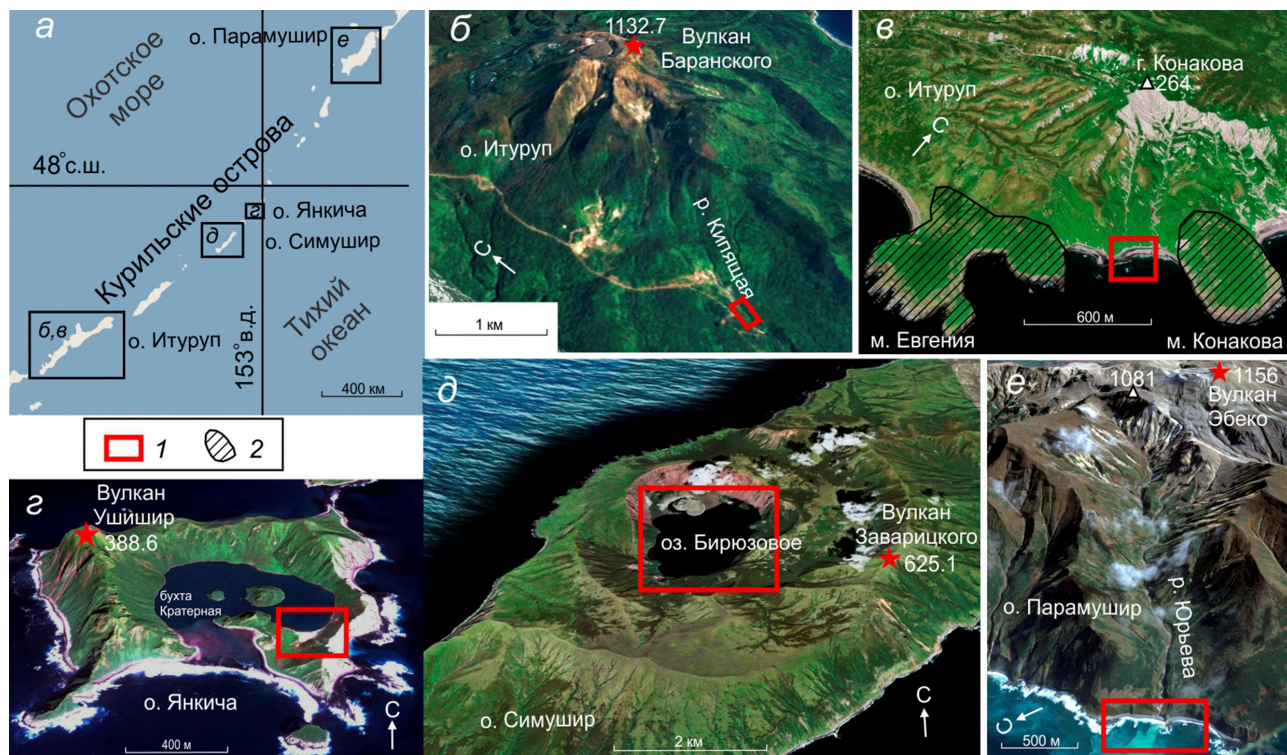
Тепловые данные зависят от различных свойств объекта и окружающей среды, главным образом от излучательной способности объекта, расстояния до объекта, отражения солнечной радиации, угла обзора, тепловой неоднородности пикселей, присутствия частиц/газов на пути электромагнитного излучения (Sprampinato et al., 2011). В настоящем исследовании была принята постоянная излучательная способность 0.95, соответствующая водным объектам. Съемка выполнялась в надире. Поглощение длинно-

волнового излучения объектов атмосферой нивелировалось радиометрической коррекцией в программном обеспечении DJI Thermal Analysis Tool 3 (на основе данных о высоте полета, температуре и относительной влажности окружающего воздуха). Наземные измерения температуры объектов для верификации данных ИК-съемки выполнялись цифровым термометром с погружной хромель-алюмелевой термопарой и ручным ИК-термометром Кельвин-компакт 1200 с расстояния не более 1 м. Температура и влажность окружающего воздуха измерялись цифровым термогигрометром SKYWATCH atmos, точность измерения температуры ±0.2°C, влажности ±3%. В источниках и ручьях проводилось измерение рН и удельной электропроводности (минерализации) с помощью мультипараметрового анализатора WATER TEST HI 98130.

### КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ

Все объекты исследования приурочены к действующим вулканам (Новейший..., 2005) за исключением Конаковских береговых источников (о. Итуруп) (рис. 1).

Наиболее мощные *термальные проявления долины р. Кипящая* находятся на высотах 240–250 м н.у.м. на юго-западном склоне вулкана Баранского (рис. 1б), о. Итуруп. Это ультракислые



**Рис. 1.** Географическое положение объектов исследования (а–е): 1 — изучаемые объекты; 2 — экзтрузии, образующие мысы на (е) (Ковтунович и др., 2002).

**Fig. 1.** Geographical location of the study objects (a–e): 1 — studied objects; 2 — extrusions forming promontories on (e) (Kovtunovich et al., 2002).

сульфатно-хлоридные источники Голубые озера с температурой, близкой к температуре кипения, и источник Двуглавый ( $T = 64.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  в июле 2021 г.) (Знаменский, Никитина, 1985; Калачева и др., 2022б; Таран и др., 1995). На этом участке происходит самая мощная разгрузка в русло р. Кипящая, повышающая расход воды и температуру почти вдвое и минерализацию более чем в 10 раз (Калачева и др., 2022б).

*Конаковские термальные источники* (о. Итуруп) находятся у подножия г. Конакова (264 м) на литорали тихоокеанского побережья (рис. 1в). Разгрузка термальных вод происходит на границе пемзово-пирокластической толщи с андезитовыми экструзиями мысов Конакова и Евгения (Ковтунович и др., 2002), возможно, представляющими собой единый субвулканический комплекс, центральная часть которого выступает в приливно-отливной зоне и на примыкающем прибрежном склоне в виде серии параллельных даек. Современные сведения об особенностях разгрузки этих источников и полном химическом составе представлены в работах (Дегтерев и др., 2022; Калачева и др., 2022а): вода источников ( $T = 36\text{--}38\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) заполняет углубления на песчаном пляже и характеризуется минерализацией 5–6 г/л и  $pH = 6.2\text{--}6.7$ .

*Термальные проявления о. Янкича.* Остров Янкича входит в группу о-вов Ушишир, которые являются частью комплексного вулканоида возрастом от позднеплейстоценового до голоценового с составом пород от базальтов до дацитов (Новейший..., 2005). Вершина вулкана Ушишир (388 м) приурочена к разомкнутому кольцевому хребту о. Янкича (рис. 1г) диаметром ~2.5 км, который согласно (Бондаренко, Рашидов, 2018) представляет собой остатки голоценового конуса с эксплозивным кратером в центре (бухта Кратерная). Формирование этого кратера произошло около 1.9–2 тыс. лет назад (Разжигаева и др., 2012), впоследствии были выжаты экструзивные купола в бухте, которые маркируют положение подводящего канала вулкана (Бондаренко, Рашидов, 2018). На юге бухта соединяется с морем узким проливом. Последующая вулканическая активность проявлялась, вероятно, периодически в виде слабых фреатических извержений, как в 1884 г. в районе береговой термальной площадки (Бондаренко, Рашидов, 2018; Горшков, 1967), так как тефра современных сильных извержений в разрезах о. Янкича и соседних островов не установлена (Разжигаева и др., 2012). На протяжении более чем 250 лет неизменно отмечалось наличие газогидротермальной активности на юго-восточном берегу бухты Кратерная (Горшков, 1967; Мархинин, Стратула, 1977; Полонский, 1871; Taran, Kalacheva, 2023; Zharkov, 2019). Благодаря исследованиям 1980-х гг. были также установлены

участки газовой и гидротермальной разгрузки вдоль северного и восточного берегов (Гавриленко и др., 1986, 1989), подводные термальные источники по периметру бухты на глубинах до 20 м (Tarasov, 2006). По мнению (Taran, Kalacheva, 2023), наличие на спутниковых и аэрофотоснимках молочно-голубого выноса с внешней стороны кальдеры также указывает на наличие подводной разгрузки гидротерм. Согласно концептуальной модели гидротермальной системы о. Янкича (Таран и др., 1993) термальная активность приурочена к зонам кольцевого и линейного тектонических разломов.

*Источники кальдерного комплекса Заварицкого* (о. Симушир). Кальдерный комплекс Заварицкого имеет сложное строение, основными геоморфологическими элементами которого являются две соммы позднеплейстоценового возраста, внутрикальдерный вулкан Заварицкого и внутренняя голоценовая кальдера, заполненная бессточным оз. Бирюзовое (рис. 1д) (Новейший..., 2005). Зеркало озера находится на высоте 50 м н.у.м., максимальная глубина составляет 87 м (Козлов, Жарков, 2009), превышение гребня кальдеры над урезом воды 250–400 м. Эруптивные центры последних извержений (между 1916 г. и 1931 г., 1957 г.) (Горшков, 1967; Мархинин, 1960) были приурочены к северной части дна кальдеры. Впервые горячие источники на юго-западном берегу озера наблюдались отечественными геологами в 1946 г. (Соловьев, 1947). Сохранение термальной активности на этом участке подтверждалось всеми последующими исследованиями (Козлов, Жарков, 2009, 2012; Корсунская, 1956; Мархинин, Стратула, 1977), хотя частично источники и фумаролы оказались затоплены из-за подъема уровня озера на 10 м (Козлов, Жарков, 2009). В 2011 г. дистанционные измерения с бровки кальдеры показали максимальную температуру воды над источниками  $65.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  и шлейф термальных вод на десятки метров от берега (Козлов, Жарков, 2012). После извержения 1957 г. значительная парогазовая и водная разгрузки наблюдались на северном берегу и на свежем экструзивном куполе (Мархинин, Стратула, 1977). Согласно последним опубликованным данным термальная активность на этом участке отсутствует (Козлов, Жарков, 2012).

*Река Юрьева* (о. Парамушир) имеет длину 5.5 км, площадь водосбора — 9.3 км<sup>2</sup>. Исток реки расположен на западном склоне хребта Вернадского на абсолютной высоте 840 м с высшей отметкой водосбора — 1081 м (рис. 1е). Расходы воды в устье, по авторским данным, за период с 2001 по 2023 гг., варьируют от 0.6 до 5 м<sup>3</sup>. На высотах 370–600 м н.у.м. в реку впадают высокоминерализованные ультракислые

Верхне-Юрьевские горячие источники, одно из первых обследований которых относится к 1955 г. (Иванов, 1957). В устье речная вода имеет кислый (рН~2) сульфатно-хлоридный состав, температуру воды до 20 °С, в растворенном виде в Охотское море ежесуточно выносятся ~10 т железа и ~19 т алюминия (Калачева, 2021). В результате химической реакции с морской водой образуется взвесь гидроокислов (Зеленов и др., 1965). Шлейф взвеси желто-зеленого цвета может иметь протяженность до нескольких километров. Разница температур речной воды в устье и морской воды составляет в среднем около 10 °С, однако до сих пор не сообщалось о параметрах теплового шлейфа, который должен формироваться в прибрежной зоне.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

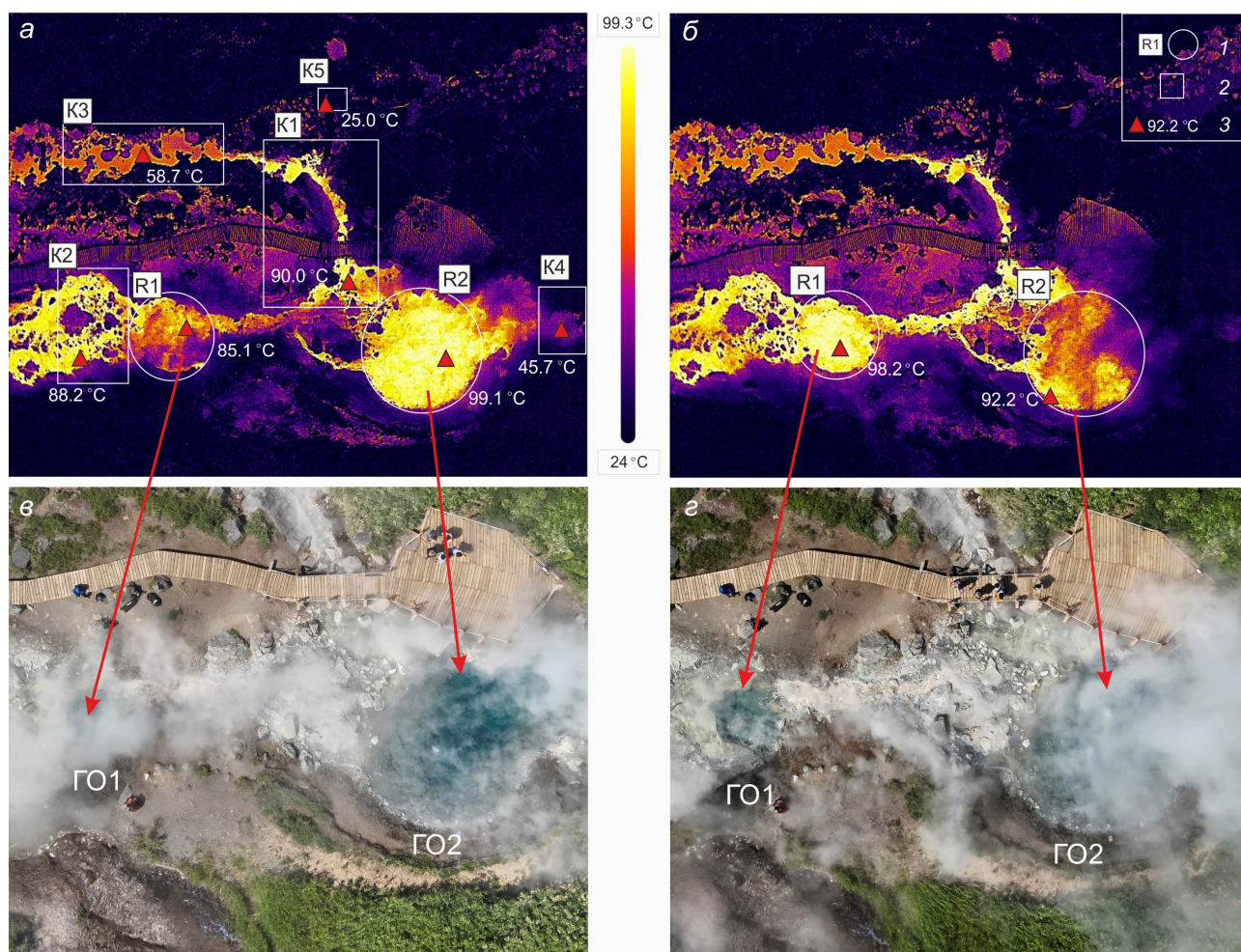
*Река Кипящая, вулкан Баранского (о. Итуруп).* Исследуемый участок реки легко достижим сначала по автомобильной дороге, затем по тропе длиной 300 м. Все термальные выходы и русло реки доступны для прямого измерения температуры. Площадь исследования включала в себя водные объекты (река, термальные источники, кипящие озера с максимальной температурой 99.6 °С) и составляла 0.02 км<sup>2</sup>.

Видимая и ИК-съемка выполнялись 14 августа 2023 г. в первой половине дня при температуре воздуха 20.7 °С, влажности 48 %. Высота полета составляла 50 м, 120 м и 170 м над поверхностью, скорость ветра 6, 12 и 15 м/с соответственно. От высоты полета менее 50 м пришлось отказаться, так как БПЛА над самыми горячими участками попадал непосредственно в паровые шлейфы. Условия съемки характеризовались сильным парением над участками с температурой более 70 °С, главным образом, над Голубыми озерами и руч. Гейзеритовый. Паровые шлейфы периодически смещались в сторону порывами ветра, открывая на короткое время поверхности. Для получения достоверных данных с участков, экранированных паром, выполнялась серийная съемка, позволяющая зафиксировать момент минимального воздействия парового шлейфа, как было предложено (Hashimoto et al., 2018). Условия съемки двух Голубых озер (ГО1 и ГО2) с высоты 50 м были разными. На первом кадре поверхность ГО2 открыта, а ГО1 закрыта паровым шлейфом (рис. 2в), на другом кадре наоборот (рис. 2а). Для ГО1 ИК-термометрия (участок R1 на рис. 2а) дала ошибку температуры 13.2 °С (85.1 °С при измеренной контактно 98.3 °С) и 0.1 °С (участок R1 на рис. 2б) соответственно. Погрешность термометрии для ГО2 при фактической температуре 99.6 °С составила 0.5 °С и 7.4 °С соответственно (участок R2 на рис. 2а и рис. 2б соответственно).

Данные ИК-термометрии выверялись по наземным измерениям перед полетом в важных для исследования точках (в горячих водоемах и источниках, в русле реки и впадающих в нее ручьев, на открытых участках грунта, рис. 3а). Калибровка наземных и полетных данных выполнялась графически, результат показан для высот 50 м (рис. 4а) и 170 м (рис. 4б). Коэффициенты атмосферной коррекции, исходя из уравнений регрессии, составили 0.86, 0.82 и 0.79 для высоты съемки 50, 120 и 170 м соответственно. На графиках также показан более значительный разброс температур в реперных точках, который наблюдался до удаления паровых шлейфов (рис. 4, ряд 2).

Конечный результат видимой и ИК-съемки (рис. 3) составлен из мозаичного изображения поверхности с корректировкой температуры, выполненной по наземным данным. Анализ полученных данных показал, что озеро ГО2 было самым горячим (Т = 99.6 °С), чуть ниже температура ГО1 (98.3 °С). Верхнее озеро ГО3 с фактической температурой воды 53 °С не имело стока, постоянное экранирование паром из ГО2 дало погрешность ИК-термометрии 7.3 °С (на рис 2а, участок К4). В отсутствие сильного парения температура руч. Гейзеритовый в истоке соответствовала измеренной контактно (на рис. 2а, участок К2). Благодаря использованию мозаики погрешность измерений в реперных точках с высоты 50 м не превышала 2.1 °С, при средней ошибке  $\Delta T_{cp} = 0.4$  °С и стандартном отклонении 0.7 °С. Увеличение высоты полета до 120 м сопровождалось увеличением погрешности до максимального значения 6.7 °С при величине средней ошибки 2.5 °С и стандартном отклонении 1.8 °С.

На рис. 3б показано изменение расходов воды в ручьях в пределах исследуемого участка. На дату наблюдения из ГО2 осуществлялся сток сначала по боковой протоке с температурой 90 °С (рис. 2а, участок К1) с расходом ~9 л/с в р. Кипящая (расход реки ~7 л/с). В результате температура основного русла повысилась от 25 °С до 58.7 °С (рис. 2а, участки К5 и К3 соответственно). Также происходил перелив воды из ГО2 в ГО1, где общий сток дал начало руч. Гейзеритовый с расходом ~14 л/с и температурой 88.2 °С (на рис. 2а, участок измерения К2). К своему устью руч. Гейзеритовый длиной 72 м охлаждался до 70 °С, принимая по пути лишь один ручей (Т = 8 °С) с расходом 0.1 л/с. Перед слиянием р. Кипящая с руч. Гейзеритовый температура в основном русле составляла 52 °С, после слияния она выросла до 59.5 °С. Сток из источника Двуглавый (группы источников с температурами 52–71.1 °С) осуществлялся ручьем с дебитом в устье около ~3 л/с и температурой 45.7 °С, который мало повлиял на



**Рис. 2** Голубые озера (о. Итуруп) ГО1 и ГО2 в инфракрасном (а, б) и видимом (в, з) спектрах при разной плотности паровых шлейфов: 1 — круговая область измерения температуры и 2 — прямоугольная; 3 — максимальное значение температуры.

**Fig. 2.** Blue Lakes (Iturup Island) GO1 and GO2 in infrared (a, б) and visible (в, з) spectra at different densities of steam plumes: 1 — circular temperature measurement area, and 2 — rectangular area; 3 — maximum temperature value.

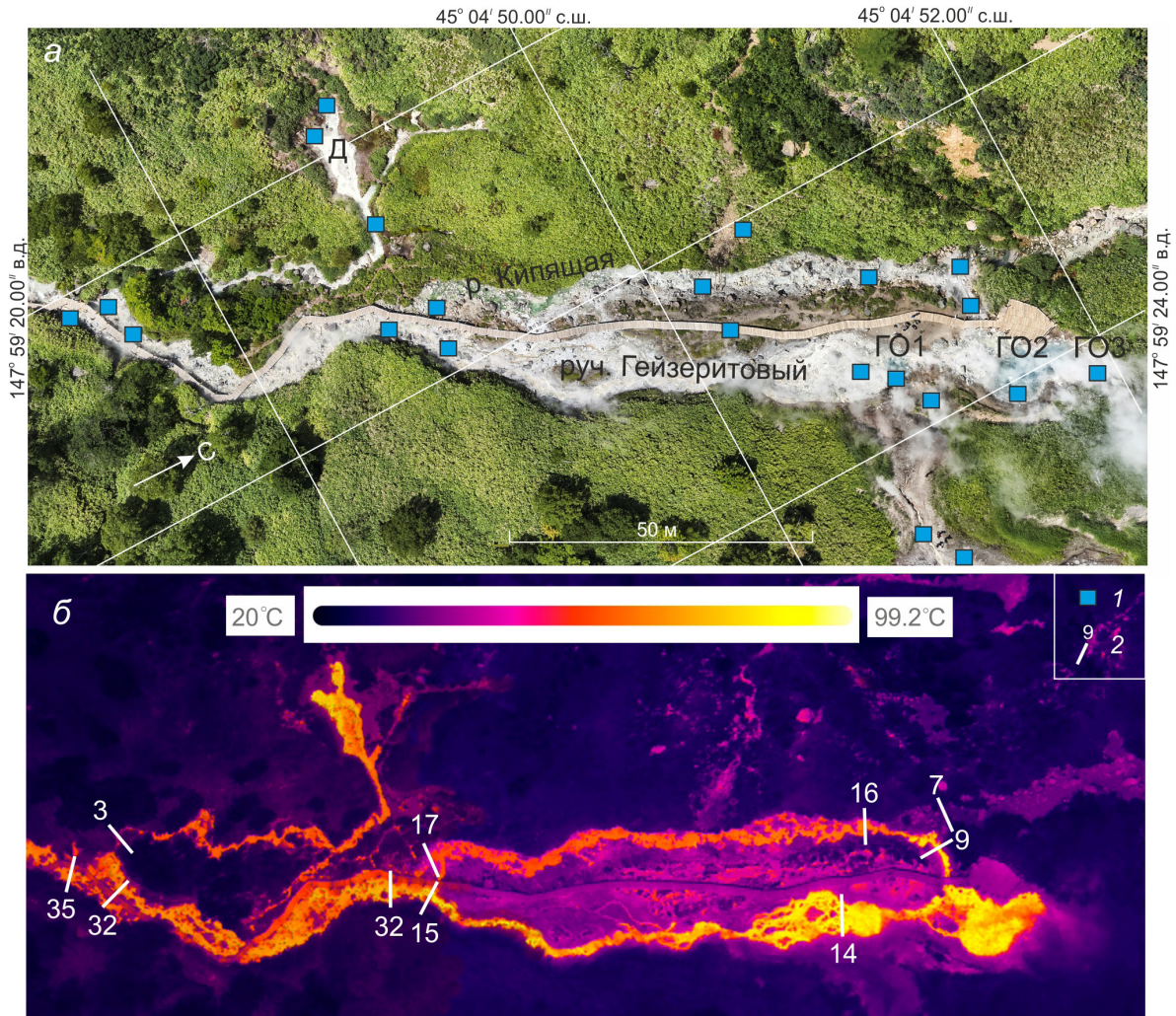
тепловой фон р. Кипящая. Измеренные расходы и температуры демонстрируют импактный вклад ГО в термический режим р. Кипящая. Ниже ГО в р. Кипящая наблюдалось также изменение минерализации от исходного 0.4 г/л до 5.5 г/л, изменение pH от 2.85 до 1.43. По данным химического анализа в 2021 г. (Калачева и др., 2022б) минерализация воды в р. Кипящая до и после впадения стока из ГО также увеличивалась от 0.4 г/л до 4.4 г/л (преимущественно за счет поступления  $Cl^-$  и  $SO_4^{2-}$ ) с понижением pH с 3.31 до 1.49. То есть впадение в р. Кипящая ручьев с ГО формирует водоток с радикально отличающимися свойствами: водностью, температурой и химическим составом.

Суммарный сток из ГО1 и ГО2 составил 23 л/с. Расчет испарения по (Ryan, 1974) с площади ГО1 и ГО2 (16 м<sup>2</sup> и 54 м<sup>2</sup>) при наблюдаемых условиях (температура воздуха 20.7 °C, влажность воздуха 48 %, скорость ветра 6 м/с) дает в сумме около 1 кг/с. Таким образом, суммарная

величина поступления флюида в ГО с учетом испарения может быть оценена в ~24 л/с.

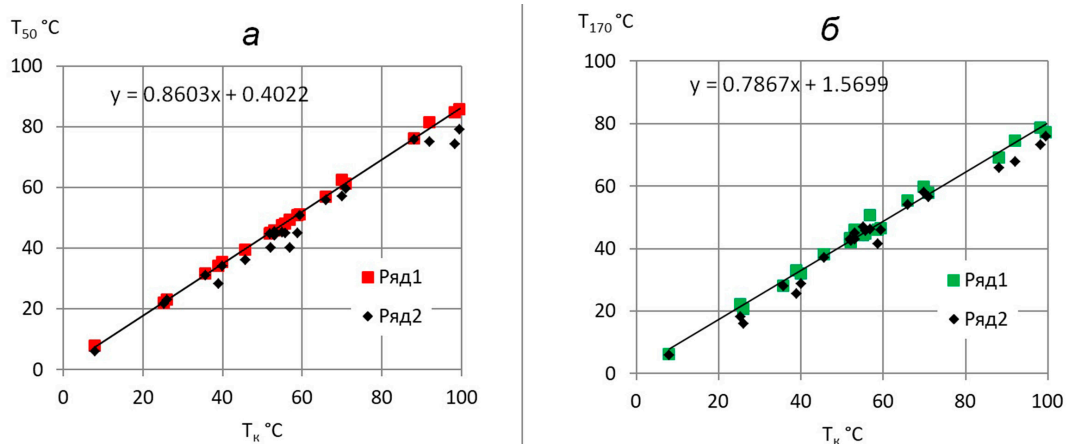
*Конаковские термальные источники* (о. Итуруп). Определить точно границы участка термальной разгрузки, когда термальный сток замаскирован, как на песчаном берегу в области литорали в месте разгрузки Конаковских источников, достаточно сложно. Здесь нет четкого выхода и стока термальной воды, не образуются минеральные налеты или плащи, воздействие приливной волны способствует быстрому перемешиванию и падению температуры у берега. Для выявления границ термальной аномалии необходимо измерить температуры контактно в многочисленных точках большой площади, что может занять много времени. Именно поэтому ИК-термометрия с БПЛА в таких условиях значительно упрощает задачу, позволяя сразу локализовать термальную аномалию на поверхности исследуемого участка. Съёмка источников с БПЛА была выполнена 16 августа 2023 г.

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИНФРАКРАСНОЙ СЪЕМКИ С БПЛА



**Рис. 3.** Участок исследования вдоль русла р. Кипящая (о. Итуруп) в видимом (а) и инфракрасном (б) спектрах: Д — источник Двуглавый, ГО — источники Голубые озера: 1 — точки контактного измерения температуры, 2 — расходы воды в л/с.

**Fig. 3.** Study area along the Kipashchya River channel (Iturup Island) in visible (a) and infrared (б) spectra: Д — Dvuglavyi source, ГО — Blue Lakes sources, 1 — points of contact temperature measurement, 2 — water discharge in l/s.



**Рис. 4.** Результаты калибровки ИК-камеры: температура, измеренная контактно ( $T_k$ ), против ИК-температуры с высоты полета 50 м ( $T_{50}$ ) (а) и 170 м ( $T_{170}$ ) (б). Ряд 1 — данные при максимальной открытости поверхности, ряд 2 — до удаления паровых шлейфов.

**Fig. 4.** Results of IR camera calibration: temperature measured in contact ( $T_k$ ) against the IR temperature from a flight altitude of 50 m ( $T_{50}$ ) (a) and 170 m ( $T_{170}$ ) (б). Ряд 1 — data at maximum surface openness, ряд 2 — before removal of steam plumes.

в облачную погоду на высоте 50 м при температуре воздуха 20 °С, влажности 65% и скорости ветра 2 м/с. На дату съемки песчаный берег был ровный, с небольшим уклоном в сторону уреза воды (рис. 5а).

Учитывая, что источники находятся на литорали, было выбрано время низкого уровня воды (+0.2 относительно среднего уровня моря). Визуально термальная разгрузка представляла собой небольшие лужицы с температурой 36.6–39.4 °С вокруг двух каменных выступов в песке и область высачивания у подножия дайки. Из лужиц и вдоль дайки к морю текли ручьи глубиной 1–2 см и шириной 0.1–0.3 м.

Температура песка на поверхности за пределами термальной аномалии составляла 18–20 °С (рис. 5б, участок КН3), ее наибольшее значение было принято за фоновое. Протяженность термальной аномалии составила 45 м, площадь 520 м<sup>2</sup>. Самая высокая температура 39.4 °С зафиксирована в северо-восточной части (рис. 5б, участок КН2). Температура на глубине 0.20 м вдоль линии максимальных температур на поверхности составляла 45–53.8 °С. Выделение газа, которое наблюдалось в 2021 г. (Калачева и др., 2022а), отсутствовало.

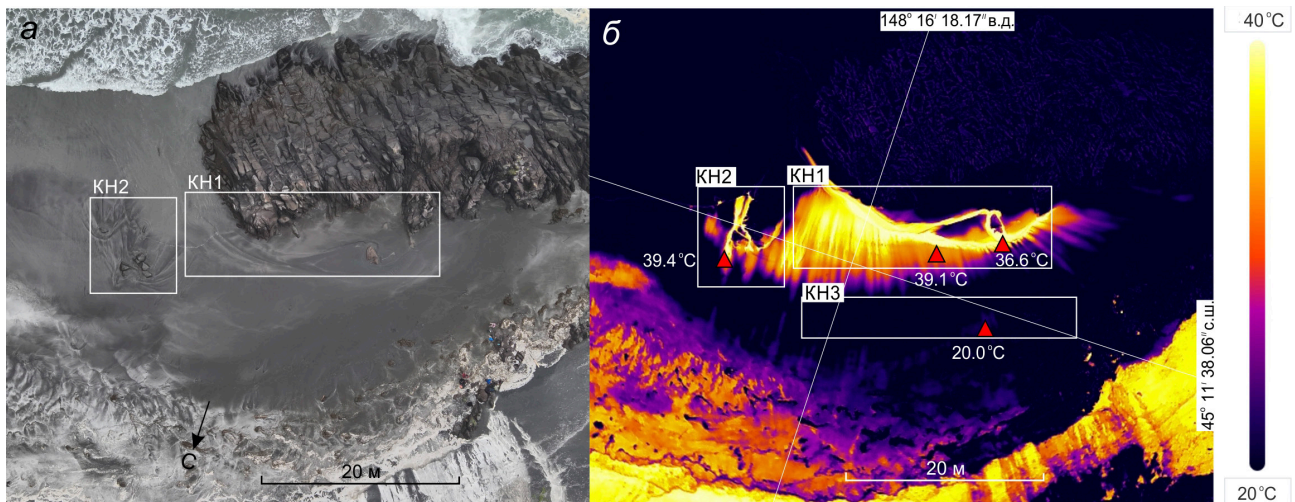
*Термальные проявления о. Янкича.* Аэрофотосъемка о. Янкича была выполнена 24 августа при наземной температуре воздуха 16 °С и влажности 59%, в условиях низкой облачности (100 м), скорости ветра 1.5–4 м/с. Высота полетов составляла 20 м, 50 м и 110 м. Для корректировки полетной термометрии были выполнены наземные измерения температуры в 20 точках (рис. 6а). В результате калибровки ИК-камеры для высоты полета 50 м согласно уравнению регрессии коэффициент атмосферного пропускания близок к 0.8 (рис. 6д), что значительно меньше коэффициента

0.86, полученного для р. Кипящая (рис. 4а) при других атмосферных условиях: более низкой температуре воздуха и высокой влажности.

С максимальной высоты полета 110 м, несмотря на неблагоприятные метеорологические условия (полет в облаке), области термальной разгрузки юго-восточного берега были четко различимы (рис. 6б) благодаря более высокому коэффициенту пропускания ИК излучения в спектре 8–14 мкм по сравнению с видимым спектром: к примеру, 10% видимого излучения против 50–60% пропускаемого ИК излучения в этом диапазоне (Михеев, 2017). Однако средняя ошибка составила уже 36 °С при коэффициенте пропускания 0.33.

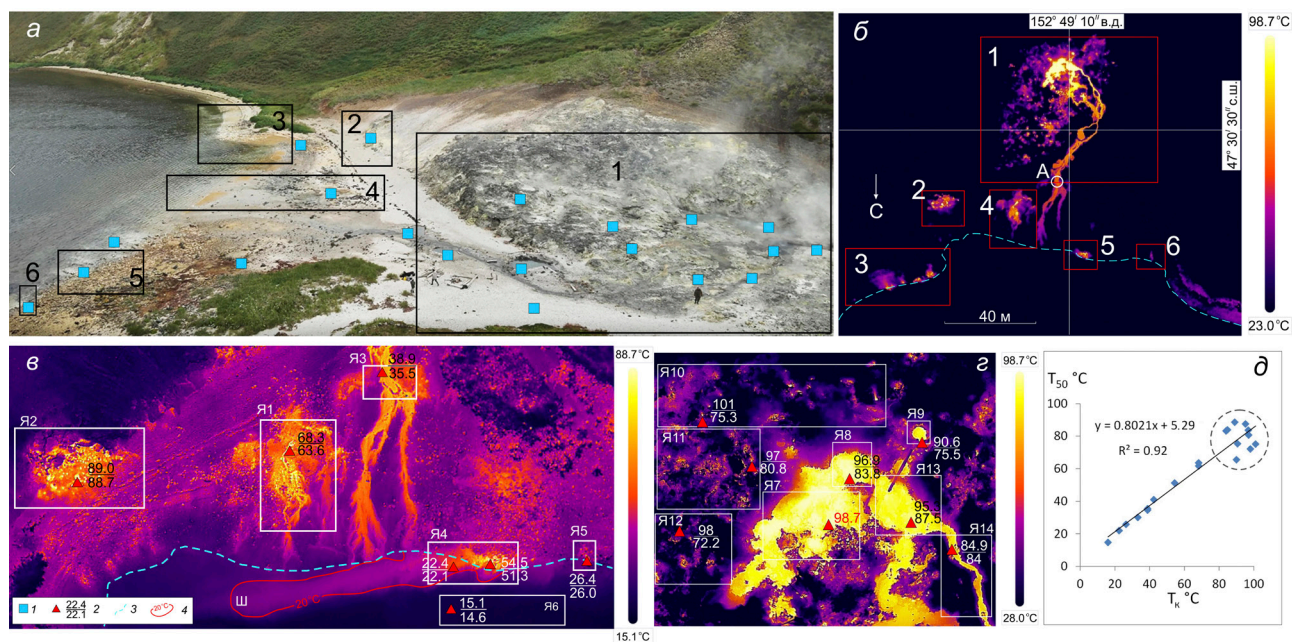
Наиболее удачной для комплексного анализа данных была принята высота полета 50 м (из-за сильного парения на высоте 20 м в районе кипящих котлов и фумарол). Участки 3–6 характеризуются прогревом береговых отложений, выходом термальной воды и спонтанного газа на литорали (рис. 6а, 6б), а по данным (Гавриленко и др., 1989; Tarasov, 2006) и в верхней сублиторали. Яркие термальные аномалии на снимках были приурочены преимущественно к береговым участкам, диапазон температуры составил 22.4–68.3 °С. Крайние значения получены для участка 6 (рис. 6б) и участка 4 (на рис. 6в, участок Я1). На участке 4 отсутствовал поверхностный сток в море из-за просачивания в береговые отложения, но сосредоточенный подповерхностный сток был явно виден в тепловом спектре. Разгрузка термальной воды с участков 3, 5 и 6 осуществлялась ниже уреза воды.

Участки 1 и 2 приурочены к фронтальной части конуса выноса небольшого склонового сея. На участке 2 наблюдались слабые газовые струи в обрыве и у его подошвы. Газ в обрыве



**Рис. 5.** Видимое (а) и ИК-изображение (б) Конаковских термальных источников (о. Итуруп). Обозначения см. на рис. 2.

**Fig. 5.** Visible (а) and infrared images (б) of Konakovskie thermal springs (Iturup Island). See Fig. 2 for designations.



**Рис. 6.** Газо-гидротермальные проявления в юго-восточной части бухты Кратерная (о. Янкича) в видимом (а) и инфракрасном спектре (б) с обозначением номеров участков термальных аномалий. Участки термо съемки 2, 3–6 (в) и 1 (г) в увеличенном масштабе. (д) Корреляция между температурой, измеренной контактно ( $T_k$ ), и ИК-температурой с высоты полета 50 м ( $T_{50}$ ) без учета атмосферного ослабления излучения, пунктир — область максимальных погрешностей измерения. 1 — точки контактного измерения температуры, 2 — максимальная температура в °С (измеренная контактно в знаменателе и ИК-температура в числителе), 3 — береговая линия, 4 — изотерма 20 °С для теплового шлейфа.

**Fig. 6.** Gas-hydrothermal manifestations in the southeastern part of the Kraternaya Bay (Yankich Island) in the visible (а) and infrared spectrum (б) with the designation of thermal anomaly site. Thermal survey plots 2, 3–6 (в) and 1 (г) in an enlarged scale. (д) Correlation between the temperature measured in contact ( $T_k$ ) and the IR temperature from a flight altitude of 50 m ( $T_{50}$ ) without taking into account atmospheric attenuation of radiation. The dashed line is the area of maximum measurement errors. 1 — points of contact temperature measurement, 2 — maximum temperature in °C (measured in contact in the denominator and IR temperature in the numerator), 3 — coastline, 4 — isotherm of 20 °C for the thermal plume.

выходил из отверстий в серных корках. Участок 1 самый крупный по площади, состоит из бугра серных отложений с многочисленными относительно слабыми фумарольными выходами (температура газов на выходе 97–99 °С) и группы бурлящих водных и грязевых котлов у его подножия. Наиболее высокие температуры до 83.8–98.7 °С получены для бурлящих водных и грязевых котлов. Для них ИК-термометрия показала стабильно более низкие температуры из-за сильного парения с ошибками в диапазоне 0.2–16.2 °С. Исключением стало максимальное значение температуры 98.7 °С (на рис. 6г, участок Я7), которое не было зафиксировано контактно. Что показало несомненное преимущество фотографирования с БПЛА и наличия возможности измерения тепловых характеристик по всей площади объекта. Из-за дальнейшего ухудшения погодных условий работу на острове пришлось прервать, чтобы судно могло укрыться от надвигающегося шторма. Ограниченное время работы не дало возможности использовать преимущества серийной съемки, как было сделано на р. Кипящая.

Фумарольная разгрузка на участке 1 характеризовалась трещинными и точечными выходами газа из отверстий в серных корках, провалами размером 15–50 см с широкими устьями фумарол, все время закрытыми газом. Часть выходов имела размеры субпиксельного размера (размер пикселя при съемке с 20 м составлял 8.41 см<sup>2</sup>). Соответственно, вклад более холодной серной корки, окружающей фумаролы, приводил к снижению интегрированной температуры пикселя (Harris et al., 2009; Spampinato et al., 2011), а постоянная загазованность крупных выходов способствовала поглощению части ИК-излучения. В итоге для участка фумарольной разгрузки погрешность измерения с БПЛА даже с высоты 20 м составляла 15–22 °С, с высоты 50 м достигала 26 °С (на рис. 6г, участки Я10–Я12).

Сток из водных и грязевых котлов осуществлялся двумя ручьями (84.9 °С и 66 °С), сливающимися в один, затем снова раздваивающимися. В точке А (рис. 6б) расход ручья составлял ~2 л/с. Общая длина ручьев составляла 80 м. Один из ручьев вливался в бухту Кратерная (рис. 1г, рис. 6б), второй просачивался в береговые

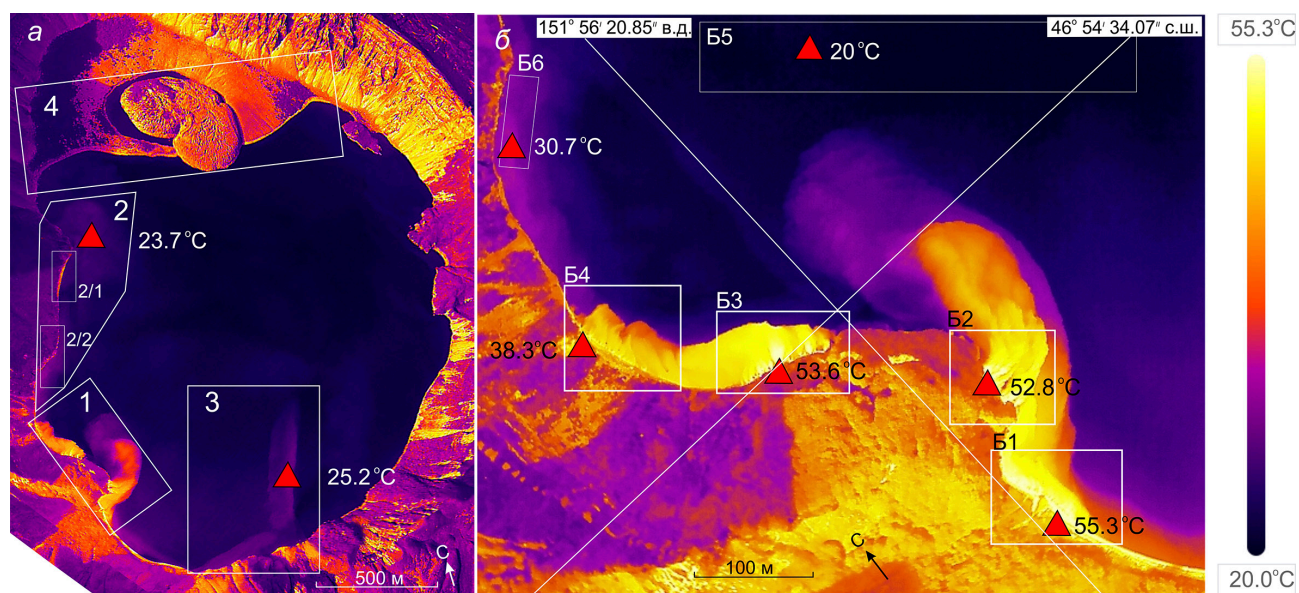
отложения (ИК-съемка визуализирует его подрусловый сток (рис. 6в). В море разгрузка участков 1, 4 и 5 объединялась в четко выраженный термальный шлейф с начальной температурой 22.4 °С (на рис. 6в, участок Я4). Протяженность шлейфа, ограниченного изотермой 20 °С, составляла ~50 м (на рис. 6в, участок Ш). Температура воды на расстоянии 10–20 м от берега составляла ~15 °С, на расстоянии 50 м 12–13 °С, в центре бухты 8–9 °С, в океане 4.3 °С.

Работа в бухте Кратерной проводилась в условиях прилива при высоте уровня моря +1.1 м относительно среднего уровня, поэтому участки гидротермальной разгрузки северного и северо-восточного берегов бухты (Гавриленко и др., 1986, 1989) были затоплены.

Озеро Бирюзовое (о. Симушир) труднодоступно из-за высоких крутых бортов кальдеры (до 400 м от уреза воды). Термосъемка с БПЛА дает возможность быстрого и безопасного способа мониторинга термальной активности в кальдере, однако, из-за отсутствия данных наземных измерений, можно говорить только о кажущихся ИК-температурах. Полеты выполнялись в вечернее время 24 августа с бровки кратерного уступа высотой 330 м. Юго-западный, западный и часть северного берегов находились в тени, остальное пространство было освещено заходящим солнцем. Минимальная высота полета над оз. Бирюзовое составляла 300 м. После обработки ИК-снимков на поверхности

оз. Бирюзовое были выделены три участка с температурами выше фона (на рис. 7а, участки 1–3), за фоновую была принята температура воды 20 °С, полученная для центральной части озера (на рис. 7б, участок Б5).

Участок 1 соответствует области разгрузки под водой постоянно действующих горячих источников и газовых выходов юго-западного берега, о которых ранее сообщалось в работах всех исследователей (Козлов, Жарков, 2009, 2012; Корсунская, 1956; Мархинин, Стратула, 1977; Соловьев, 1947). Здесь зафиксирована термальная аномалия с максимальным отклонением температуры от фона. По яркостным характеристикам выделяются два участка, разделенные небольшим неактивным берегом (рис. 7б, участки Б1–Б4), окружающие выступающий мыс, представляющий собой экструзию андезитов (Горшков, 1967). Общая протяженность разгрузки вдоль береговой линии составила ~500 м. Максимальные значения температуры воды в полосе разгрузки источников от 38.3 °С до 55.3 °С. Источники на участках Б2–Б4 (рис. 7б) разгружались под водой, на участке Б1 — ниже уреза воды и на берегу (термальные ручейки). От более южной группы источников протягивался общий шлейф прогретых вод длиной более 200 м, заметный только в тепловом диапазоне. Ось шлейфа отклонялась к северо-западу, вероятно, под влиянием слабого юго-восточного ветра (1–2 м/с).



**Рис. 7.** Оз. Бирюзовое (о. Симушир): мозаичное ИК-изображение с термальными аномалиями (1–3) и участком 4, на котором термальная аномалия отсутствует, но ранее наблюдалась гидротермальная активность (Мархинин, Стратула, 1977) (а). Увеличенное изображение участка 1 (б). Обозначения см. на рис. 2. Пояснения в тексте.

**Fig. 7.** Biryuzovoye Lake (Simushir Island): mosaic IR image with thermal anomalies (1–3) and site 4, which has no thermal anomaly, but hydrothermal activity was previously observed (Markhinin, Stratula, 1977) (a). Enlarged image of site 1 (b). See Fig. 2 for designations. Explanations in the text.

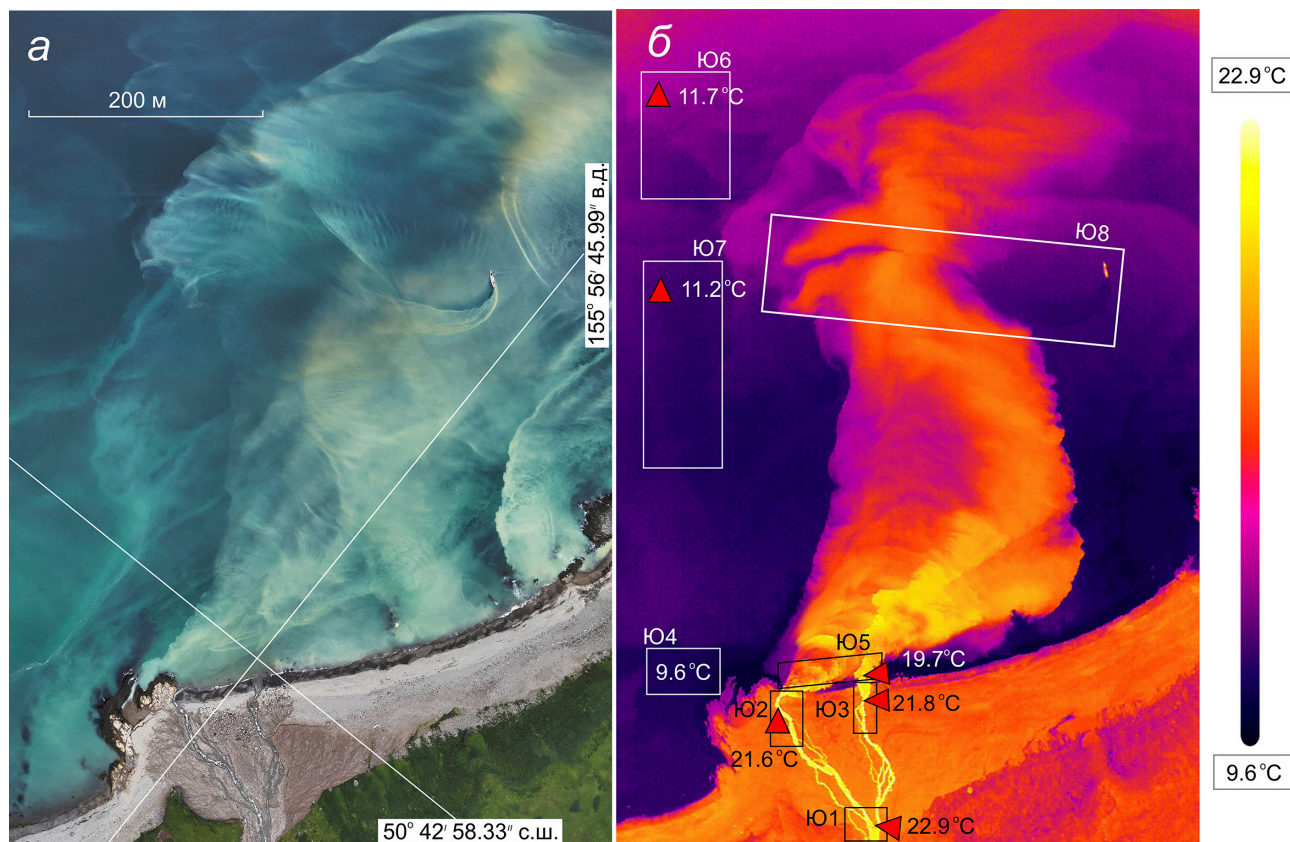
Берег участка 2 во время проведения съемки был уже в тени. Быстрое падение температуры поверхности до 20–22 °С четко фиксируется ИК-съемкой на границе смены освещенности (теневого берега), что хорошо видно по северному берегу (участок 4). Центральная часть западного берега (рис. 7а, участок 2/1) при этом имела более высокие температуры 40–45 °С, однако температура воды у берега была всего на 2–3 °С выше фонового значения. Соответственно, предполагаемая термальная разгрузка на этом участке длиной 180 м незначительна. Температура воды вдоль южной части западного берега (участок 2/2 на рис. 7а, участок Бб на рис. 7б) была значительно выше фона (до 30.7 °С против ~20 °С), что предполагает наличие подводной разгрузки термальных вод.

На участке 3 (рис. 7а) вдоль берега и к центру озера протягивался шлейф более теплой воды (на 2–5 °С выше фона) общей длиной около 1 км. Его происхождение может быть связано с дневным прогревом воды вблизи южного берега и сносом течением. Однако нельзя исключать и возможное наличие термальной разгрузки на глубине, недостаточно сильной, чтобы создавать яркую термальную аномалию на поверхности.

На северном берегу оз. Бирюзовое (участок 4 на рис. 7а) в течение нескольких лет после извержения 1957 г. наблюдалась фумарольная активность и выходили горячие источники (Мархинин, Стратула, 1977). При нашем обследовании на северном берегу термальные аномалии не были установлены. Нагрев береговых отложений и поверхности экструзивного купола до температур 35–40 °С обеспечивается солнечной радиацией. Небольшой прогрев воды у берега на удалении не более 100 м, соответственно, является результатом теплообмена с горячим берегом.

*Река Юрьева* (о. Парамушир). 26 августа была выполнена ИК-съемка устья р. Юрьева и прилегающего участка моря, в котором происходит смешение холодных морских и теплых речных вод. Полеты БПЛА совершались на высотах 50–1500 м при скорости ветра 4 м/с, температуре воздуха 15 °С и влажности 70%. Видимый желто-зеленый коллоидный шлейф (рис. 8а) в день наблюдения занимал площадь ~1.9 км<sup>2</sup> и был растянут вдоль берега на 2.9 км и на 0.9 км в море напротив устья реки.

Температура речной воды перед выходом на литораль составляла 22.9 °С, в устье 21.6 °С и 21.8 °С в разных протоках (рис 8б, участки



**Рис. 8.** Тепловой шлейф р. Юрьева (о. Парамушир) в приустьевой зоне в видимом (а) и инфракрасном (б) спектрах. Обозначения см. на рис. 2.

**Fig. 8.** Thermal plume of Yurieva River (Paramushir Island) in the estuary zone in the visible (a) and infrared (b) spectra. See Fig. 2 for designations.

измерения Ю1–3), фоновой морской воды 9.6 °С (рис. 8б, участок Ю4), воды в шлейфе у берега 19.7 °С (рис. 8б, участок Ю5).

Термальный шлейф имел четкие границы по изотерме 13 °С (рис. 8б) на протяжении 420 м, начальный контраст температуры шлейфа и фона составлял 10.1 °С. За пределами этой зоны перемешивание с морской водой и охлаждение вело к растеканию шлейфа и понижению температуры (не более чем на 2–3 °С выше фона) (рис. 8б, участки измерения Ю6, Ю7). Аномальные значения температуры (по изотерме 1 °С) сохранялись на площади, составляющей ~80% площади коллоидного шлейфа. Толщина термального слоя в этой части шлейфа вряд ли превышала 2 м, так как за движущимся судном с осадкой 1.8 м оставался «холодный» след (рис. 8б, участок Ю8).

## ВЫВОДЫ

Впервые выполнена инфракрасная съемка с помощью БПЛА на пяти термальных объектах Курильских островов. Получены тепловые карты участка высокотемпературных гидротерм р. Кипящая (Голубых озер и источника Двуглавого), Конаковских источников (о. Итуруп), крупного участка газо-гидротермальной разгрузки о. Янкича, источников в оз. Бирюзовое кальдеры вулкана Заварицкого (о. Симушир). Для первых трех объектов параллельно проводилось наземное контактное измерение температуры в реперных точках для верификации данных термосъемки с БПЛА. Полученные по уравнениям регрессии коэффициенты атмосферного пропускания для р. Кипящая и о. Янкича, значительно отличаются, что связано с разным состоянием атмосферы при полетах. Поэтому при отсутствии возможности контрольных наземных измерений, следует говорить о кажущихся значениях ИК-температуры. Термальные аномалии труднодоступного оз. Бирюзовое были идентифицированы как области явной и предполагаемых гидротермальных разгрузок, данные были получены только с помощью аэрофотосъемки и не верифицированы наземными измерениями. На о. Парамушир установлены размеры и характеристики термального шлейфа в устье горячей р. Юрьева: на дату наблюдения площадь шлейфа по изотерме 10.6 °С (+1 °С относительно фоновой морской воды) составляла 1.5 км<sup>2</sup> и 0.08 км<sup>2</sup> по изотерме 13 °С. Совмещенное картирование в инфракрасном и видимом спектре с точной географической привязкой значительно облегчит в дальнейшем мониторинг изученных объектов.

Автор благодарит Г.Л. Панина (Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН) и Л.В. Котенко (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН)

за предоставленную возможность работы на Курильских островах и непосредственное участие в проведении исследований.

Работа выполнена в рамках НИР ИВиС ДВО РАН тема № FWEW-2019-0001 «Комплексное исследование крупных уникальных геотермальных систем, источники тепла и металллоносных флюидов».

## Список литературы [References]

- Большаков И.Е., Нуждаев А.А., Кузнецов Р.А. и др.* Экспедиция на вулканы Алаид и Эбеко (Курильские острова) летом 2023 года // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2023. Вып. 60. № 4. С. 105–113. <http://doi.org/10.31431/1816-5524-2023-4-60-105-113> [*Bolshakov I.E., Nuzhdaev A.A., Kuznetsov R.A. et al.* Expedition to Alaid and Ebeko Volcanoes (Kuril Islands) in Summer 2023 // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2023. № 4(60). P. 105–113 (in Russian)]
- Бондаренко В.И., Рашидов В.А.* Строение вулканического массива Ушишир (Центральные Курилы) // Вулканология и сейсмология. 2018. № 1. С. 18–34. <http://doi.org/10.7868/S0203030618010029> [*Bondarenko V.I., Rashidov V.A.* The structure of the Ushishir volcanic massif (Central Kuriles) // Journal of Volcanology and Seismology. 2018. Iss. 12. P. 16–33. <http://doi.org/10.1134/S0742046318010025>].
- Гавриленко Г.М., Бондаренко В.И., Гусева В.И. и др.* Исследования на вулкане Ушишир (Курильские острова) в августе 1983 г. // Вулканология и сейсмология. 1986. № 1. С. 3–12 [*Gavrilenko G.M., Bondarenko V.I., Guseva V.I. et al.* Research on the Ushishir volcano (Kuril Islands) in August 1983 // Journal of Volcanology and Seismology. 1986. Iss. 1. P. 3–12 (in Russian)].
- Гавриленко Г.М., Бондаренко В.И., Сазонов А.П.* Морские вулканологические исследования бухты Кратерной // Биология моря. 1989. № 3. С. 19–28. [*Gavrilenko G.M., Bondarenko V.I., Sazonov A.P.* Marine volcanological studies of the Kraternaya bay // Soviet Journal of Marine Biology. 1986. Iss. 3. P. 19–28].
- Горшков Г.С.* Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 287 с. [*Gorshkov G.S.* Volcanism of the Kuril Island arc. Moscow: Nauka, 1967. 287 p. (in Russian)].
- Дегтерев А.В., Козлов Д.Н., Хубаева О.Р., Хомчановский А.Л.* Экспедиция по изучению новых термальных проявлений на о. Итуруп в 2022 г. // Геосистемы переходных зон. 2022. Т. 6. № 2. С. 130–135. <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.2.130-135> [*Degterev A.V., Kozlov D.N., Hubaeva O.R., Khotchanovskiy A.L.* Expedition to study new thermal manifestations on Iturup Island in 2022 // Geosystems of Transition Zones. 2022. V. 6. № 2. P. 130–135 (in Russian)].
- Зеленов К.К., Ткаченко Р.П., Канакина М.Л.* Перераспределение рудообразующих элементов в процессе гидротермальной деятельности влк. Эбеко (о. Парамушир) // Тр. ГИНАН СССР. 1965. Вып. 141. С. 140–167 [*Zelenov K.K., Tkachenko R.P., Kanakina M.L.* Pereraspredeleniye rudoobrazuyushchikh elementov v protsesse gidrotermal'noy deyatelnosti vлк. Ebeko (o. Paramushir) // Tr. GIN AN SSSR. 1965. V. 141. P. 140–167 (in Russian)].

- Знаменский В.С., Никитина И.Б.* Гидротермы центральной части острова Итуруп (Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 1985. № 5. С. 44–65 [*Znamenskiy V.S., Nikitina I.B.* Hidrotermy tsentral'noy chasti ostrova Iturup (Kuril'skiye ostrova) // Vulkanology and Seismology. 1985. № 5. P. 44–65 (in Russian)].
- Иванов В.В.* Современная гидротермальная деятельность вулкана Эбеко на острове Парамушир // Геохимия. 1957. № 1. С. 63–77 [*Ivanov V.V.* Modern hydrothermal activity of the Ebeko volcano on Paramushir Island // Geochemistry. 1957. № 1. P. 63–77 (in Russian)].
- Калачева Е.Г.* Геохимический мониторинг Верхне-Юрьевских источников (с 1955 по 2019 гг.) (о. Парамушир, Курильские острова) // Материалы XXIII региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвященной Дню вулканолога, 30–31 марта 2020 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 171–174 [*Kalacheva E.G.* Geokhimicheskiy monitoring Verkhne-Yur'yevskikh istochnikov (s 1955 po 2019 gg.) (o. Paramushir, Kuril'skiye ostrova) // Materials of the XXIII regional scientific conference «Volcanism and related processes», dedicated to the day of the volcanologist, March 30–31, 2020. Petropavlovsk-Kamchatsky: IViS FEB RAS, 2020. P. 171–174 (in Russian)].
- Калачева Е.Г., Котенко Т.А., Волошина Е.В., Эрдниева Д.М.* Береговые термальные источники центральной части о. Итуруп: макро- и микроэлементный составы // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2022а. Вып. 55. № 3. С. 31–44. <http://dx.doi.org/10.31431/1816-5524-2022-3-55-31-44> [*Kalacheva E.G., Kotenko T.A., Voloshina E.V., Erdnieva D.M.* Coastal thermal springs in the central part of Iturup island: macro- and microelement composition // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2022. № 3(55). P. 31–44 (in Russian)].
- Калачева Е.Г., Таран Ю.А., Волошина Е.В. и др.* Кратерное озеро Кипящее в кальдере вулкана Головнина; геохимия воды и газов, вынос магматических летучих (о. Кунашир) // Вулканология и сейсмология. 2023. № 1. С. 3–20. <http://doi.org/10.31857/S0203030622700018> [*Kalacheva E.G., Taran Yu.A., Voloshina E.V. et al.* Crater Lake Kipyashchee of Volcan Golovnin Caldera: Geochemistry of Water and Gases, Output of Magmatic Volatitives (Kunashir Island) // Journal of Volcanology and Seismology. 2023. V. 17. Iss. 1. P. 1–16. <http://doi.org/10.1134/s0742046322700063>].
- Калачева Е.Г., Таран Ю.А., Котенко Т.А., Волошина Е.В., Эрдниева Д.М.* Ультракислые сульфатно-хлоридные воды вулкана Баранского (о. Итуруп, Курильские о-ва). Состав и вынос магматических и породообразующих компонентов // Вулканология и сейсмология. 2022б. № 5. С. 31–48. <https://doi.org/10.31857/S0203030622050054> [*Kalacheva E.G., Taran Yu.A., Kotenko T.A. et al.* Ultra Acid Sulfate Chloride Waters of Baransky Volcano on Iturup Island, Kurils. The Composition and Output of Magmatic and Rock-Forming Components // Journal of Volcanology and Seismology. 2022. Vol. 16. Iss. 5. P. 349–364. <https://doi.org/10.1134/S0742046322050050>].
- Ковтунович П.Ю., Сафронов А.Д., Удодов В.В. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации 1:200000. Курильская серия. С-Петербург: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2002 [*Kovtunovich P.Yu., Safronov A.D., Udodov V.V. et al.* Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii 1:200000. Kuril'skaya seriya. S-Peterburg: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI, 2002 (in Russian)].
- Козлов Д.Н., Жарков Р.В.* Тепловизионная съемка активных вулканов Курильских островов в 2009–2011 гг. // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2012. № 1. Вып. 19. С. 231–239 [*Kozlov D.N., Zharkov R.V.* Heat Vision Survey at Active Volcanoes of the Kurile Islands in 2009–2011 // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2012. № 1(19). P. 231–239 (in Russian)].
- Козлов Д.Н., Жарков Р.В.* Новые данные по морфологии внутрикальдерных озер островов Кунашир и Симушир // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2009. № 2. Вып. 14. С. 159–164 [*Kozlov D.N., Zharkov R.V.* New Data on the Morphology of Intercalderal Lakes on Kunashir and Simushir Islands // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2009. № 2(14). P. 159–164 (in Russian)].
- Корсунская Г.В.* Вулканы острова Симушир // Бюл. вулканол. станции. 1956. № 24. С. 61–65. [*Korsunskaya G.V.* Vulkany ostrova Simushir // Byulleten volkanologicheskikh stantsiy. 1956. № 24. P. 61–65. (in Russian)].
- Котенко Т.А., Мельников Д.В., Тарасов К.В.* Газовая эмиссия вулкана Эбеко (Курильские острова) в 2003–2021 гг.: геохимия, потоки и индикаторы активности // Вулканология и сейсмология. 2022. № 4. С. 31–46. <https://doi.org/10.31857/S0203030622040058> [*Kotenko T.A., Melnikov D.V., Tarasov K.V.* Gas Emission on Ebeko Volcano, Kuril Islands in 2003–2021: Geochemistry, Flows, and Indicators of Activity // Journal of Volcanology and Seismology. 2022. V. 16. Iss. 4. P. 264–279. <https://doi.org/10.1134/S0742046322040054>].
- Мархинин Е.К.* Извержение вулкана Заварицкого на острове Симушир осенью 1957 г. // Бюл. вулканол. станции. 1960. № 29. С. 7–15. [*Markhinin E.K.* // Byulleten volkanologicheskikh stantsiy. 1956. № 24. P. 61–65. (in Russian)].
- Мархинин Е.К., Стратула Д.С.* Гидротермы Курильских островов. М.: Наука, 1977. 212 с. [*Markhinin E.K., Stratula D.S.* Hydrothermal Systems of Kuril Islands. Moscow: Nauka, 1977. 212 p. (in Russian)].
- Михеев С.В.* Основы инфракрасной техники. СПб: Университет ИТМО, 2017. 127 с. [*Mikheyev S.V.* Osnovy infrakrasnoy tekhniki. SPb: Universitet ITMO, 2017. 127 p. (in Russian)].
- Новейший и современный вулканизм на территории России / Отв. ред. Н.П. Лаверов. М: Наука, 2005. 604 с. [*Modern and Holocene volcanism in Russia / Ed. By N.P. Laverov. Moscow: Nauka, 2005. 604 p. (in Russian)*].
- Полонский А.* Курилы // Записки Императорского Русского географического общества по отдел. этнографии. СПб.: типография Майкова, 1871. Т. 4. 208 с. [*Polonskiy A.* Kurily // Zapiski Imperatorskogo Russkogo geograficheskogo obshchestva po otdel. etnografii. SPb.: tipografiya Maykova, 1871. V. 4. 208 p. (in Russian)].

- Разжигаяева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А. и др.* Развитие озерно-болотных обстановок осадконакопления древней кальдеры острова Расшуа (Центральные Курилы) в голоцене // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 4. С. 74–86 [*Razjigayeva N., Ganzei L., Grebennikova T. et al.* Development of lacustrine-boggy sedimentary environments in the ancient Rasshua Island caldera (Central Kuril Islands) in the Holocene // *Russian Journal of Pacific Geology*. 2012. V. 6. Iss. 4. P. 326–338. <https://doi.org/10.1134/S1819714012040069>].
- Соловьев А.И.* Курильские острова. М., Л.: Главсевморпуть, 1947. 306 с. [*Solov'yev A.I.* Kuril'skiye ostrova. Moscow, Leningrad: Glavsevmorput', 1947. 306 p. (in Russian)].
- Таран Ю.А., Гавриленко Г.М., Черткова Л.В., Гричук Д.В.* Геохимическая модель гидротермальной системы вулкана Ушишир (Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 1993. № 1. С. 55–68 [*Taran Yu.A., Gavrilenko G.M., Chertkova L.V., Grichuk D.V.* A geochemical model for a geothermal system of Ushishir volcano, Kuril Islands // *Vulkanology and Seismology*. 1993. № 15. P. 63–79].
- Harris A.J.L., Lodato L., Dehn J. et al.* Thermal characterization of the Vulcano fumarole field // *Bulletin of Volcanology*. 2009. V. 71. № 4. P. 441–458.
- Hashimoto T., Terada A., Tanaka R.* Volcanic smoke reduction in visible and thermal infrared imagery // *Earth Planets Space*. 2018. V. 70. № 109. P. 1–10. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0886-5>
- James M.R., Brett B.C., D'Arcy F. et al.* Volcanological applications of unoccupied aircraft systems (UAS): Developments, strategies, and future challenges // *Volcanica*. 2020. V. 3. № 1. P. 67–114. <https://doi.org/10.30909/vol.03.01.67114>
- Ryan P.J., Harleman D.R.E., Stolzenbach K.D.* Surface heat loss from cooling ponds // *Water Resour Res*. 1974. V. 10. № 5. P. 930–938.
- Spampinato L., Calvari S., Oppenheimer C. et al.* Volcano surveillance using infrared cameras // *Earth Sci Rev*. 2011. V. 106. № 1–2. P. 63–91. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.003>
- Taran Yu., Kalacheva E.* Seawater hydrothermal system in the middle of the Kuril Arc: Yankich Island, Ushishir Archipelago // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2023. V. 436. 107784. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107784>
- Tarasov V.G.* Effects of shallow-water hydrothermal venting on biological communities of coastal marine ecosystems of the western Pacific // *Advances in Marine Biology*. 2006. V. 50. P. 267–421. [https://doi.org/10.1016/s0065-2881\(05\)50004-x](https://doi.org/10.1016/s0065-2881(05)50004-x)
- Walter T.R., Belousov A., Belousova M. et al.* The 2019 Eruption Dynamics and Morphology at Ebeko Volcano Monitored by Unoccupied Aircraft Systems (UAS) and Field Stations // *Remote Sens*. 2020. V. 12. 1961. <https://doi.org/10.3390/rs12121961>
- Zharkov R.V.* Thermal springs of the Ushishir volcano (Russia) // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 324 012021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012021>

## FIRST RESULTS OF UAV INFRARED SURVEY OF THERMAL OBJECTS OF THE KURIL ISLANDS IN 2023

T.A. Kotenko

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006;  
e-mail: sinarka2017@mail.ru*

Received December 15, 2023; revised April 13, 2024; accepted June 25, 2024

For monitoring hard-to-reach thermal facilities, remote surveillance techniques from unmanned aerial vehicles (UAVs) equipped with a thermal infrared camera represent a progressive platform for rapid information collection. This paper presents the first results of such an application of UAVs to study five thermal objects on the Kuril Islands. Four of them (Kipyashchaya River on Iturup Island, Lake Biryuzovoye on Simushir Island, Yankich Island and Yurieva River on Paramushir Island) are associated with active volcanoes. Heat maps with precise geographical reference have been obtained for all sections of gas hydrothermal discharge. For Kipyashchaya River and Yankich Island verification of air thermometry by ground data was performed and real atmospheric attenuation coefficients were obtained for different flight altitudes under observed meteorological conditions. The first data on the parameters of the thermal plume from the hot Yurieva River flowing into the Sea of Okhotsk were obtained.

*Keywords: UAV, aerial photography, infrared, Kuril Islands, hot springs, fumaroles.*