

Научная статья

УДК 551.5

EDN: SKDOEN

Результаты мониторинга концентраций парниковых газов и вариаций деформаций земной коры на мысе Шульца в зимний период 2023–2024 годов

М. А. Бовсун, Г. И. Долгих, С. Г. Долгих,
В. В. Овчаренко, И. Е. Степочкин, В. А. Чупин [✉], А. В. Яцук

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН,
Владивосток, Россия
[✉] chupin@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 25.06.2024; одобрена после рецензирования 05.09.2024;
принята к публикации 12.09.2024.

Аннотация

Цель. Целью работы является контроль климатических изменений в южной части Приморского края, связанных с вариациями метеорологических параметров, потоков парниковых газов, влиянием катастрофических деформационных процессов земной коры.

Методы и результаты. На морской экспериментальной станции «м. Шульца» проводятся непрерывные комплексные измерения стационарным аппаратно-программным измерительным комплексом газодеформационного мониторинга. Приводится краткое описание измерительного комплекса, состоящего из нескольких лазерно-интерференционных измерительных устройств (лазерные деформографы, лазерный нанобарограф, лазерный измеритель вариаций давления гидросферы) и стационарного газоанализатора закрытого типа для измерения концентраций углекислого газа и водяного пара в атмосфере. Все данные натурных измерений, полученные с использованием комплекса, собираются в общую базу данных для последующих исследований. В ходе проведенных измерений в зимний период 2023–2024 и весенний период 2024 г. получены новые данные о проявлении и взаимодействии различных геосферных процессов. В зимний период зарегистрировано превышение содержания углекислого газа в атмосфере и снижение его уровня в начале весны, связанное с сезонным изменением преобладающего направления ветра. В результате мониторинга выявлена суточная периодичность концентрации углекислого газа. При этом зарегистрировано влияние суточных вариаций температуры атмосферного воздуха на суточные вариации концентрации углекислого газа. В результате деформационного мониторинга зарегистрировано катастрофическое землетрясение, вызвавшее цунами в Японском море. Вычисление величины выявленной деформационной аномалии землетрясения позволило определить величину смещения земной коры, которое привело к возникновению волны цунами. Комплексная обработка данных показывает корреляцию микродеформаций земной коры, вариаций атмосферного давления, углекислого газа и водяного пара в атмосфере на приливных гармониках.

Выводы. Комплексный мониторинг концентраций парниковых газов и вариаций деформаций земной коры позволил выявить зависимости короткопериодных колебаний при газодеформационном межгеосферном взаимодействии. Получены новейшие данные об изменении концентраций парниковых газов в зимний период на южной территории Приморского края.

© Бовсун М. А., Долгих Г. И., Долгих С. Г., Овчаренко В. В., Степочкин И. Е., Чупин В. А., Яцук А. В., 2024


Ключевые слова: аппаратно-программный комплекс, деформация земной коры, углекислый газ, водяной пар, газогеохимический мониторинг, метеорологический мониторинг, деформационный мониторинг, цунами


Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке ФНТП «Обоснование системы климатического мониторинга дальневосточных морей и разработка методов мониторинга экстремальных погодно-климатических явлений, связанных с океаном, на основе стационарных и мобильных измерительных комплексов, а также мультисенсорного спутникового зондирования» (выполнение измерений и интерпретация полученных результатов) и темы (№124022100074-9) «Изучение природы линейного и нелинейного взаимодействия геосферных полей переходных зон Мирового океана и их последствий» (создание экспериментального комплекса).

Для цитирования: Результаты мониторинга концентраций парниковых газов и вариаций деформаций земной коры на мысе Шульца в зимний период 2023–2024 годов / М. А. Бовсун [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 6. С. 918–935. EDN SKDOEN.

Original article

Results of Monitoring of Greenhouse Gas Concentrations and Variations in the Earth's Crust Deformations at Cape Schultz in Winter Period, 2023–2024

M. A. Bovsun, G. I. Dolgikh, S. G. Dolgikh, V. V. Ovcharenko,
I. E. Stepochkin, V. A. Chupin , A. V. Yatsuk

V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,
Vladivostok, Russia
 chupin@poi.dvo.ru

Abstract

Purpose. The purpose of the study is to monitor climatic changes in the southern part of Primorsky Krai related to the variations in meteorological parameters, greenhouse gas flows, and the affect of catastrophic deformation processes of the Earth's crust.

Methods and Results. At the marine experimental station “C. Shultz”, complex measurements are continuously performed by a stationary hardware and software measuring complex for gas-deformation monitoring. The measuring complex consisting of several laser interference measuring devices (laser strainmeters, laser nanobarograph and laser meter of hydrosphere pressure variations) and a stationary closed-type gas analyzer for measuring the carbon dioxide and water vapor concentrations in the atmosphere, is briefly described. All the field measurement data obtained using the complex, are assembled in a common database for subsequent research. During the measurements performed in winter, 2023–2024 and spring, 2024, new data on the manifestations and interactions of different geospheric processes were obtained. In winter, an excess of carbon dioxide content in the atmosphere and its decrease in early spring were recorded, that was due to a seasonal change of the prevailing wind direction. The monitoring has resulted in revealing a daily frequency of the carbon dioxide concentration. At the same time, the effect of daily variations in the atmospheric air temperature upon the daily variations in carbon dioxide concentration was recorded. The deformation monitoring made it possible to record a catastrophic earthquake which caused a tsunami in the Sea of Japan. Calculation of the magnitude of the revealed deformation anomaly of the earthquake permitted to determine the magnitude of the Earth's crust displacement which led to the occurrence of a tsunami wave. Complex processing of data shows the data correlation induced by micro-deformations the Earth's crust and the variations in atmospheric pressure, carbon dioxide and water vapor in the atmosphere at tidal harmonics.

Conclusions. Comprehensive monitoring of the greenhouse gas concentrations and the variations in crustal deformations made it possible to identify the dependencies of short-period oscillations during the gas-deformation inter-geospheric interactions. The latest data on the changes in greenhouse gas concentrations in winter in the southern part of Primorsky Krai have been obtained.

Keywords: hardware and software complex, deformation of the Earth's crust, carbon dioxide, water vapor, gas-geochemical monitoring, meteorological monitoring, deformation monitoring, tsunami

Acknowledgments: The study was carried out with the financial support from FSTP “Grounds for the climate monitoring system of the Far Eastern seas and development of methods for monitoring the extreme weather and climate phenomena related to the ocean, based on stationary and mobile measuring complexes as well as multi-sensor satellite sensing” (taking measurements and interpreting the obtained results) and within the framework of theme (No. 124022100074-9) “Study of the origin of linear and nonlinear interaction between the geospheric fields of transition zones of the World Ocean and their consequences” (development of the experimental complex).

For citation: Bovsun, M.A., Dolgikh, G.I., Dolgikh, S.G., Ovcharenko, V.V., Stepochkin, I.E., Chupin, V.A. and Yatsuk, A.V., 2024. Results of Monitoring of Greenhouse Gas Concentrations and Variations in the Earth’s Crust Deformations at Cape Schultz in Winter Period, 2023–2024. *Physical Oceanography*, 31(6), pp. 863-879.

Введение

В последние годы с все нарастающей тревогой человечество следит за глобальными климатическими изменениями, которые особенно контрастно проявляются в наблюдаемых метеорологических параметрах, таких как парниковые газы, температура приземного воздуха, осадки, общая циркуляция атмосферы, состояние криосферы суши и Мирового океана, экстремальность климата.

Атмосферные концентрации трех парниковых газов, имеющих как естественные, так и антропогенные источники, значительно выросли начиная с доиндустриальной эпохи: CO₂ на 46%, CH₄ на 157%, N₂O на 22%.

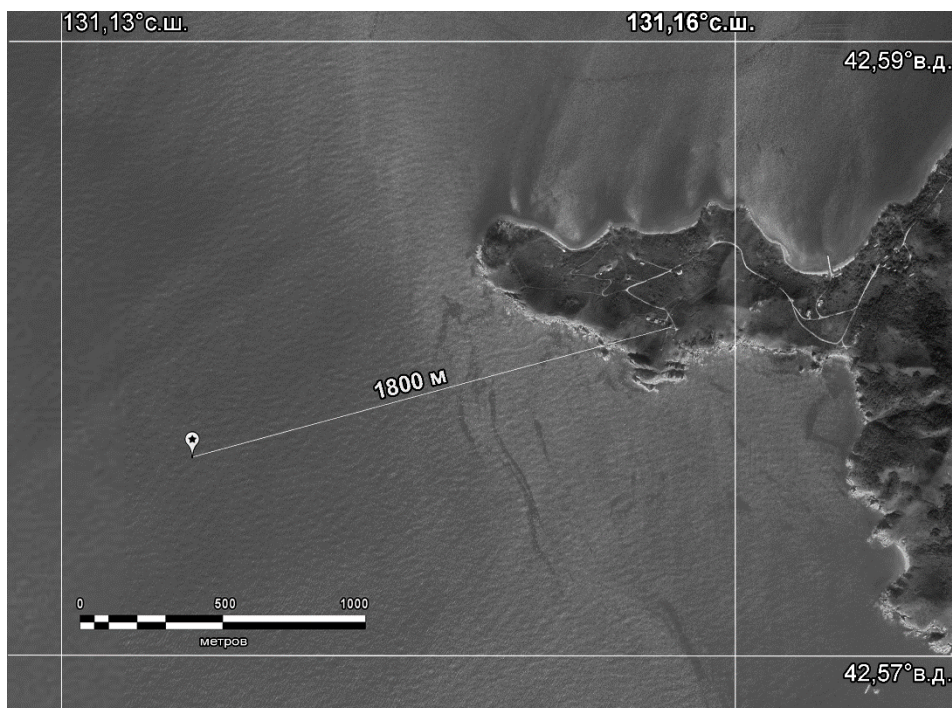
С повышением температуры, увеличением числа катастрофических процессов растут и объемы естественных выбросов. Повышение температуры вследствие деформационных, морских волновых процессов может происходить не только в земной коре, но и в атмосфере, что было отмечено в работе [1]. Возникновение микробаром (это гравитационные морские волны) коррелирует с возникновением микросейсм. Более того, одни и те же волны возбуждают микросейсм и микробаромы. Энергия микросейсм зависит от энергии морских волн. В работе [2] исследовали связь микросейсм с конкретными штормами. Крупные штормы значительно увеличивают микросейсмическую энергию [3–5]. В связи с этим исследовалась вариация сейсмического шума в десятилетних масштабах с целью выявления ее связи с изменчивостью климата [6]. Сейсмическое профилирование залива Петра Великого показывает обширные выходы газов, связанные с их скоплениями в донных осадках шельфовой области, сформировавшихся в результате преобразования органического вещества осадочных отложений [7]. При этом регистрируется высокая концентрация CO₂ в донных отложениях этой акватории [8]. Также отмечается существенное влияние приливов на интенсивность и периодичность выбросов газов [9].

В своих оценках мы должны учитывать роль деформационных процессов земной коры, вызывающих повышенные выбросы природных газов из мантии и земной коры в атмосферу. В результате комплексных измерений получены новые данные о региональных деформационных процессах и корреляции концентрации парниковых газов.

Цель настоящей работы – изучить связи деформационных процессов земной коры с выбросами природных парниковых газов на м. Шульца Приморского края России и на шельфе Японского моря с использованием созданного аппаратно-программного комплекса газодеформационного мониторинга переходной зоны атмосфера – гидросфера – литосфера [10].

Аппаратно-программный комплекс газодеформационного мониторинга

Данный комплекс состоит из лазерно-интерференционных установок для измерения деформации земной коры и вариаций атмосферного давления, стационарного газоаналитического оборудования и метеостанции. При проведении эксперимента по изучению связи динамики парниковых газов шельфовой области Японского моря с вариациями деформаций земной коры в отдельный промежуток времени НИС «Профессор Гагаринский» стоял на якоре на шельфе Японского моря в 1,8 км от места расположения лазерного деформографа (рис. 1).



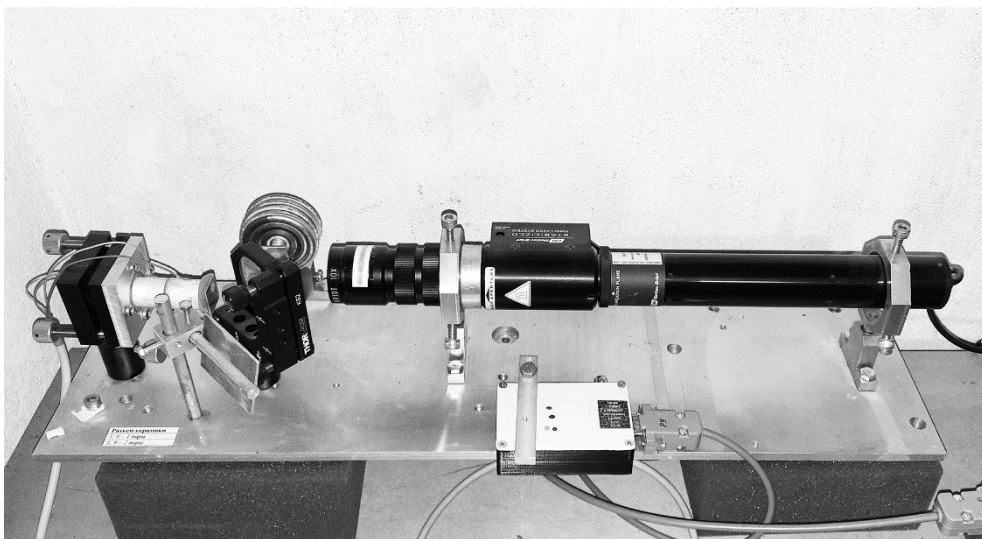
Р и с. 1. Место постановки на якорь НИС «Профессор Гагаринский» на карте
Fig. 1. Map showing the anchoring place of the R/V "Professor Gagarinsky"

Лазерно-интерференционный комплекс. На п-ове Гамова Приморского края с центром в точке с координатами $42,58^\circ$ с. ш. и $131,15^\circ$ в. д. на территории морской экспериментальной станции (МЭС) «м. Шульца» расположен лазерно-интерференционный измерительный комплекс приборов, в состав которого входят лазерный нанобарограф, лазерные деформографы с длинами измерительных плеч 52,5 и 17,5 м, лазерный измеритель вариаций давления гидросферы (рис. 2).



Р и с. 2. Схема расположения лазерных интерферометров: 1 – лазерный деформограф с длиной измерительного плеча 52,5 м; 2 – лазерный деформограф с длиной измерительного плеча 17,5 м; 3 – лазерный нанобарограф; 4 – лазерный измеритель вариаций давления гидросферы; 5 – лабораторное помещение

F i g. 2. Layout of laser interferometer locations: 1 – laser strainmeter with a measuring arm length 52.5 m; 2 – laser strainmeter with a measuring arm length 17.5 m; 3 – laser nanobarograph; 4 – laser meter of variations of hydrosphere pressure; 5 – laboratory

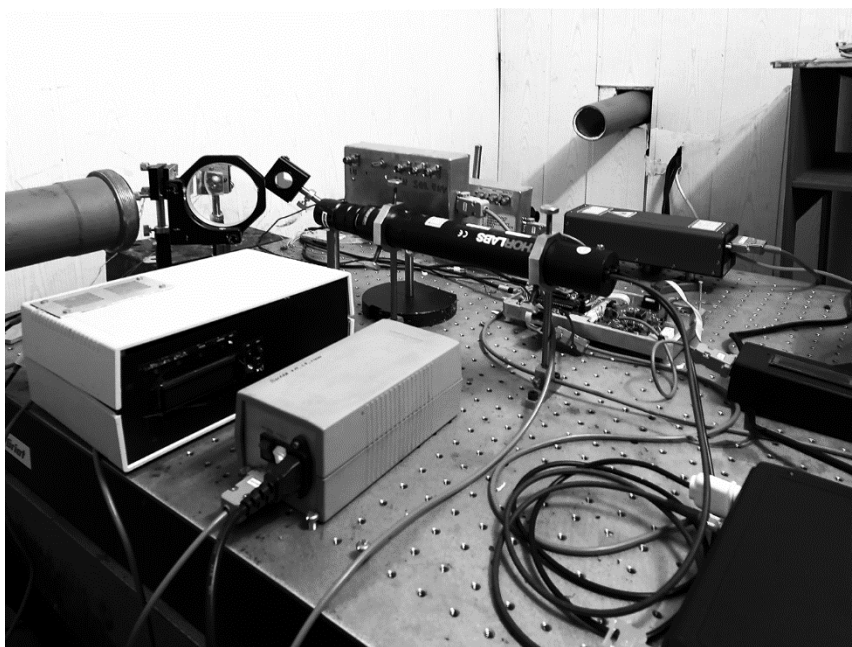


Р и с. 3. Общий вид лазерного нанобарографа

F i g. 3. General view of laser nanobarograph

Лазерный нанобарограф [11] создан для исследований взаимосвязи между процессами в атмосфере, литосфере и гидросфере. В качестве датчика-измерителя атмосферного давления в лазерном нанобарографе используется блок anerоидных коробок, применяемый в классических стрелочных барометрических приборах. С целью увеличения чувствительности при регистрации перемещения незакрепленного конца блока anerоидных коробок применены лазерно-

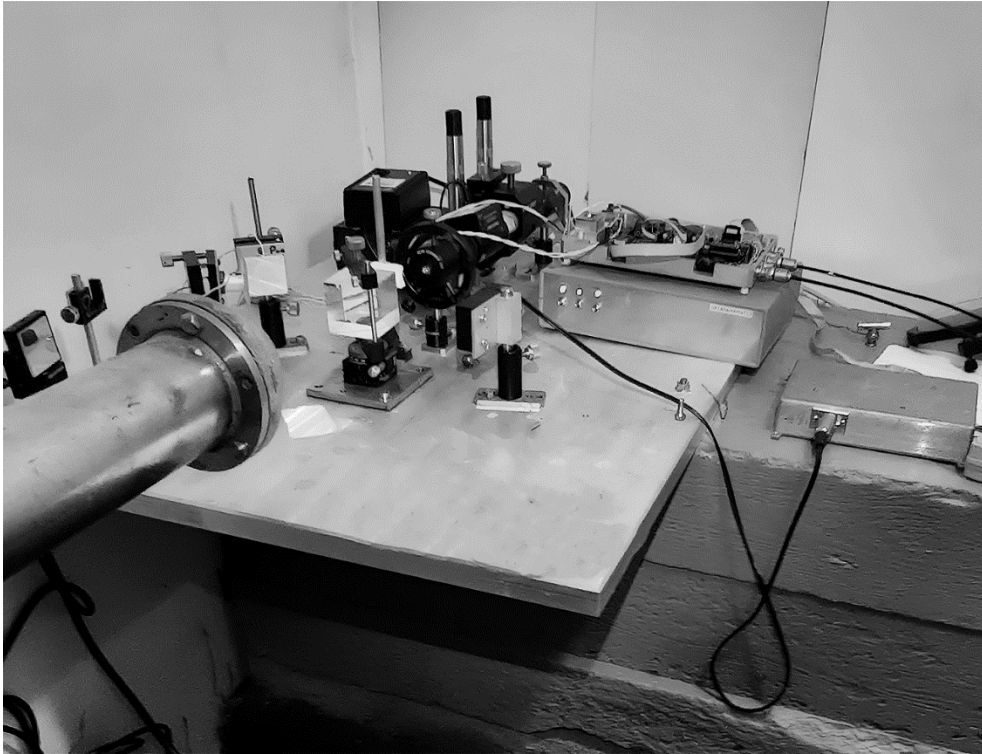
интерференционные методы, в основе которых лежит равноплечий интерферометр Майкельсона с длиной измерительного (и «эталонного») плеча 20 см. В качестве источника излучения используется частотно-стабилизированный гелий-неоновый лазер фирмы *Melles Griot*, обеспечивающий стабильность частоты в девятом знаке. Общий вид лазерного нанобарографа приведен на рис. 3. Его основные технические характеристики: рабочий диапазон частот от 0 (условно) до 1000 Гц, точность измерения вариаций атмосферного давления 1 мПа.



Р и с. 4. Центральный интерференционный узел 52,5-метрового лазерного деформографа
F i g. 4. Central interference node of the 52.5 m laser strainmeter

Динамический диапазон всех интерферометров значительно расширяется за счет применения системы сброса уровней и системы обратных связей, управляющих работой интерферометров. Основу двухкоординатного лазерного деформографа, описанного в работе [12], составляют 52,5-метровый и 17,5-метровый лазерные деформографы. Оптические элементы каждого из них смонтированы на двух гранитных устоях, закрепленных на земных породах. Один устой 52,5-метрового лазерного деформографа закреплен на естественной гранитной скале, другой стоит на суглинке большой плотности. Высота первого устоя ~ 1 м, второго ~ 3 м. Все устои имеют конусообразную форму с расширением книзу. Оба устоя 17,5-метрового лазерного деформографа высотой $\sim 1,5$ м смонтированы на суглинке. На рис. 4 приведена фотография интерференционного узла 52,5-метрового лазерного деформографа.

На рис. 5 показан интерференционный узел 17,5-метрового лазерного деформографа. Основные технические характеристики лазерных деформографов: рабочий диапазон частот от 0 (условно) до 100 Гц, точность измерения смещений земной коры 0,01 нм.



Р и с. 5. Центральный интерференционный узел 17,5-метрового лазерного деформографа
F i g. 5. Central interference node of the 17.5 m laser strainmeter

Стационарный газоанализатор $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ закрытого типа LI-7200 RS. В 2023 г. на МЭС «м. Шульца» установлена станция *Eddy Covariance* на основе газоанализатора $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ закрытого типа LI-7200RS, модель LI-7200RSF, LI-COR, модуль воздушного потока 7200-102 (рис. 6, a). Станция оснащена системой обработки данных *SmartFlux 2* для систем *Eddy Covariance* в режиме реального времени. Частота измерений газоанализатора 5–20 Гц. Диапазон измерений по CO_2 составляет 0–3000 ppm. Чувствительность измерений по CO_2 (моль H_2O /моль CO_2) $\pm 0,02$. Станция оборудована высокоточным цифровым 3-осевым (3D) ультразвуковым анемометром *Gill Windmaster 3D* для измерения турбулентных потоков, его основные характеристики: частота дискретизации 20 Гц, диапазон измеряемых скоростей ветра 0–45 м/с, разрешение 0,01 м/с, погрешность (RMS) 1,5% при 12 м/с, рабочий диапазон направлений ветра 0–359°, разрешение 0,1°, погрешность 2° при 12 м/с, материал исполнения корпуса – алюминий/углеволокно. Оборудование от производителя LI-COR, газоанализатор $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ закрытого типа LI-7200RS специально разработан для проведения высокоскоростных и высокоточных измерений концентраций CO_2 и паров воды в атмосфере (рис. 6, b). Он сочетает преимущества газоанализаторов закрытого типа (высокую точность измерений, производительность, компактность и устойчивость к самым неблагоприятным условиям) с низким энергопотреблением газоанализаторов открытого типа.

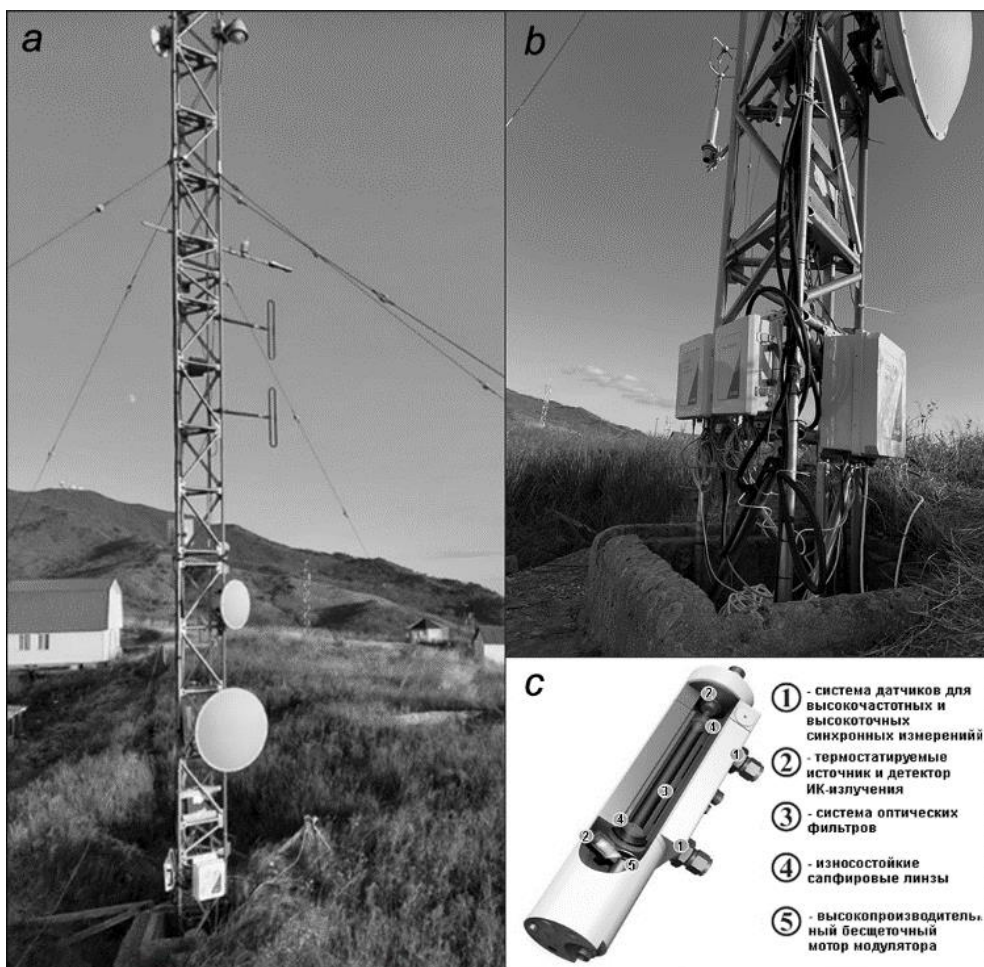


Рис. 6. Станция *Eddy Covariance* в комплексе с метеодатчиками на МЭС «м. Шульц» (а), газоанализатор $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ закрытого типа *LI-7200 RS* (b) и схема его строения (c)

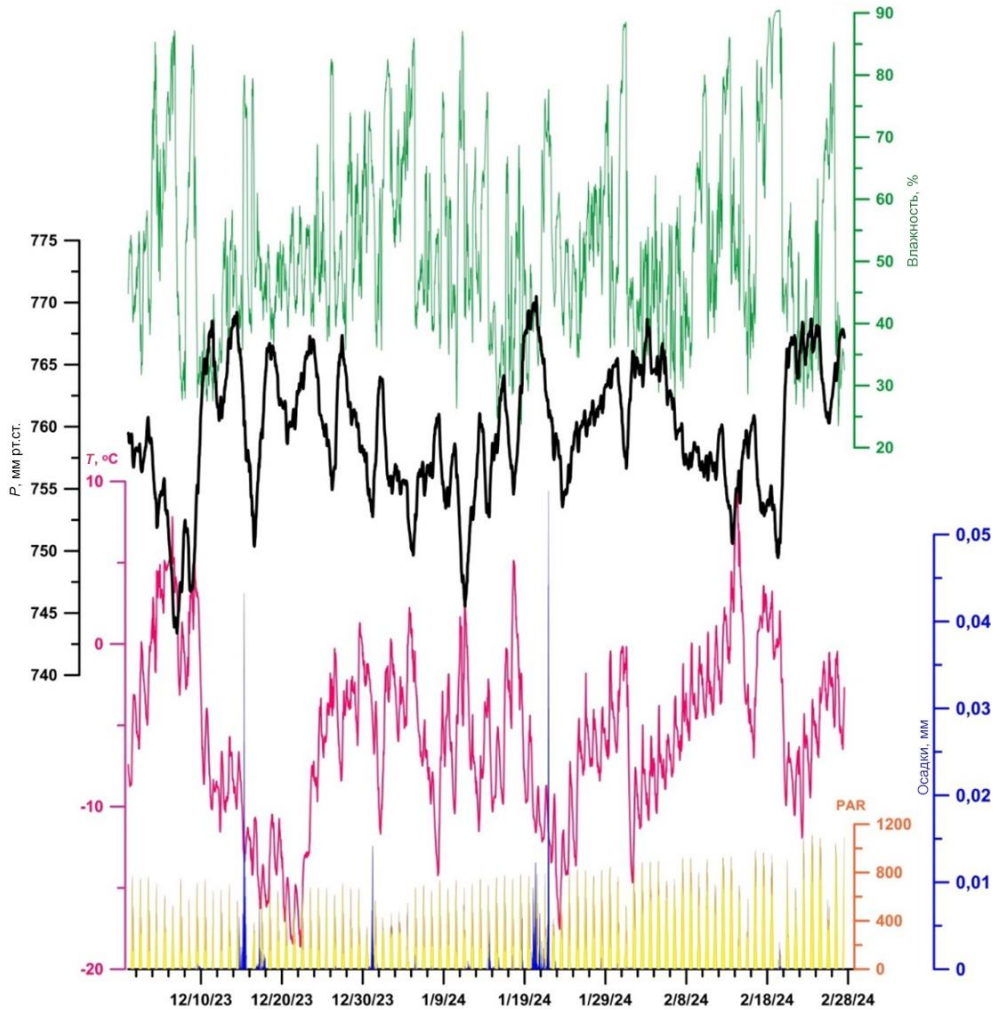
Fig. 6. *Eddy Covariance* station in combination with weather sensors at MES “С. Schultz” (a), closed-type $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ gas analyzer *LI-7200 RS* (b) and its structure diagram (c)

Газоанализатор *LI-7200RS* использует достоинства недисперсионной инфракрасной спектроскопии для быстрого и надежного измерения плотности CO_2 и водяного пара в окружающей атмосфере. Твердотельный лазерный диод в основании датчика производит инфракрасное излучение, которое проходит через систему термически регулируемых оптических фильтров и ограниченное пространство воздушного образца и подается на термически регулируемый детектор из селенида свинца (рис. 6, c). Некоторое количество инфракрасных лучей поглощается CO_2 и парами воды в пространстве образца. Концентрации газов вычисляются по коэффициенту отношения поглощенного ИК-излучения к контрольному значению.

Полученные экспериментальные данные стационарного газоанализатора после предварительной обработки, фильтрации и децимации записываются в созданную базу экспериментальных данных с частотой дискретизации 2 Гц.

Результаты мониторинга концентрации парниковых газов

Результаты зимнего мониторинга содержания CO_2 и паров воды с 01.12.2023 г. по 29.02.2024 г., а также основные метеопараметры приземной атмосферы приведены на рис. 7 и 8. На рис. 7 представлены синхронные графики вариаций атмосферного давления, температуры воздуха, влажности воздуха, количества осадков и солнечной радиации. Данные мониторинга были совмещены с параметрами атмосферного переноса для оценки преобладающего направления движения атмосферного воздуха в районе станции мониторинга.



Р и с. 7. Результаты метеорологического мониторинга на МЭС «м. Шульца» за декабрь 2023 г. – февраль 2024 г. Желтым цветом показана фотосинтетически активная радиация, синим – количество осадков, красным – температура, черным – атмосферное давление, зеленым – влажность
Fig. 7. Results of meteorological monitoring at MES “С. Schultz” for December 2023 – February 2024. Yellow color shows photosynthetically active radiation, blue – precipitation amount, red – temperature, black – atmospheric pressure, and green – humidity

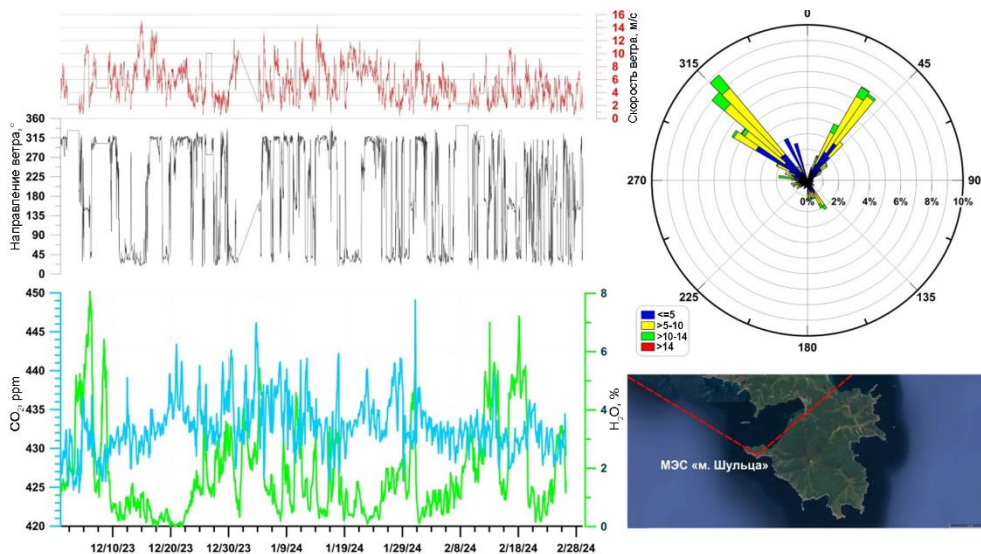


Рис. 8. Результаты газогеохимического мониторинга на МЭС «м. Шульца» за декабрь 2023 г. – февраль 2024 г. Красным цветом показана скорость ветра, черным – направление ветра, синим – концентрация углекислого газа, зеленым – концентрация водяного пара

Fig. 8. Results of gas-geochemical monitoring at MES “C. Schultz” for December 2023 – February 2024. Red color shows wind speed, black – wind direction, blue – concentration of carbon dioxide, and green – concentration of water vapor

При анализе рис. 8 в целом можно сделать вывод, что зимой в южной части Приморского края основное направление ветрового переноса совпадает с генеральной циркуляцией атмосферы в данный период года. Преобладали северо-западные и северо-восточные ветры (черный график на рис. 8). Данные секторы в целом совпадают с континентальной частью Хасанского района, внутренними акваториями залива Посыета и бухты Витязь. Скорость ветра изменялась в диапазоне 0,5–15,1 м/с, в среднем она составляла 5 м/с (красный график на рис. 8). Преобладающие значения ветра лежали в диапазоне 5–10 м/с, максимальные были зафиксированы в декабре и январе, при этом в феврале картина совершенно другая – с возрастанием роли юго-восточных ветров и более умеренными значениями скорости ветра, как видно из розы ветров в правой части рис. 8.

Содержание CO_2 в зимний период изменялось в диапазоне 424,3–449,1 ppm, среднее содержание составило 430,8 ppm (синий график на рис. 8). Максимальные средние концентрации углекислого газа зафиксированы для января (434,3 ppm), минимальные – для февраля (429,2 ppm). Максимальные значения концентрации водяного пара в атмосфере фиксировали в начале декабря и во второй половине февраля (зеленый график на рис. 8). По данным морских исследований, проведенных в рамках проекта ВИП-ГЗ на НИС «Профессор Гагаринский» в период октябрь – декабрь 2022 г., для акватории залива

Петра Великого были получены меньшие значения концентраций углекислого газа в приводном слое атмосферы^{1, 2}:

- в среднем 424 ppm (рейс № 83, залив Петра Великого);
- в среднем 425 ppm (многосуточная стоянка возле МЭС «м. Шульца», ноябрь 2022 г.);
- в среднем 427 ppm (рейсы № 84, 85, декабрь 2022 г.).

Содержание паров воды в зимний период изменялось в пределах 0,1–8,1%, в среднем 2,2%, медиана 2,8%. Максимальные среднемесячные значения зафиксированы в феврале, минимальные – в декабре и январе. Стоит отметить, что пики обоих газовых компонентов часто совпадают, однако встречается и противоположная зависимость.

В целом подобный уровень концентраций CO₂ достаточно ярко иллюстрирует повышенный уровень его содержания в атмосфере в зимний период. Этот факт обусловлен как особенностями атмосферного переноса (в основном с континентальной части), так и практически полным замедлением процессов фотосинтеза и вегетации растений (сток углекислого газа затруднен) вследствие низких температур. Также начиная с декабря 2023 г. была обнаружена характерная внутрисуточная изменчивость концентраций углекислого газа с их повышением в дневное время и плавным уменьшением ночью (с минимумом в утренние часы) со средней амплитудой 1,3 ppm. По всей видимости, это может быть связано с местными особенностями циркуляции атмосферы и сменой направления преобладающего ветра в системе суша – море.

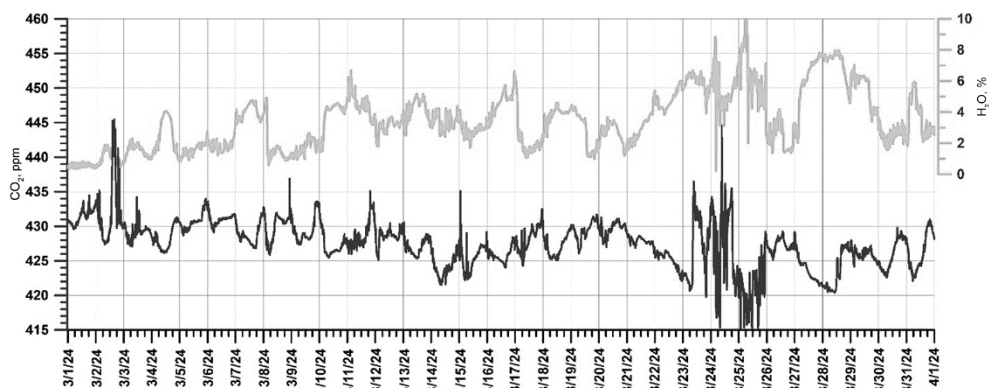


Рис. 9. Результаты газогеохимического мониторинга на МЭС «м. Шульца» за март 2024 г.
Fig. 9. Results of gas-geochemical monitoring at MES “С. Schultz” for March 2024

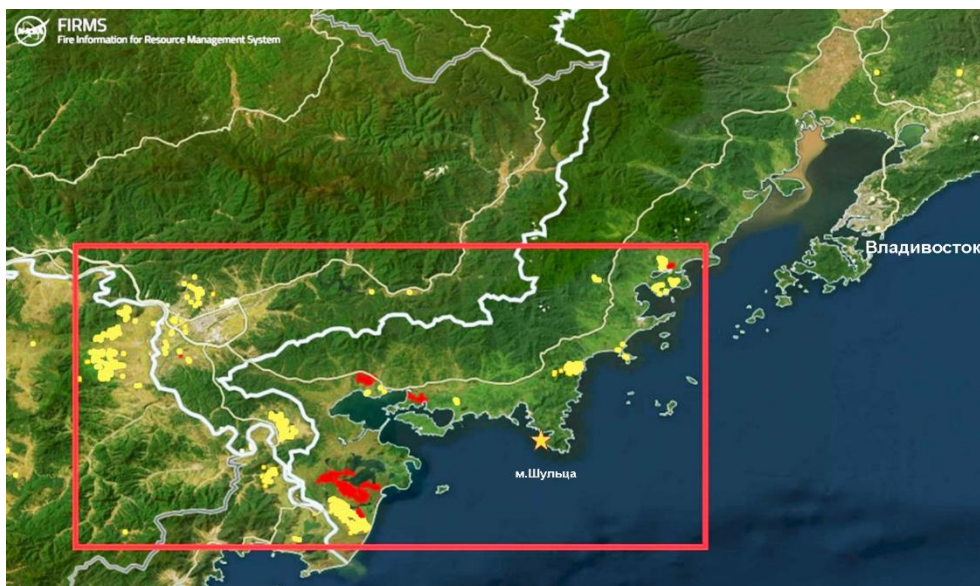
В марте 2024 г. были получены первые региональные данные по концентрациям CO₂ за весенний период (рис. 9). Содержание углекислого газа в марте

¹ Климатически активные газы в приводном слое атмосферы залива Петра Великого (Японское море), измеренные за период с 21 октября по 30 ноября 2022 года : база данных / А. В. Яцук, М. А. Бовсун ; ТОИ ДВО РАН. Электрон. дан. 2023. № гос. регистрации 2023620699.

² Атмохимические параметры приводного слоя атмосферы акваторий Амурского и Уссурийского заливов (Японское море), измеренные на НИС «Профессор Гагаринский» в рейсах № 84, 85 (01-31.12.2022) : база данных / А. В. Яцук, М. А. Бовсун ; ТОИ ДВО РАН. Электрон. дан. 2023. № гос. регистрации № 2023623106.

изменялось в диапазоне 388,9–445,5 ppм, в среднем 427,5 ppм, медиана 427,8 ppм. Содержание паров воды изменялось в пределах 0,2–10,6%, в среднем 3,5%, медиана 3,3%. В целом наблюдаются сходные внутрисуточные зависимости и для данного сезона года.

Весенний период характеризуется переходом к теплому сезону года с положительными дневными и часто отрицательными ночными температурами. Кроме того, немаловажным фактом, влияющим на уровень концентраций, является достаточно сухая и малоснежная зима, что в комплексе с постоянным потоком солнечной радиации и прогревом почвенного слоя вызывает частое возникновения пожароопасных периодов с развитием лесных пожаров и травяных палов в Приморском крае. Крайне пожароопасным был март 2024 г., особенно для южной части Хасанского района (рис. 10).



Р и с. 10. Районы распространения температурных аномалий (очаги возгорания) в марте 2024 г. по данным системы NASA FIRMS (*Fire Information for Resource Management System*) с сайта <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>. Красные зоны – краткосрочные возгорания, светло-желтые – очаги горения свыше 5 сут

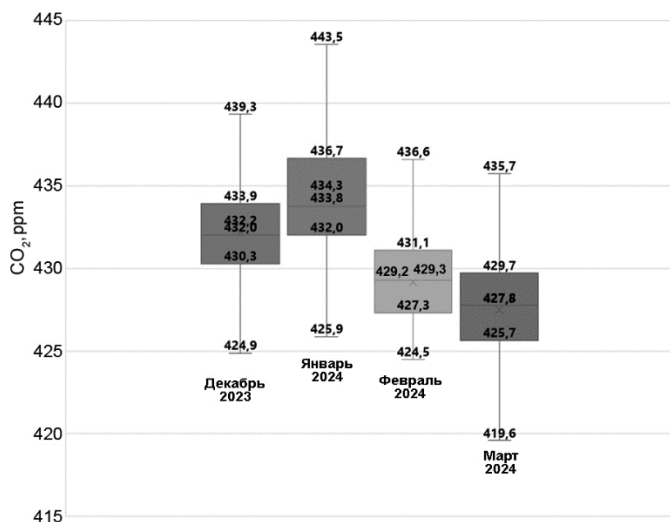
Fig. 10. Areas of distribution of temperature anomalies (fire sources) in March 2024 based on the NASA FIRMS (*Fire Information for Resource Management System*) data (site <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>). Red zones are the short-term fires, light yellow ones – hotbeds of burning for more than 5 days

Основные (пиковые) промежутки возгораний пришлось на 1–4 марта и 23–26 марта 2024 г., что достаточно хорошо отражается на пикообразных аномалиях углекислого газа в приземной атмосфере (см. рис. 8).

Общие характеристики распределения парниковых газов в течение четырех месяцев приведены на рис. 11 и 12.

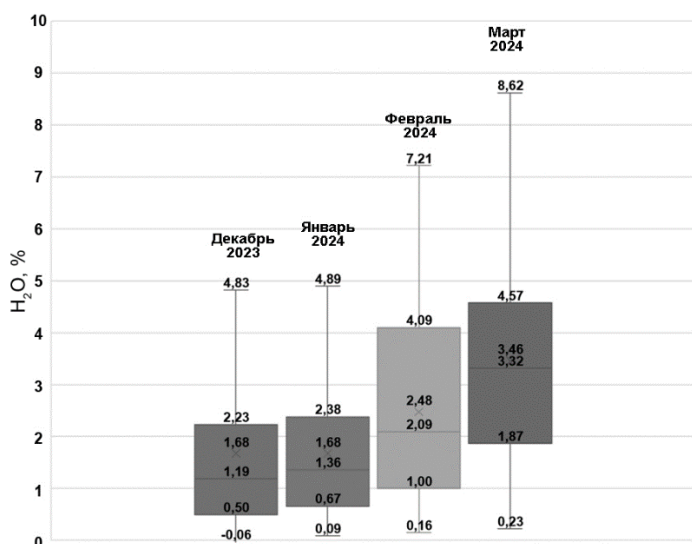
В целом статистическая оценка позволяет говорить о тренде снижения концентраций углекислого газа к марту 2024 г. и его максимума в середине зимнего сезона (январь 2024 г.). Обнаружена тесная связь с температурным режимом и проявлением суточной изменчивости солнечной активности, данный факт также может

быть связан и со сменой направления ветра в течение промежутка день/ночь. Указанная закономерность может нарушаться вследствие неблагоприятных погодных явлений, циклонической деятельности и дополнительных источников эмиссии, таких, к примеру, как лесные пожары и травяные палы. Дополнительное моделирование атмосферного переноса поможет выделить потенциальные районы – источники эмиссии углекислого газа в атмосферу.



Р и с. 11. Параметры статистической оценки для концентраций углекислого газа. Границами бокс-плота служат первый и третий квартили (25-й и 75-й процентиля соответственно), линия в середине ящика – медиана (50-й процентиль). Концы «усов» – минимальное и максимальное наблюдаемые значения данных; превышающие эти значения относятся к категории выбросов

F i g. 11. Statistical estimation parameters for carbon dioxide concentrations. The boundaries of the box plot are the first and the third quartiles (25th and 75th percentiles, respectively), line in the middle of the box is the median (50th percentile). The ends of “whiskers” are the minimum and maximum observed data values; the ones exceeding these values belong to the emission category



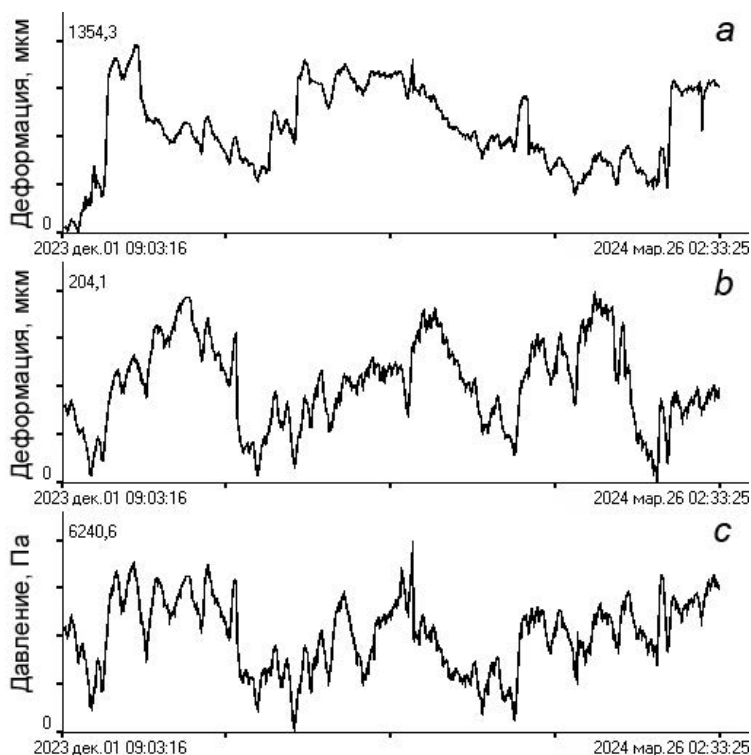
Р и с. 12. Параметры статистической оценки для концентраций паров воды

F i g. 12. Statistical estimation parameters for water vapor concentrations

Таким образом, в результате проведенных исследований уточнен газогеохимический фон углекислого газа в атмосферном воздухе в зимний период (430,8 ppm) и на начало весеннего сезона 2024 г. (427,8 ppm) в районе МЭС «м. Шульца». Собраны основные климатические параметры атмосферы и выделены основные тренды изменения.

Результаты деформационного мониторинга

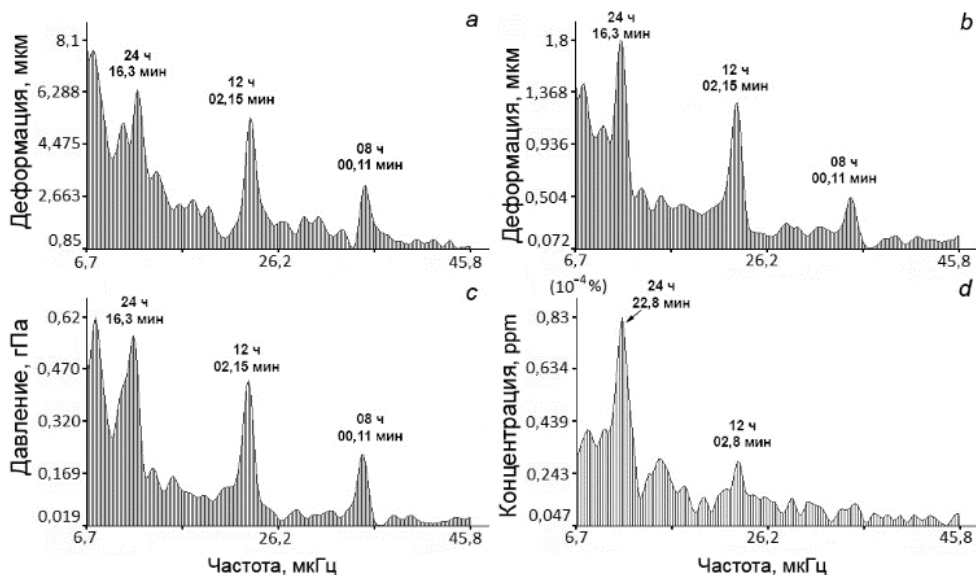
На рис. 13 приведены результаты деформационного мониторинга за указанный промежуток времени.



Р и с. 13. Результаты деформационного мониторинга с 1 декабря 2023 г. по 26 марта 2024 г.: записи 52,5-метрового лазерного деформографа (a), 17,5-метрового лазерного деформографа (b) и лазерного нанобарографа (c)

F i g. 13. Results of deformation monitoring from December 1, 2023 to March 26, 2024: records of 52.5 m (a) and 17.5 m laser (b) strainmeters, and laser nanobarograph (c)

Данные деформационного и газового мониторинга за 1–25 декабря 2023 г. были подвергнуты спектральной обработке периодограммным методом с числом осреднений 3. Результаты обработки данных, приведенных на рис. 8 и 13, отображены на рис. 14.



Р и с. 14. Спектры, полученные при обработке данных за декабрь 2023 г. 52,5-метровым лазерным деформографом (a), 17,5-метровым лазерным деформографом (b), лазерным нанобарографом (c) и газоанализатором CO₂ (d)

F i g. 14. Spectra obtained by processing the data from 52.5 m (a) and 17.5 m (b) laser strainmeters, laser nanobarograph (c), and CO₂ gas analyzer (d) for December 2023

Как видно, на всех приведенных спектрах выделяются максимумы, соответствующие суточному и полусуточному приливам. В спектрах записей лазерных деформографов и лазерного нанобарографа выделяется мощный пик с периодом ~ 8 ч.

При анализе синхронных записей лазерно-интерференционных установок и газоанализатора отметим присутствие в спектрах приливных гармоник (деформации земной коры, вариации атмосферного давления и концентрации углекислого газа). Корреляция на данных частотах, возможно, вызвана воздействием приливов на осадочные породы морского дна, включающие повышенное содержание газов.

Самым достопримечательным (пока) результатом полученной записи является регистрация лазерными деформографами цунамигенного землетрясения, произошедшего в Японском море, в результате которого на побережье Приморского края пришла волна цунами высотой до 0,3 м. На рис. 15 приведены записи 52,5-метрового и 17,5-метрового лазерных деформографов, которые зарегистрировали землетрясение и деформационные аномалии (скачки деформации), вызванные подвижками морского дна в эпицентре. Землетрясение произошло на северо-восточной оконечности п-ова Ното (Япония) 1 января 2024 г. в 07:10:09 UTC с магнитудой 7,6. По уровню данной деформационной аномалии можно рассчитать смещение морского дна, которое привело к образованию цунами. В соответствии с работой [13], расчетное смещение морского дна по записи 52,5-метрового лазерного деформографа составило 5,4 м в эпицентре землетрясения.

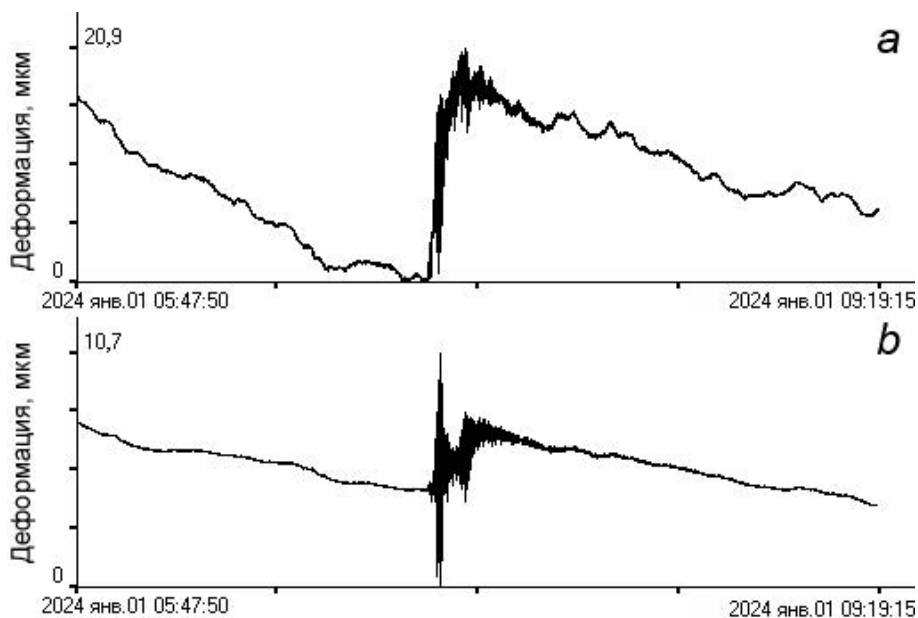


Рис. 15. Цунамигенное землетрясение и деформационная аномалия на записях 52,5-метрового и 17,5 метрового лазерных деформографов

Fig. 15. Tsunamigenic earthquake and deformation anomaly on the records of 52.5 m and 17.5 m laser strainmeters

На записях газоанализатора подобных сигналов, связанных с катастрофическими землетрясениями в регионе, не наблюдалось.

Заключение

В результате выполненных измерений вариаций углекислого газа в зимний период 2023–2024 гг. установлено, что повышенный уровень CO_2 связан с направлением ветра, который дует с континента. Этот факт обусловлен как особенностями атмосферного переноса, так и практически полным замедлением процессов фотосинтеза и вегетации растений вследствие низких температур. В летний период направление ветра меняется практически на противоположное. Суточные вариации концентрации CO_2 связаны исключительно с суточными вариациями температуры.

В результате деформационного мониторинга зарегистрировано цунамигенное землетрясение, вызвавшее цунами в Японском море. По величине деформационной аномалии, зарегистрированной лазерным деформографом, удалось определить смещение морского дна в очаге землетрясения, которое привело к образованию цунами. По данным измерений, оно составляло $\sim 5,4$ м. Эти аномальные деформационные процессы ожидаемо не были проявлены в вариациях паров воды и углекислого газа на м. Шульца.

При спектральной обработке данных лазерных деформографов, лазерного нанобарографа и газоанализатора обнаружены мощные спектральные составляющие на приливных гармониках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bowman D. C., Lees J. M.* Upper Atmosphere Heating from Ocean-Generated Acoustic Wave Energy // *Geophysical Research Letters*. 2018. Vol. 45, iss. 10. P. 5144–5150. <https://doi.org/10.1029/2018GL077737>
2. *Gerstoft P., Fehler M. C., Sabra K. G.* When Katrina hit California // *Geophysical Research Letters*. 2006. Vol. 33, iss. 17. L17308. <https://doi.org/10.1029/2006GL027270>
3. *Astiz L., Creager K.* Geographic and seasonal variations of microseismic noise // *EOS Transactions of American Geophysical Union*. 1994. Vol. 75. 419.
4. *Bromirski P., Flick R. E., Graham N.* Ocean wave height determined from inland seismometer data: Implications for investigating wave climate changes in the NE Pacific // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1999. Vol. 104, iss. C9. P. 20753–20766. <https://doi.org/10.1029/1999JC900156>
5. *Grevemeyer I., Herber R., Essen H.-H.* Microseismological evidence for a changing wave climate in the northeast Atlantic Ocean // *Nature*. 2000. Vol. 408, iss. 6810. P. 349–352. <https://doi.org/10.1038/35042558>
6. *Aster R. C., McNamara D. E., Bromirski P. D.* Multidecadal Climate-induced Variability in Microseisms // *Seismological Research Letters*. 2008. Vol. 79, iss. 2. P. 194–202. <https://doi.org/10.1785/gssrl.79.2.194>
7. Оценка опасных геологических процессов в заливе Петра Великого (Японское море) по данным мониторинга геологической среды / А. Е. Рыбалко [и др.] // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации : материалы докладов Четырнадцатой Общероссийской научно-практической конференции и выставки изыскательских организаций. 2018. Москва : ООО «Геомаркетинг», 2018. С. 592–597. EDN VWPZYC.
8. Распределение метана на акватории залива Петра Великого / А. К. Окулов [и др.] // Подводные исследования и робототехника. 2017. № 1. С. 68–73. EDN ZBHKSD.
9. Impact of tides and sea-level on deep-sea Arctic methane emissions / N. Sultan [et al.] // *Nature Communications*. 2020. Vol. 11, iss. 1. 5087. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18899-3>
10. Hard- and Software Controlled Complex for Gas-Strain Monitoring of Transition Zones / G. Dolgikh [et al.] // *Sensors*. 2024. Vol. 24, iss. 8. 2602. <https://doi.org/10.3390/s24082602>
11. A laser nanobarograph and its application to the study of pressure-strain coupling / G. I. Dolgikh [et al.] // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2004. Vol. 40, no. 8. P. 683–691. EDN LIQVZD.
12. A Two-Coordinate Laser Strainmeter / G. I. Dolgikh [et al.] // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 1998. Vol. 34, iss. 11. P. 946–950. EDN HTYDEN.
13. *Dolgikh G., Dolgikh S.* Deformation Anomalies Accompanying Tsunami Origination // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, iss. 10. 1144. <https://doi.org/10.3390/jmse9101144>

Об авторах:

Бовсун Мария Александровна, младший научный сотрудник, лаборатория газогеохимии, ФГБУН ТОИ ДВО РАН (690041, Российская Федерация, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), **Scopus Author ID: 57218099245**, **SPIN-код: 8096-2130**, bovsun.ma@poi.dvo.ru

Долгих Григорий Иванович, директор института, доктор физико-математических наук, академик РАН, ФГБУН ТОИ ДВО РАН (690041, Российская Федерация, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), **ORCID ID: 0000-0002-2806-3834**, **Scopus Author ID: 7003888822**, **SPIN-код: 5241-3375**, dolgikh@poi.dvo.ru

Долгих Станислав Григорьевич, зав. лабораторией нелинейной гидрофизики и природных катастроф, ФГБУН ТОИ ДВО РАН (690041, Российская Федерация, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), доктор технических наук, **ORCID ID: 0000-0001-9828-5929**, **Scopus Author ID: 6604069353**, **SPIN-код: 1836-2541**, sdolgikh@poi.dvo.ru

Овчаренко Владимир Владимирович, старший научный сотрудник, лаборатория физики геосфер, ФГБУН ТОИ ДВО РАН (690041, Российская Федерация, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0001-7784-2140**, **Scopus Author ID: 7101867413**, **SPIN-код: 4558-5048**, ovcharenko@poi.dvo.ru

Степочкин Игорь Евгеньевич, научный сотрудник, лаборатория комплексных исследований окружающей среды и минеральных ресурсов, ФГБУН ТОИ ДВО РАН (690041, Российская Федерация, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), **ORCID ID: 0000-0001-7784-2140**, **Scopus Author ID: 36816707300**, **SPIN-код: 4975-7825**, stepochkin.ie@poi.dvo.ru

Чупин Владимир Александрович, зав. лабораторией физики геосфер, ФГБУН ТОИ ДВО РАН (690041, Российская Федерация, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0001-5103-8138**, **Scopus Author ID: 7004931608**, **SPIN-код: 3093-7705**, chupin@poi.dvo.ru

Яцук Андрей Вадимович, ведущий научный сотрудник, лаборатория газогеохимии, ФГБУН ТОИ ДВО РАН (690041, Российская Федерация, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), кандидат геолого-минералогических наук, **ORCID ID: 0000-0003-3975-5438**, **Scopus Author ID: 55189937800**, **SPIN-код: 5704-5884**, yatsuk@poi.dvo.ru