

**Первые данные о диффузионном почвенном потоке CO<sub>2</sub> в районе Нижне-Щапинских термальных источников (Камчатка)**

*Мельников Д.В., Калачева Е.Г., Таран Ю.А.*

**First data on the diffusive soil flux of CO<sub>2</sub> in the area of Nizhne-Shchapinskie thermal springs (Kamchatka)**

*Melnikov D.V., Kalacheva E.G., Taran Yu.A.*

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;*

*e-mail: dvm@kscnet.ru*

Впервые проведены измерения диффузионного потока почвенного газа CO<sub>2</sub> в районе Нижне-Щапинских термальных источников (Центральная Камчатка). Измеренная величина потока составила около 7±1.3 тонн/сутки с площади 22 000 м<sup>2</sup>.

Нижне-Щапинские (Кипелье) углекислые термальные источники расположены в пределах Щапинского грабена, в верхнем течении р. Левая Щапина (55.1360° с.ш., 160.0953° в.д.). Для этого района характерно развитие современных тектонических процессов, представленных молодыми разломами. В 10 км от источников начинаются склоны действующего вулкана Кизимен. Термовмещающими являются вулканогенные образования неогенового возраста, перекрытые чехлом рыхлых четвертичных образований. Разгрузка представлена грифонами, ваннами, термальными озерами с восходящими интенсивно газующими потоками термальных (максимальная температура 39 °С) вод Mg-Na-HCO<sub>3</sub> состава с минерализацией до 3.7 г/л и рН=6.3-6.5. Основные выходы сконцентрированы на двух площадках, разделенных руслом р. Левая Щапина (рис. 1), детальное их описание представлено в работах [1, 2].

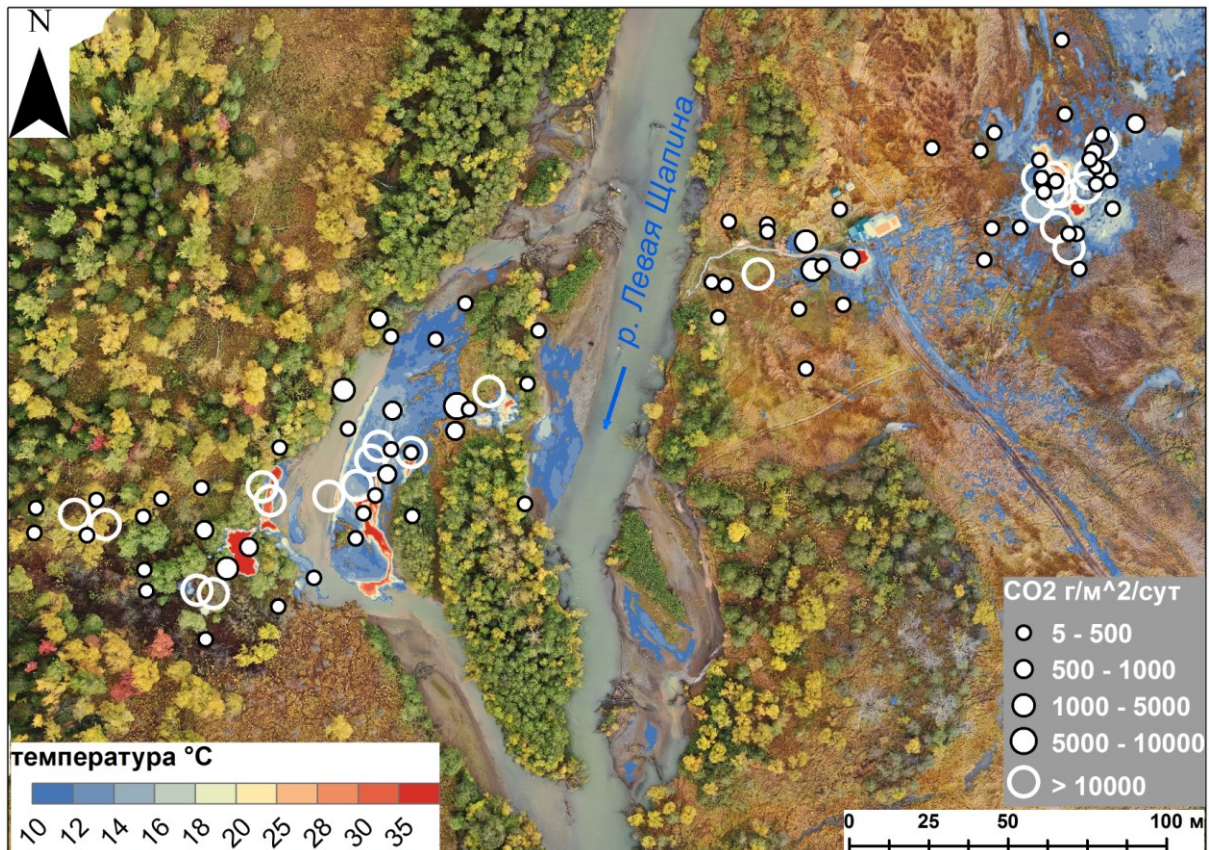


Рис. 1. Ортофотоплан района Нижне-Щапинских термальных источников. Цветовой палитрой от синего до красного показано распределение температуры, определенной по данным инфракрасной съемки. Кругами отмечены точки измерения CO<sub>2</sub>.

В сентябре 2024 г. нами впервые проведены измерения потока почвенного  $\text{CO}_2$  с поверхности Нижне-Щапинского (НЩ) термального поля методом накопительной камеры. Дополнительно выполнены аэрофотографическая и инфракрасная съемки района работ и прилегающих территорий.

### Методы исследования

Измерения эмиссии почвенного  $\text{CO}_2$  проводились при помощи накопительной камеры PP Systems EGM-5 (США) в 98 точках (рис. 1) на площади 22 000 м<sup>2</sup>, в зоне, где сконцентрирована основная разгрузка термальных вод на левом и правом берегу р. Левая Щапина. Прибор PP Systems EGM-5 состоит из накопительной камеры объемом 1171 мл и инфракрасного газоанализатора  $\text{CO}_2$  с диапазоном измерений 0-100 000 ppm). Почвенный газ циркулировал из камеры в анализатор и обратно через пластиковые трубки с помощью воздушного насоса. Поток измерялся в течение двухминутного цикла путем расчета скорости увеличения концентрации  $\text{CO}_2$  внутри камеры. Температуру почвы измеряли на глубине 10 см отдельной термопарой.

Почвенный поток  $\text{CO}_2$  ( $\text{FCO}_2$ ) обычно измеряется в единицах: «грамм с площади 1 м<sup>2</sup> в сутки» (г/м<sup>2</sup>/сут), а результаты полевых измерений обрабатываются с помощью геостатистических методов [4, 5]. Полученные значения  $\text{FCO}_2$  были обработаны с использованием метода GSA (Graphical Statistical Approach) в соответствии с процедурой [5], чтобы охарактеризовать статистическое распределение  $\text{FCO}_2$  и сделать вывод об источнике диффузной дегазации. Низкие потоки (обычно ниже 30 г/м<sup>2</sup>/сут) могут относиться к выделению  $\text{CO}_2$ , связанному с окислением органического вещества почвы. Высокие, вплоть до десятков тысяч г/м<sup>2</sup>/сут, – к эмиссии  $\text{CO}_2$  метаморфического, гидротермального и/или вулканического происхождения [6].

Картирование распределения  $\text{FCO}_2$  было выполнено с использованием метода последовательного гауссова моделирования (sGs) в соответствии с процедурой, предложенной в работе [4]. Моделирование осуществлялось при помощи пакета gstat в среде программирования R.

Для построения ортофотоплана района проведения работ использовался квадрокоптер DJI Matrice 300 RTK с модулем ZENMUSE H20T, который состоит из цифровых камер: широкоугольной, зум-камеры и инфракрасной камеры.

### Результаты исследования

Поток почвенного  $\text{CO}_2$  в районе расположения Нижне-Щапинских термальных источников колеблется в широком диапазоне значений от 3 г/м<sup>2</sup>/сут до нескольких десятков тысяч г/м<sup>2</sup>/сут. В нашем случае самые высокие значения потока соответствовали не диффузионным, а конвективным потокам  $\text{CO}_2$ , т.е. к напорным выходам газа или вместе с источниками в виде пузырей, или в виде сухих струй. Участок измерений со значениями потока выше фоновых 1-3 г/м<sup>2</sup>/сут оказался вытянутым вдоль линии северо-восточного простирания, маркирующей активное тектоническое нарушение, по которой происходит вывод термальных вод на поверхность (рис. 1). Учитывая, что процесс конвективного потока  $\text{CO}_2$  физически отличается от почвенной диффузионной эмиссии газа, мы использовали для анализа только точки с измеренными значениями менее 10 000 г/м<sup>2</sup>/сут. Для этих данных гистограмма и логарифмически-вероятностный график  $\text{FCO}_2$  показывают наличие единственной популяции потока (рис. 2), соответствующей гидротермальному диффузионному потоку  $\text{CO}_2$ . Рассчитанный средний диффузионный поток, составляющий 430 г/м<sup>2</sup>/сут с площади 22 000 м<sup>2</sup>, дает предварительную величину общего потока около  $7 \pm 1.3$  тонн/сутки.

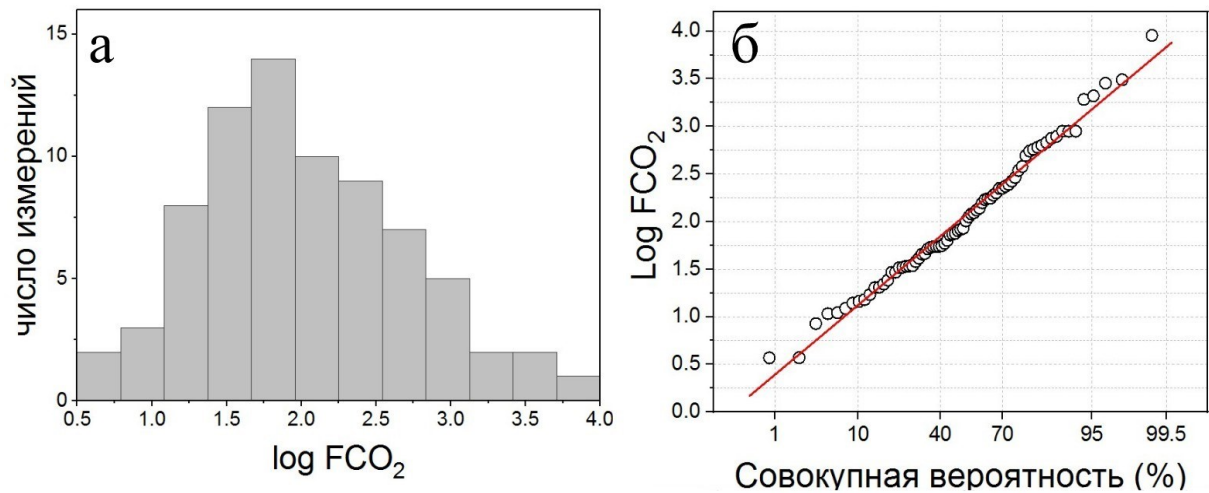


Рис. 2. Гистограмма распределения (а) и вероятностный график (б) измеренного  $FCO_2$  (среднее значение  $\log FCO_2 = 2.1 \pm 0.7$  или  $126 \pm 30$  г/м<sup>2</sup>/сут).

Эта величина потока  $CO_2$  гораздо ниже, чем измеренная авторами работы [6] для Долины смерти на Камчатке (около 8 тонн/сутки с площади около 6000 м<sup>2</sup>), но примерно соответствует диффузионным потокам с многих геотермальных полей мира [7].

Общий поток  $CO_2$  с Нижне-Щапинского термального поля, включающий эмиссию спонтанного газа из источников и сухих струй газа из почвы, гораздо выше. Его можно оценить очень приблизительно, зная общий расход термальной воды. Согласно [1], это около 40 л/сек. Отношение газ/вода (газосодержание) термальной воды источников составляет около 3 литров газа/кг воды. Эта оценка получается, если применить формулу  $\Phi = 2/N_2$  [3], где  $\Phi$  – газовый фактор ( $V_g/V_w$ ) и объем газа при нормальных условиях,  $N_2$  – содержание азота в спонтанном газе (в объемных процентах (%)), по данным работы [2]. При расходе термальных вод в 40 л/с общий конвективный поток  $CO_2$  равен примерно 20 тонн/сутки. Скорее всего, это минимальная оценка, поскольку минимальной и очень приблизительно можно назвать оценку общего расхода термальных вод.

### Выводы

Впервые измерен диффузионный поток  $CO_2$  с термального поля Нижне-Щапинских источников. Показано, что статистически поток представлен одной популяцией, и эта популяция отвечает гидротермальному  $CO_2$ . Предварительный общий диффузионный поток, определенный методом последовательного гауссова моделирования (sGs), составляет  $7 \pm 1.3$  тонн/сутки (рис. 3).

Общий поток  $CO_2$  с термальной площади Нижне-Щапинских источников, включающий диффузионный почвенный и конвекционный за счет выхода спонтанного газа и сухих газовых струй, составляет, как минимум, 20 тонн/сутки.

Измеряемый диффузионный поток (выше 3 г/м<sup>2</sup>/сут) осуществляется вдоль линии разлома северо-восточного простиранья, вдоль которой также локализованы основные термопроявления.



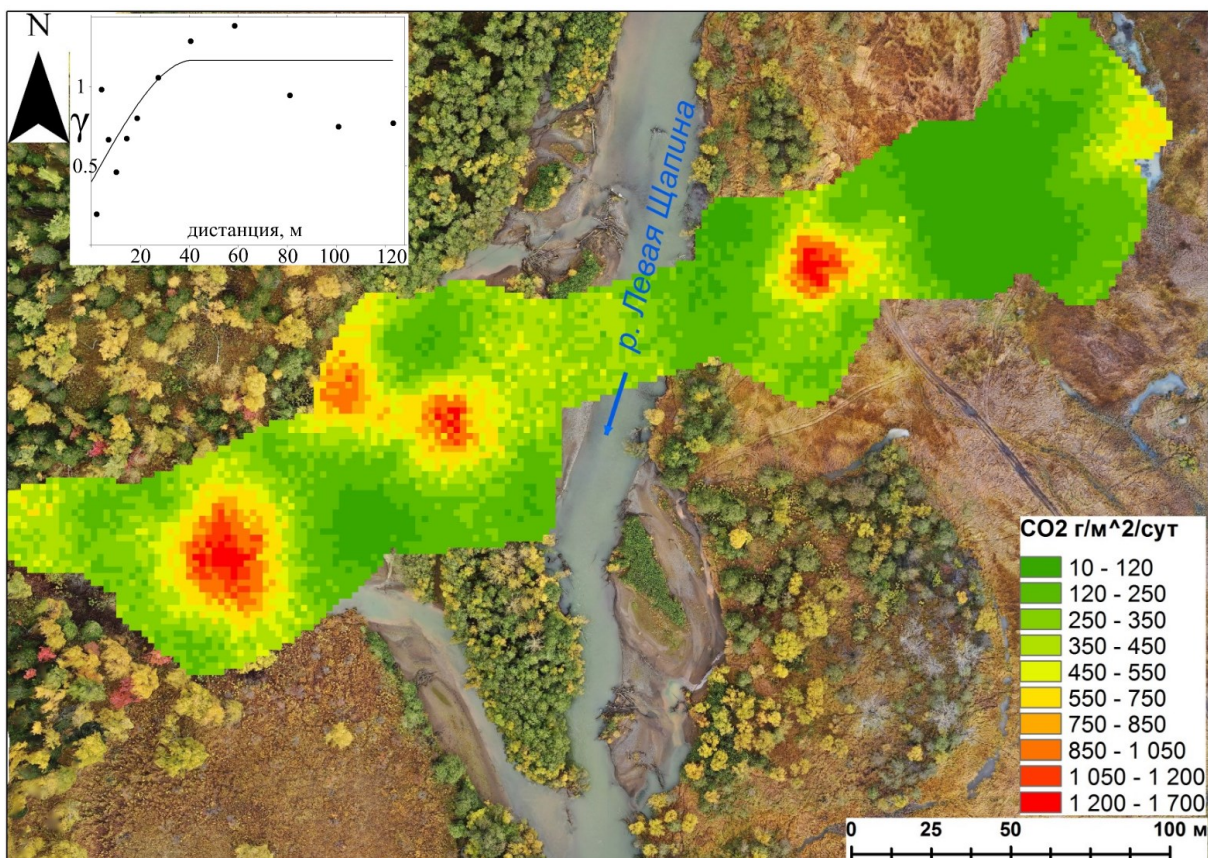


Рис. 3. Карта потока  $\text{CO}_2$ , определенного методом последовательного гауссова моделирования (sGs), в исследуемом районе и экспериментальная вариограмма нормальных значений потока  $\text{CO}_2$ .

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВиС ДВО РАН по теме НИР «Роль гидротермальных систем Курило-Камчатской вулканической дуги в перераспределении мантийного и корового вещества, в процессах минералогенеза» (№ FWME-2024-0006).

### Список литературы

1. Курсанова Т.П., Юрова Л.М. Термальные источники Щапинского грабена // Вопросы географии Камчатки. 1982. № 8. С. 59-66.
2. Малик Н.А., Таран Ю.А., Свирид И.Ю., Цховребова А.Р. Нижне-Щапинские термальные источники (Камчатка), как пример магниевых углекислых вод // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2023. Вып. 60. № 4. С. 48-66.
3. Таран Ю.А. Геохимия геотермальных газов. М.: Наука, 1988. 167 с.
4. Cardellini C., Chiodini G., Frondini F. Application of stochastic simulation to  $\text{CO}_2$  flux from soil: Mapping and quantification of gas release // Journal of geophysical research. 2003. V. 108 (B9). Art. 2425.
5. Chiodini G., Cioni R., Guidi M. et al. Soil  $\text{CO}_2$  flux measurements in volcanic and geothermal areas // Applied geochemistry. 1998. V. 13(5). P. 543-552.
6. Taran Y., Cardellini C., Tarasov K., Malik N. Diffusive emission of carbon dioxide and hydrogen sulfide from Valley of Death, Kamchatka, Russia // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2024. V. 447. Art. 108011.
7. Werner C., Fischer T., Aiupa A. et al. Carbon dioxide emission from subaerial volcanic regions. Two decades in review. / Deep Carbon, Past to Present/ Eds. B.N. Orcutt et al. Cambridge University Press, 2019. P. 188-236.