

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ имени. О.Ю. ШМИДТА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК и
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Ларин Николай Владимирович

**Геохимические методы поисков структур дегазации
природного водорода**

Специальность 1.6.4. Минералогия, кристаллография. Геохимия,
геохимические методы поисков полезных ископаемых

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
доктор геолого-минералогических наук
Бычков Андрей Юрьевич

Москва, 2026

Оглавление

Список сокращений.....	4
Введение	5
Глава 1. Современное состояние изученности процесса водородной дегазации Земли.....	14
1.1. Обзор публикаций, в которых есть указания на проявления природного водорода.	14
1.2. Обзор публикаций, посвященных геологическим объектам, в которых проводился поиск природного водорода.	23
Глава 2. Методы исследования	30
2.1. Изучение данных дистанционного зондирования Земли	30
2.1.1. Изучение космических снимков.....	30
2.1.2. Изучение рельефа.....	31
2.2. Геохимические методы и сопутствующие подготовительные работы .	33
2.2.1. Подготовительные работы, разметка профилей.....	33
2.2.2. Полевая водородометрия. Оборудование и методика.	34
2.2.2.1. Оборудование	34
2.2.2.2. Методика проведения полевых измерений водорода.	40
2.2.3. Литогазогеохимическое опробование приповерхностных отложений .	46
2.2.3.1. Отбор и подготовка проб	47
2.2.3.2. Методика термовакuumной дегазации	47
2.2.3.3. Анализ газа	47
Глава 3. Результаты исследований	47
3.1. Рязанская область.....	49
3.2. Липецкая область	51
3.3. Московская область	59
3.4. Воронежская область.....	71
3.5. Байкал и Забайкалье.	77
3.6. Бурятия.....	92
3.7. Читинская область.	105
3.8. Остров Сахалин.....	108
3.9. Оман	111

3.10.	Северная Америка. США	117
3.11.	Монголия	138
Глава 4.	Обсуждение результатов	140
4.1.	Различные типы структур дегазации водорода	141
4.2.	Положение водородного максимума на профиле через КСП.	143
4.3.	Источник природного водорода	144
4.4.	Эволюция структур дегазации водорода.....	146
4.5.	О необходимости проведения опытно-методических работ.....	147
Заключение.....		150
Список литературы		152

Список сокращений

ВГ – Водородный газоанализатор

ДЗЗ – Дистанционное зондирование Земли

КСП – Кольцевая структура проседания

МГУ – Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

МДП – Металл-Диэлектрик-Полупроводник

МИФИ – Национальный исследовательский ядерный университет (Московский инженерно-физический институт)

ОКПИиПВ – Общероссийский классификатор полезных ископаемых и подземных вод.

ПВ – природный водород

ПГС – Поверочная газовая смесь

IFPEN – Institut Français du Pétrole Energies nouvelles (Французский Институт Нефти и Новых энергий)

LiDAR – Light Detection and Ranging (обнаружение и определение дальности с помощью света)

Введение

А. Актуальность темы

Водород является наиболее экологичным топливом и основой водородной энергетики, предполагающей его использование для выработки энергии.

В соответствии с имеющимися представлениями [Larin, 1993; Летников, 2000; Перчук, 2000; Ларин, 2005; Маракушев, Маракушев, 2008] можно предполагать, что глубинный водород, высвобождающийся в недрах, может выходить на поверхность в значимых количествах. Газовые эманации водорода в осевых частях океанов являются широко известным фактом, см. напр. [Леин и др., 2000; Combaudon et al., 2022], в то время как на континентах выходы водорода являются спорадическим явлением [Zgonnik, 2020], а также прецедентами, такими как на трубке «Удачная» [Фридман, 1970] или в Мали [Maiga et al., 2023], которые произошли в ходе бурения скважин или при проходке горных выработок.

В Минприроды России считают, что добыча природного водорода может стать наиболее экологически чистой технологией по сравнению с традиционными способами получения водорода, такими как электролиз, паровая конверсия метана, газификация угля.

В настоящее время единственным способом получения *дешевого* водорода является его добыча из недр. Поэтому настоящая работа посвящена заполнению пробелов в деле изучения природного водорода, описанию созданных методик его поиска, а также методам, применимым в изучении явления водородной дегазации Земли. Приведены авторские результаты исследований структур дегазации на территории России и за рубежом. Сделан вывод о том, что кольцевые структуры проседания формируются на выходе водородопроводов на поверхность. Приведены примеры других типов структур дегазации природного водорода.

В соответствии с приказом Госстандарта России от 07.07.2023 N 490-ст. Об утверждении Изменения 5/2023 ОКПИиПВ к Общероссийскому классификатору

полезных ископаемых и подземных вод, водород признан самостоятельным полезным ископаемым, что дает возможность начать его геологоразведку и добычу.

Самостоятельное мероприятие "Поиски природного водорода", планируется к включению в "дорожную карту" развития высокотехнологичного направления "Развитие водородной энергетики" на период до 2030 года.

Актуальность данного исследования обусловлена сказанным выше, и в первую очередь двумя факторами. С одной стороны, это потребность промышленности и энергетики в дешёвом водороде, конкурентноспособном относительно традиционных энергоносителей. С другой стороны, это отсутствие мирового опыта в деле производства дешевого водорода, которое приводит все попытки создания водородной энергетики, а также массового его использования в промышленности к разочарованию.

В. Цель и задачи исследования

В соответствии с имеющимися представлениями [Larin, 1993; Ларин, 2005; Летников, 2000; Маракушев, Маракушев, 2008; Перчук, 2000] можно предполагать, что глубинный водород, высвобождающийся в недрах, может выходить на поверхность в значимых количествах. Газовые эманации водорода в осевых частях океанов являются широко известным фактом, см. напр. [Combaudon et al., 2022; Леин et al., 2000], в то время как на континентах выходы водорода являются спорадическим явлением [Zgonnik, 2020], а также прецедентами, такими как на трубке «Удачная» [Фридман, 1970] или в Мали [Maiga et al., 2023], которые произошли в ходе бурения скважин или при проходке горных выработок.

Целью диссертационной работы является разработка методов геохимических поисков структур дегазации природного водорода на континентах, оценка распространенности таких структур и их классификация.

Была сформулирована рабочая гипотеза о существовании *водородопроводов* – вертикальных структур в литосфере, по которым водород мигрирует к поверхности и поставлено несколько задач:

- 1) Разработать методику поиска структур дегазации с использованием дешифрирования данных ДЗЗ;
- 2) Подобрать дистанционные и геохимические методы, которые подходят для дешифрирования и полевой разведки обнаруженных геохимических аномалий;
- 3) Применить методику полевой оперативной водородометрии и методику литогазгеохимического опробования приповерхностных отложений для изучения структур дегазации в поле;
- 4) Посредством применения дистанционных и прямых методов выявить структуры, наиболее перспективные для поисков природного водорода;
- 5) Оценить масштабы проявления дегазации природного водорода.

С. Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются кольцевые структуры проседания, появление которых обусловлено дегазацией природного водорода, а также другие типы структур дегазации водорода.

Предметом исследования являются характеристики и свойства структур дегазации, которые можно получить при дешифрировании данных ДЗЗ, при полевых геологических, геохимических, а также при лабораторном изучении.

Д. Методы исследования

а) Изучение данных дистанционного зондирования Земли, включающее в себя: изучение космических снимков в разных диапазонах длин волн, изучение распределения кольцевых структур по размерам, изучение рельефа;

б) Геохимические исследования, включающие полевую водородометрию и литогазгеохимическое опробование с последующей термовакуумной дегазацией и газовой хроматографией;

Е. Основные положения, выносимые на защиту

1. Аномальные содержания молекулярного водорода в грунтах, обнаруженные геохимическими методами поисков, приурочены к локальным объектам – структурам дегазации водорода.
2. Структуры дегазации водорода распространены на всех исследованных континентах в разных ландшафтных обстановках. Эти структуры характеризуются отрицательными формами рельефа преимущественно изометричной формы, которые могут быть выделены по данным дистанционного зондирования Земли.
3. Структуры дегазации водорода различаются по расположению аномалий водорода в грунте, которые могут совпадать с центром кольцевой структуры или располагаться на её периметре. Поток водорода не рассеян равномерно по площади, а склонен, в процессе миграции сквозь породы земной коры, к канализированию, что приводит к формированию компактных струй.

Г. Новизна и практическая значимость диссертационной работы

При дешифрировании данных ДЗЗ (спутниковых снимков и цифровых карт рельефа) были обнаружены кольцевые структуры, количество которых исчисляется сотнями тысяч. Показано, что в своём подавляющем большинстве эти структуры являются, в силу особенностей рельефа, кольцевыми структурами проседания (КСП). Для полевого изучения применены атмогеохимические методы. Обнаружено, что с КСП связаны геохимические аномалии водорода.

Для изучения водородных аномалий были применены усовершенствованные методики оперативной водородометрии и литогазогеохимического опробования приповерхностных отложений. Полевая водородометрия использует переносной комплекс приборов и приспособлений, который позволяет пробивать скважину глубиной 120 см и проводить замеры содержания свободного водорода (от 0,5 ppm ($0,5 \times 10^{-4}\%$) до 5 об.%) на месте, а также отбор проб газов для последующего анализа в лабораторных условиях. Возможности комплекса расширяются при включении в его состав портативных газоанализаторов других газов.

В целях углубленного изучения структур дегазации была усовершенствована и применена методика литогазогеохимического опробования приповерхностных отложений заключающаяся в шнековом бурении (мотобуром или вручную) неглубоких (до 1,5 м) скважин, отбор и консервация проб грунта, их термовакuumную дегазацию и получение пробы сорбированного газа.

Создание мобильной полевой лаборатории, позволило сократить время между отбором пробы и термовакuumной дегазацией до нескольких часов. Последнее оказалось критически значимым для предотвращения изменения состава газа при биологических процессах в отобранной пробе грунта.

Впервые показано, что на равнинах континентов есть множественные структуры дегазации водорода. Часть из них была изучена на территориях Евразии, Северной Америки, Африки и Австралии.

Автором изучены структуры дегазации различной морфологии. Впервые были выявлены аномалии содержания водорода в следующих геоморфологических структурах: сухих кольцевых структурах проседания (например, в структуре оз. Падовое в Воронежской обл.; структуре Ссёлки в Липецкой обл.; структуре NE#3 в Штате Небраска, США, Arthur Road Bay и Smith Bay в Штате Северная Каролина США; структуре 59 в Монголии и многих других); на сухой части дна и на берегу структур, заполненных водой: группа Еравнинских озер в Бурятии (оз. Сосновое, оз. Большое и Малое Еравное, оз. Соболюхо) и слившаяся воедино группа Умыкейских озер в Читинской обл. Водородная дегазация была изучена на торфяных болотах в различных регионах (напр. у пос. Никулино в Дмитровском р-не Московской обл. и у пос. Мицулёвка на Сахалине), на торфяных грядово-мочажинных болотах на участке между пос. Выдрино и пос. Мурино на Южном берегу оз. Байкал (структуры №1 и №5). Обнаружены аномалии водорода на главном Саянском Разломе (участок пос. Култук – пос. Быстрая) и в связи с областями развития природных пожаров, например у р. Снежная на южном берегу оз. Байкал.

В России в 2023 году природный водород был включен в классификатор полезных ископаемых. Это решение создало правовую основу для лицензирования

участков, проведения геологоразведки и постановки запасов на государственный баланс, что стимулирует применение эффективных поисковых методов, в первую очередь геохимических. Разработанные методические приемы позволяют выявить структуры дегазации водорода и наметить участки для дальнейшей геологоразведки месторождений природного водорода.

Обнаружен новый тип геологических объектов, образование которых обусловлено истечением водорода из недр. Такие объекты могут служить поисковым признаком наличия экономически значимых потоков природного водорода.

Повсеместное распространение структур дегазации водорода на континентах показывает, что ресурсы природного водорода являются значительными.

Г. Апробация результатов исследования

Основные результаты диссертационной работы были представлены в виде докладов на всероссийских, всероссийских с международным участием и международных конференциях:

Всероссийской конференции «Дегазация Земли: Геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы» (2008 г., г. Москва);

Международный научный семинар «Водородная энергетика, как альтернативный источник энергии» (2010 г., г. Москва);

Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 100-летию со дня рождения академика П.Н. Кропоткина «Дегазация Земли: Геотектоника, геодинамика, геофлюиды, нефть и газ, углеводороды и жизнь» (2010 г., г. Москва),

конференции "Геокриологическое картографирование: проблемы и перспективы" (2013 г., г. Москва);

междисциплинарном семинаре «Система Планета Земля» (2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2021, 2024, 2025 гг., г. Москва);

заседаниях секции МОИП «Дегазация Земли», (2015, 2016, 2017, 2019, 2021, 2022, 2023 гг., г. Москва);

1-й Всероссийской конференции по глубинному генезису нефти «Кудрявцевские Чтения», посвященной памяти Н.А. Кудрявцева (2012, 2015, 2016 гг., г. Москва г.);

«Геокриологическое картографирование: проблемы и перспективы» (2013 г., г. Москва);

конференции «Экологические угрозы и национальная безопасность России» (2016г., г. Москва);

форуме «Наука будущего – наука молодых» (2016 г., г. Казань);

международной конференции Geological Society of London «Natural Hydrogen: A New Frontier for Energy Geoscience» (2023 г., г. Лондон);

международной конференции «Australian Natural Hydrogen Conference» (2025 г., г. Аделаида).

Основные положения диссертационной работы представлены в 17 публикациях, из них 10 статей в рецензируемых научных журналах, в том числе 8 в рекомендованном перечне ВАК, 2 статьи в сборниках, 2 книги и 3 патента.

Н. Структура и объём работы

Объем диссертационной работы составляет 164 страницы машинописного текста включая 85 рисунков, 25 таблиц и список литературы из 110 наименований, 73 из которых – публикации в зарубежных изданиях. Работа включает в себя введение, четыре главы, заключение и список литературы.

Первая глава называется «Современное состояние изученности процесса водородной дегазации Земли», в ней приводится:

– Обзор публикаций, в которых есть указание на проявления природного водорода;

– Обзор публикаций, посвященных геологическим объектам, в которых проводился поиск природного водорода;

Вторая глава называется «Методы исследования», она состоит из следующих разделов:

- Изучение данных дистанционного зондирования Земли;
- Геохимические методы поисков природного водорода;

В третьей главе, которая называется «Результаты исследования», приведены данные, полученные в ходе полевых экспедиций в Центральной России (Рязанской, Липецкой, Московской, Тверской, Воронежской областях), Прибайкалье и Забайкалье, на Сахалине, в Монголии, Омане и США (Штат Северная Каролина).

В главе описаны результаты полевой водородометрии и литогазогеохимического опробования приповерхностных отложений.

Четвёртая глава посвящена обсуждению результатов исследования.

Приведены характеристики формы КСП, диапазона их размеров и распределения по размерам, морфологии рельефа структур, предположения о глубинном строении водородопровода. Описано изменение структур дегазации во времени, сделан вывод о том, что феномен КСП является современным, развивающимся явлением.

Высказаны соображения автора относительно необходимости проведения опытно-методических работ.

Основные результаты опубликованы в двух монографиях и рецензируемых научных изданиях, индексируемых международными базами данных Web of Science, Scopus и базой данных Российский индекс цитирования (РИНЦ).

I. Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность:

В.Н. Ларину за создание нового направления, которое инициировало изучение явлений, описываемых в настоящей работе;

В.Л. Сывороткину за многолетнее сподвижничество, сотрудничество и обучение;

С.Ю. Глазьеву, А.В. Долголаптеву, В.П. Полеванову, выступившим с инициативой включения природного водорода в список полезных ископаемых;

С.Г. Левченко, К.Ю. Николаеву, Я.А. Пасько, А.Г. Сидорову, ООО «ВАД-Инжиниринг», ООО «Верде», ЗАО «НТК», ООО «Протех Лаб» за осуществление финансирования исследований автора;

Инициаторам написания данной работы Е.Н. Рогожину, С.М. Бескину;

Ю.А. Костицыну за критические замечания при написании текста диссертации;

П.В. Пискунову за сотрудничество и разработку инженерных решений при проведении полевых работ;

Своему научному руководителю А.Ю. Бычкову

Всем, кто способствовал написанию этой работы: сподвижникам, волонтерам, коллегам и соавторам, которые ездили с нами в экспедиции и помогали нашим исследованиям.

Глава 1. Современное состояние изученности процесса водородной дегазации Земли.

1.1. Обзор публикаций, в которых есть указания на проявления природного водорода.

Насколько известно автору, первые количественные определения природного водорода были сделаны в 1835 году. Открытие принадлежит немецкому учёному Карлу Йоахиму Берндхардту Карстену, который определил водород, занимаясь изучением каменноугольных отложений [Karsten, 1835] .

Исследователь природных газов рудных месторождений А.И. Фридман пишет: «В 1858 г. Симмер установил присутствие в минералах изверженных пород углекислого газа, азота и следов водорода. Наличие указанных компонентов в газе было подтверждено спектральными исследованиями, выполненными в 1869 г. Фогельзангом и Гейслером. Эпизодические исследования состава газов изверженных пород и отдельных минералов проводили Г. Хью (1881 г.), А. П. Карпинский (1880), В. Э. Гиллебрант [Hillebrand, 1888], В. Рамзай [Ramsay, 1897], В. А. Тильден [Tilden, 1897], установившие в газах большое количество углекислого газа (до 98,33%), окись углерода, водород, метан и гелий.» [Фридман, 1970].

В 1888 году Д. И. Менделеев на заседании Отделения Химии Русского Физико-Химического Общества сообщил, что две пробы газа, собранного из трещин угля в Новокалимальной шахте возле Макеевки Донецкого края, содержат 5,8 и 5,7 об. % водорода [Менделеев, 1888]. Остальная часть пробы состояла примерно на $\frac{3}{4}$ из азота, $\frac{1}{4}$ метана и незначительного количества углекислого газа. Свободного кислорода в пробах нет.

В 1921 году выходит работа [Rogers, 1921], в которой содержится информация о составе горючего газа, выходявшего из соляной шахты в Германии (Leopoldshall, Stassfurt) на протяжении 4,5 лет. В составе газа преобладал водород – 83,6%. Остальная часть пробы состояла из 4,4% метана, 11,8% азота (+ аргон) и 0,17% гелия с примесью неона.

В 1928 году А. Н. Заварицкий в книге «Коренные месторождения платины на Урале» [Заварицкий, 1928] приводит «весьма любопытный факт»: при бурении глубокой скважины в дунитовом массиве «по достижении глубины 600м, было замечено усиленное выделение газа, настолько энергичное, что вода из скважины была выброшена». Выделение газа быстро ослабело и через две недели почти прекратилось. Выделившийся газ имел следующий состав: водород 66,5%, азот и редкие газы 20,7%, метан 9,5%, кислород 3,3%, гелия нет.

В 1931 году был опубликован обзор [Harrington, Denny, 1931], посвященный рудничным газам, в котором содержится информация о присутствии водорода в составе газов, выходящих из пробуренных скважин в Южной Африке и штате Нью Мексико. Указывается также, что в последнее время штате Нью Мексико в процессе бурения при проходке шахт в формациях, богатых поташем (K_2CO_3) и содой (Na_2CO_3), случались выбросы взрывоопасной газовой смеси, состоящей из водорода, метана, этана и азота. Авторы отмечают, что давление газа было таково, что приходилось на много часов останавливать работы и ждать, пока газы улетучатся.

В 1933 году появляется информация [Ward, 1933] о содержании водорода в скважинах Южной Австралии. В газах из докембрийских сланцев Kangaroo Island были зафиксированы 51,3% водорода с глубины 615 футов и 68,64% с глубины 950 футов. Также приводятся результаты бурения скважины глубиной 508 м рядом с Minlaton. При опробовании нижнего отрезка скважины содержание водорода колебалось в пределах 60-84%.

Небольшие притоки газов были обнаружены из карналлитовой зоны скважины, пробуренной в Чусовских городках (Пермский край). Газ содержал 33,6% метана и 17,4% водорода [Bogdanowicz, 1934]. В этой же работе содержится упоминание о проанализированном газе из скважины, пробуренной на глубину 30м в ледниковых отложениях острова Кокшер (о. Кери) в Финском заливе. Газ выходил с давлением (open pressure) в 0,5 атм и состоял из 79% метана и 20,8% водорода.

В 1936 году А. А. Черепенников публикует статью, в которой приводятся анализы содержащих водород газов как на территории СССР (1926–1933 годы), так и на территории Германии (1907–1913 годы). Более подробно рассмотрены газопроявления скважин в Ириклинском ущелье на Южном Урале. Содержание водорода в отдельных пробах достигало 80,4%. В статье впервые ставится вопрос о происхождении водородсодержащих газов [Черепенников, 1936].

В 1937 году вышла работа, посвященная газоносности толщи калиевых солей Верхнекамского месторождения [Морачевский, Ю. В. Самарцева, А. Г. Черепенников, 1937]. Так, из карналлитовой зоны месторождения «... три пробы, проанализированные в лаборатории Гелиоразведки, дали водорода 24–54%, метана 22–36%, азота 23–40%», а из зоны пестрых сильвинитов «Для водорода три имеющихся анализа дают цифры 23–38%, для метана 12–25%, для азота 44–50%». В заключение авторы высказывают «некоторые соображения о путях образования газов», среди них – термическое разложение воды, взаимодействие кислых растворов с металлами, радиолиз и биохимические процессы.

Статья А. С. Зингера [Зингер, 1962] посвящена водороду, содержащемуся в водах газонефтяных месторождений нижнего Поволжья. Автор статьи сообщает, что в терригенных отложениях «...концентрации водорода ... достигают значений порядка 15–43% по объему к составу газа, что при высоком газовом факторе (составляющем в среднем $780 \text{ см}^3/\text{л}$), ... отвечает содержанию водорода до 120–450 см^3 на 1 л пластовой воды». Зингер также отмечает, в процессе гидрогеологических исследований водород отмечается впервые, хотя «... при проведении эпизодического газового каротажа на землях Нижнего Поволжья Е. М. Геллером также фиксировалось присутствие водорода, достигающее 25–30%».

З. Н. Несмелова и Е. А. Рогозина публикуют работу, в которой высказывается предположение, что «... присутствие водорода в природных газах представляет собой явление, распространенное гораздо шире, чем это казалось раньше». К такому выводу пришли авторы, когда из восьмисот проб свободных и выделенных из вод природных

газов «... 38 образцов содержали водород в заметных количествах» [Несмелова, Рогозина, 1963].

Широкое распространение H_2 и CO в составе природных газов иркутского амфитеатра привело Ю.И. Пиковского к заключению, что: «По-видимому они должны встречаться гораздо чаще: часто на них просто не обращают внимание» [Пиковский, 1963].

Большой вклад в изучение природного водорода внес Г.И. Войтов. В его статье [Войтов, 1962] приводится обзор известных на тот момент газопроявлений в рудниках, как на территории СССР, так и по всему миру. Изучение большого массива данных позволило Г.И. Войтову выделить «ряд крупных областей, в которых на рудниках были выявлены выделения водорода и углеводородных газов и обнаружены включения в рудах и вмещающих породах твердых и жидких битумов». Также замечено, что «Наибольшее число газовыделений зарегистрировано в скважинах, пересекающих геологические нарушения, разрывы и сдвиги».

Работа Войтова и соавторов [Кривцов et al., 1967] посвящена водороду в свободных струях Хибин. В статье описаны «...линейно вытянутые цепи грифонов, пробивающихся через воду...» в Росвумчоррском железнодорожном тоннеле. Из химических анализов следует, что «... газы свободных струй являются водородно-углеводородными со значительным содержанием редких газов». Содержание водорода колеблется от 2–4 об.% до 15–25 об.%. Впервые приведены временные ряды, показывающие полугодовые и двухнедельные вариации, демонстрирующие изменения отношения содержания водорода к углеводородам.

О.Л. Нечаева приходит к выводу, что «...наблюдается довольно четкая картина увеличения процентного содержания водорода и частоты его встречаемости к более древним и глубоко залегающим отложениям» [Нечаева, 1968].

В публикации Г. И. Войтова «О химическом составе газов Кривого Рога» [Войтов, 1971]. В статье приводятся результаты химических анализов газов, доля водорода в которых достигает 13–19 об. %. В выводах говорится о том, что

газоносность пород Кривого Рога имеет тенденцию увеличиваться с глубиной, и о существовании приуроченности концентрированных газов, в том числе газов со сверхвысоким содержанием гелия, к зонам тектонических подвижек. В конце Г.И. Войтов высказывает мнение, что «Масштабы газового обмена между консолидированными породами Земной коры и атмосферой, судя по количеству поступающих из рудников газов, существенны. Среди газов, участвующих в этом процессе, превалирует водород».

В 1972 году B.L.Wood приводит впечатляющие значения (75,8%) содержания водорода из газовых источников в метаморфизованных ультрамафитах Новой Зеландии [Wood, 1972]. Как и другие исследователи, автор считает водород продуктом реакции серпентинизации – по бытующим представлениям, реакции взаимодействия оливина с водой.

В журнале Science публикуется статья [Cruikshank, Morrison, Lennon, 1973] в которой описывается горение водородного пламени над жерлом вулкана Килауэа на Гавайях. В примечаниях к статье приводятся ссылки на работы исследователей гавайских вулканов, которые в период с 1855 по 1917 годы регулярно сообщали об обнаружении водорода в составе горящих вулканических газов.

Sato M и A.T. Huntingdon представили работу, посвященную высокотемпературным фумаролам вулкана Этна, расположенного на восточном побережье Сицилии. Авторы приводят схему пробоотборника газа из фумарол и результаты анализов. На тот момент газы фумарол состояли из 10,3% Ar, 20,4% CO₂, 21,8% CO, 9,90% CH₄, 10,1% H₂ и 27,5% N₂ (Sato, Huntingdon, 1973).

В 1979 году опубликована статья, посвященная газам фумарол Восточно-Тихоокеанского поднятия [Welhan, Craig, 1979]. Авторы пришли к выводу, что суммарный поток водорода из мировой системы океанических рифтов составляет не менее $1,3 \times 10^9$ м³/год. В последующие годы, при расширении исследований в океане, эта цифра неоднократно повышалась и в 1986 достигла 5×10^{10} м³/год [Войтов, 1986]. По последним данным, [Charlou et al., 2012] поток водорода только на участке Rainbow

на Срединно-Атлантическом хребте составляет от 2,5 до $7,5 \times 10^6$ м³/год. Заметим, что размеры гидротермального поля Rainbow составляют всего 250х60м (!).

Исследователи разлома Yamasaki (о-в Хонсю, Япония) публикуют методики отбора проб и результаты наблюдений за несколько лет. Авторы приходят к выводу о том, что водород может быть показателем активности разломов (Wakita et al., 1980).

В 1980 году Н.Е. Hawkes представил работу [Hawkes, 1980] в которой развивает представления о глубинном водороде как агенте, который отвечает за вызревание нефти. Также автор ссылается на статью W.E. Pratt, опубликованную в 1934 году, в которой высказывались аналогичные идеи.

В 1981 году опубликованы результаты изучения случившегося годом ранее извержения вулкана St. Helens, расположенного на северо-западе США. Исследователи пришли к выводу [Evans, Banks, White, 1981], что изотопный состав кислорода и водорода фумарольных газов демонстрирует наличие глубинной составляющей. К подобным выводам пришла и другая группа исследователей, которая изучала временные ряды (вариации водорода во времени в сопоставлении с магматической активностью, сейсмичностью и пр.) и показала, что особенности истечения водорода свидетельствуют в пользу его магматогенного происхождения и не могут быть объяснены как результат реакций воды с породой [Sato, McGee, 1981].

В 1982 году выходит статья, в которой описаны факты газовыделений водородных газов на шахтах Урала. В одной из шахт, заложенной в серпентинитах Кемпирсайского массива, «Суммарный дебит пульсирующих пузырьковых выделений оценивался в мае 1979 г. величиной порядка 0,5 м³/сут. В составе пузырьковых выделений преобладает водород, содержание которого составляет 92–98%. Выделение газов продолжается в течение почти 3 лет, при этом их дебит снизился примерно до 0,1 м³/сут., а состав практически не изменился» [Лидин et al., 1982]. Вскоре появляются результаты изотопного анализа водорода Кемпирсайского массива [Уханов et al., 1984; Уханов, Девирц, Иванов, 1987]. Величина $\delta D = -766\text{‰}$ показывает

присутствие одного из самых легких, обедненных дейтерием, газов на Земле, что свидетельствует о его глубинном происхождении.

В 1982 году Р.М. Юркова с соавторами привела убедительные факты свидетельствующие «...об участии водорода и метана в процессах серпентинизации на разных стадиях преобразования ультраосновных пород» [Юркова et al., 1982]. В дальнейшем эта информация получила развитие и была применена для объяснения генезиса глубинных углеводородов [Юркова, Воронин, 2008а, 2006, 2012].

Результаты, полученные при бурении скважины Scott в Канзасе, показали, что газ, извлеченный с интервала глубин в 550–670 м состоял из 50% азота и 50% водорода [Goebel et al., 1983]. Дальнейшие исследования показали, что в соседней скважине Heins содержание водорода достигает 37% [Angino et al., 1984]. Анализируя геологическую информацию и изотопные данные, авторы предполагают глубинный, мантийный источник водорода. Изучение газящих водородом скважин Канзаса привело к серии публикаций, посвященных генезису водорода [Angino et al., 1988; Coveney et al., 1987; Evans, 2010]. В 1990 году публикуются результаты исследований [Angino et al., 1990] и ссылки на литературные данные «...демонстрирующие что водород, ранее неизвестный как компонент природных газов, является более распространенным, чем это полагали ранее.» Далее высказывается очень важная мысль, что водород никто ранее не определял, т.к. водород является стандартным *несущим* газом хроматографа. Так технические особенности устройства хроматографов долгие годы не позволяли обнаружить присутствие водорода в газовых пробах. Результаты исследования водородных скважин в Канзасе изложены в работе David Newell [Newell et al., 2007]. В статье описывается скважина Wilson, пробуренная, в отличие от описанных выше двух, в докембрийский гранитный фундамент. Общая глубина скважины Wilson 1759,3 м, глубина вскрытия фундамента составила 556 м. После свабиrowания из скважины был получен газ, состоящий из N₂ (20%), CO₂ (43%), He (1%), CH₄ (26%) и H₂ (10%). Авторы отмечают, что им «Трудно понять, почему скважина, пробуренная так глубоко

в фундамент, бурилась так легко, разве что породы фундамента оказались мягче чем ожидалось».

В 1993 году В.Л. Сывороткин публикует статью, в которой впервые подробно излагает «водородную» концепцию разрушения озонового слоя, а также дает свою оценку годовых планетарных потоков эндогенных газов метана и водорода - 4500Тг и 120Тг, соответственно. Они в 20 раз превысили оценки Г.И. Войтова [Войтов, 1986]. В работе 2002 г. В.Л. Сывороткин понизил эти цифры до 3000Тг (метан) и 72 Тг (водород), используя новые данные Г.И. Войтова [Войтов, 1999] по изотопии углерода метана в газовых потоках Хибин.

В 1994 году С. W. Hunt опубликовал работу, в которой отводит глубинному водороду главную роль в процессе формирования битуминозных песков Альберты (Канада) [Hunt, 1994].

В 1996 году высказано предложение о возможности добычи водорода в зонах континентального рифтогенеза и неисчерпаемости этого источника топлива в масштабах человеческих потребностей [Larin, 1996].

Л.Л. Перчук, анализируя состав включений в алмазах и гранатах из ксенолитов мантийных пород, собранных в кимберлитовых трубках Якутии, делает вывод о том, что «...состав мантийных газов существенно отличается от коровых, прежде всего, более высокими отношениями H_2/H_2O и CO/CO_2 .» и «...мантийный флюид существенно более восстановленный.» [Перчук, 2000].

Ф.А. Летников отмечал, что «...формирование Земли как космического тела произошло в сравнительно короткий промежуток – примерно в течение 100 млн лет. Тем не менее, она накопила огромное количество газов, которые вот уже более 4,5 млрд. лет продолжают выделяться из ее недр» [Летников, 2000b]. Отводя водороду ведущую роль в эндогенных геологических процессах Ф.А. Летников и П.И. Дорогокупец, проведя физико-химические расчеты, отмечают, что «...именно водородные газовые скопления, восходящие потоки или обширные по размерам

плюмы будут выносить в мантию наибольшее количество тепла» (Летников, Дорогокупец, 2001).

В 2002 году В.Л. Сывороткин публикует монографию, в которой детально рассмотрены вопросы влияния планетарной водородной дегазации на климат и, в особенности, на разрушение озонового слоя. Автором обосновывается «... гипотеза, объясняющая этот процесс естественными причинами, а именно воздействием глубинных потоков озоноразрушающих газов, в первую очередь водорода» [Сывороткин, 1993; Сывороткин, 2002].

В 2003-2004 гг. В.Л. Сывороткин в рамках международного проекта ИНТАС при участии В.А. Нивина (руководитель проекта), проводит водородное профилирование на Хибинском и Ловоозерском массивах, а в 2005 г. начинает мониторинг выделения подпочвенного водорода на Хибинском массиве. 26.04.2005г. фиксируется временная корреляция увеличения концентрации подпочвенного водорода на Хибинах и снижение общего содержания озона на Мурманской озонометрической станции. Зафиксированная синхронность подтвердила правоту «водородной концепции разрушения озонового слоя» [Сывороткин, 2005].

В 2013 году в докторской диссертации В.А. Нивина приводятся *временные ряды* водорода, полученные им вместе с В.Л. Сывороткиным на Хибинском и Лавоозерском массивах Кольского полуострова, показывающие, что «Газовым эманациям в щелочных массивах присущи сложные временные вариации, включающие как периодические, так и нерегулярные компоненты. Основными факторами, контролирующими динамику газовыделения, являются сеймотектонические и космические.» [Нивин, 2013]. При этом отмечается, что «Сопоставление хода водорода и времени реализации сейсмических событий в пределах Ловозерских лопаритовых и Хибинских апатитовых месторождений показало, что многим из них предшествует повышение интенсивности эманаций.» А в качестве космических факторов наибольшее влияние оказывает Луна: «Сопоставление хода водорода с фазами Луны показывает, что в сизигиях (периоды, близкие к новолунию и полнолунию), по сравнению с квадратурами (первая и последняя четверти) чаще наблюдаются

локальные максимумы и минимумы концентраций и/или увеличивается нестабильность газовыделения.» [Нивин, 2013].

Для завершения первой части настоящего обзора и перехода ко второй части логичным будет привести слова В. Л. Сывороткина: «Водород и гелий преобладают в атмосфере Земли с высоты около 1000км. В космосе за нашей планетой тянется водородный шлейф. Уже сам факт такого распределения газов между ядром Земли и её атмосферой заставляет искать следы водорода на его пути из ядра в космос» [Сывороткин, 2002].

1.2. Обзор публикаций, посвященных геологическим объектам, в которых проводился поиск природного водорода.

Мы начали свои исследования с изучения водорода в связи с кольцевыми структурами, известными среди местного населения и в литературе под названиями западин, степных блюдец, окладин, осиновых кустов, ивовых кустов, дубовых кустов, солодей, баклуш, Carolina Bays, playas и др. представляющих собой изометричные, как правило от круглых до эллиптических блюдцеподобные (с плоским дном) понижения рельефа.

Существует множество гипотез происхождения западин. Согласно наиболее обоснованной из них, западины образовались за последние 10–12 тысяч лет в голоценовое время и постепенно развивались, проходя определенные стадии развития. Вероятнее всего, они имеют суффозионное или термокарстовое происхождение [Шишов, 2010]. Изучением Carolina Bays на Североамериканском континенте занимались многие исследователи, более 350 научных работ собрано в обзоре Thomas E. Ross, где, в частности, отмечается, что за столетнюю историю изучения фокус исследований сместился с теорий происхождения в область экологии, почвоведения и лимнологии [Ross, 1987]. Заметим, что подавляющее большинство гипотез образования кольцевых структур проседания связаны с различными экзогенными процессами.

Ситуация кардинально изменилась после публикации работ, где была показана пространственная связь кольцевых структур проседания с аномальными потоками водорода из недр [N. Larin et al., 2014; Zgonnik et al., 2015].

К изучению обнаруженного явления подключились специалисты в области почвоведения, доказавшие полевыми исследованиями и лабораторными экспериментами, что в местах эксгаляции природного водорода происходит угнетение растительности и изменение структуры гумуса [Sukhanova, Kiryushin, 2022; Sukhanova, Lysak, Kiryushin, 2019; Sukhanova, Zubkova, 2018].

В 2019 году была опубликована работа, в которой были показаны суточные вариации потока водорода из КСП в Бразилии [Prinzhofer et al., 2019]. Надо заметить, что авторами были допущены ошибки в интерпретации собственных результатов – они не обратили внимание на связь измеренных концентраций водорода с лунными циклами. Кроме того, ими была предпринята попытка использовать для КСП устоявшийся термин – «fairy circles» (волшебные круги), что неправомерно, т. к. появление fairy circles связано, как правило, с биологическим воздействием (напр. термитов) или конкуренцией между различными видами растительного покрова. В дальнейшем они исправили свою ошибку и стали именовать эти кольцевые структуры Sub-Circular Depressions (SCD).

R. Rezae делает предположение о широком развитии связанных с глубинным водородом КСП в Западной Австралии [Rezaee, 2021, 2020].

При изучении кольцевых структур дегазации водорода в районе Saint-Magne в South Gironde (Франция) было решено проверить применимость различных методик пробоотбора. В ходе замеров были зафиксированы достаточно высокие (до 3,5%) концентрации водорода, но при установке системы мониторинга авторами было замечено, что концентрация водорода с течением времени снижалась до нуля. Авторы предположили, что падение концентраций может быть связано с тем, что водород появлялся в результате воздействия бурового инструмента на органическое вещество, естественным образом присутствующего в почве, путем его измельчения или чрезмерного нагрева [Halas et al., 2021].

Isabelle Moretti с соавторами публикует статью, посвященную изучению водорода в КСП из различных районов Намибии (Африка) [Moretti et al., 2022]. Авторы связывают появление водорода с окислением водой железа из banded iron formations (BIF) – формации железистых кварцитов. Такие же выводы озвучены ими в статье, посвященной структурам дегазации водорода в связи с железистыми кварцитами Австралии, Бразилии и Южной Африки [Geymond et al., 2022].

В 2022 году выходит статья, в которой приводится сравнение концентраций водорода в гидротермальных эманациях на Срединном Атлантическом Хребте (0,07–26,5 mmol/kg) и в Исландии (0,022–20,5 mmol/kg). Следуя традиции, утверждается, что водород появляется в результате окисления двухвалентного железа водой [Combaudon et al., 2022].

В статье, посвященной исследованиям выделений водорода в пределах континентального рифта Asal–Ghoubbet (Джибути, Африка), авторам приходится вводить дополнительные источники водорода. На основе низких изотопных меток водорода ($\delta D = -436$) предполагается участие в составе эманаций глубинного водорода. Кроме этого, предполагается, что водород является продуктом реакции пирита (FeS_2) с водой, а также результатом образования смектитов по базальтам центральной зоны рифта [Pasquet et al., 2023].

Сотрудниками Геологического института КНЦ РАН был изучен водород в рыхлых отложениях Хибинского и Ловозерского массивов и установлено, что «Явной связи вариаций водорода с геологией массивов на данном этапе исследований пока не просматривается. Полученные данные не противоречат многолетним наблюдениям в горных выработках подземных рудников рассматриваемых массивов, где газовыделение связывается с повсеместно распространенными локальными участками трещиноватости (чаще микротрещиноватости) скальных пород.» [Пу́ха, Нивин, Мокрушина, 2022]

Установлено, что в Пиренеях, в районе Sauveterre-de-Bearn, «концентрация почвенных газов (H_2 , CO_2 , CH_4 и ^{222}Rn) увеличивается при приближении к Северо-Пиренейскому фронтальному надви́гу. Максимальные значения концентрации H_2 , CO_2

и ^{222}Rn , зафиксированные в зоне разлома на глубине 1 м, составляют 822 ppmv, 10,3 об.% и 57 кБк/м³ соответственно; тогда как их локальные фоновые значения на один-два порядка ниже: 10 ppmv, 0,2 об.%, 0,3 кБк/м³ соответственно». Полученные результаты газовой геохимии, вкупе с электромагнитными исследованиями, позволили авторам сделать выводы о существовании системы разломов, по которым происходит транзит газов [Lefeuvre et al., 2022].

Giuseppe Etiope провел исследования потока водорода с помощью закрытой камеры (closet-chamber) в районе Chimaera в Турции и пришел к выводу, что поток водорода является самым высоким для поверхности суши – до 5000 кг с квадратного метра в сутки [Etiope, 2022].

В. Malvoisin и F. Brunet, изучив пространственное совпадение орогенных месторождений золота и закартированных ими тысяч изометричных структур разного размера, на примере 32 регионов в 20 странах, пришли к выводу о связи между этими двумя явлениями [Malvoisin, Brunet, 2023]. На взгляд автора настоящей работы, такой вывод является спорным по двум причинам: во-первых, изометричные структуры бывают не только обусловлены водородом, но и, как правило мелкие, биологическими факторами (fairy circles) и во-вторых, большие (до 100 км) расстояние от кольцевых структур до месторождений золота демонстрируют несколько удаленную связь между ними.

В штате Калифорния (США) изучалась геохимия водорода и других почвенных газов в долине разлома San Andreas [Mathur et al., 2024]. Авторами были отобраны и проанализированы на хроматографе 103 пробы из скважин глубиной 1 м. Ими были зафиксированы неожиданно низкие концентрации водорода – 17ppm в долине San Andreas и 20 ppm на соседнем хребте Jasper Ridge. Заметим, что это является достаточно неожиданным результатом для современного континентального рифта.

В научной среде продолжают поиски пород и минералов, ответственных за появление на поверхности водородных аномалий. Проводились эксперименты по окислению магнетита водой при невысоких температурах. В ходе экспериментов выделялся водород, что по мнению авторов свидетельствует о том, что при поисках

природного водорода нужно обратить внимание на породы, богатые магнетитом, такие как железистые кварциты [Geymond et al., 2023].

В статье, посвященной месторождению водорода Bourakebougou (Mali), приводятся последние результаты поискового бурения и делаются предположения о его источниках. Авторы приходят к выводу: «Анализируя данные о добыче, собранные с момента открытия этой исторической скважины в 1987 году и до настоящего времени, было замечено, что после 11 лет работы по выработке электроэнергии не было зарегистрировано никакого падения давления, как можно было бы ожидать от обычного нефтегазового пласта. На сегодняшний день наблюдается повышение давления (с 4,5 до 5 бар). Это показывает, что накопление водорода постепенно пополняется *динамической системой*» [Maiga et al., 2023].

А. Е. Лукин с соавторами рассматривает возможность транспорта самородного алюминия водородным флюидом. В статье описан процесс образования самородного алюминия в осадочных породах Днепровско-Донецкого рифта, делается вывод о гигантском источнике мантийного водорода и роли самородных элементов в качестве маркеров месторождений водорода и углеводородов [Lukin et al., 2023].

В статье, опубликованной в 2023 году, проанализированы возможные источники природного водорода и сделан вывод о возможном полигенном (гидролиз, деградация органических веществ, разложение метана, аммиака, дегазация мантии) его происхождении. Авторы заключают, что наряду с генезисом водорода в различных геологических обстановках, его миграция, захват и сохранение в ловушках изучены слабо. Также отмечается важность исследования природного водорода, как имеющего «...важное стратегическое значение с точки зрения чистых и возобновляемых ресурсов, а также происхождения абиотического газа, образования углеводородов из органического вещества и оценки ресурсного потенциала.» [Liu et al., 2023].

N. Jacquemet и A. Prinzhofer первыми предприняли попытку объяснить систематическую ассоциацию водорода и азота в местах выделения природного водорода в Бразилии, Омане и офиолитах Новой Каледонии. В публикации приводятся методики расчета геохимического равновесия и делаются выводы о возможности

разложения NH_3 и NH_4^+ , приводящие к указанной выше ассоциации газов [Jacquemet, Prinzhofer, 2024].

Надо отметить, что вопрос о возникновении водородных соединений азота остаётся открытым. Принимая во внимание факт водородной дегазации недр, можно предполагать, что аммиак и сами являются продуктами реакций гидрогенизации, а не потенциальным источником водорода.

Исследование эманаций водорода в Джибути, государстве, расположенном в треугольнике Афар – на стыке трех рифтов: океанических рифтов Красного моря, Аденского залива и континентального рифта Восточной Африки, зафиксировало низкие, до 0,22% (при среднем 0,01%) содержания водорода, что может говорить о неудачно выбранной методике измерений. Тем не менее, этих величин оказалось достаточно для создания моделей «... процессов, определяющих происхождение H_2 и его потребление на разных уровнях магматико-гидротермальных систем. H_2 интерпретируется как связанный с несколькими процессами, включая химическое равновесие в магматических газах, изменение пород, богатых Fe^{2+} , и окисление вулканического H_2S » [Deville et al., 2023].

Другая группа исследователей рифта Asal–Ghoubbet в Республике Джибути, опираясь на изучение керна скважин, пришла к выводу, что серпентинизация не имеет ведущей роли в продуцировании водорода, а наиболее вероятной причиной являются вторичные изменения базальтов. Авторами было «установлено, что относительные концентрации H_2 составляют 0,57–0,89% от сухой газовой фазы» [Pasquet et al., 2023].

В настоящее время наблюдается взрывной рост количества публикаций посвященных природному водороду и структурам его дегазации. (Рис. 1). К сожалению, большое количество качественных материалов не публикуется, а остаётся в виде производственных отчетов с ограниченным доступом. Автор этой работы сам является автором нескольких таких документов.

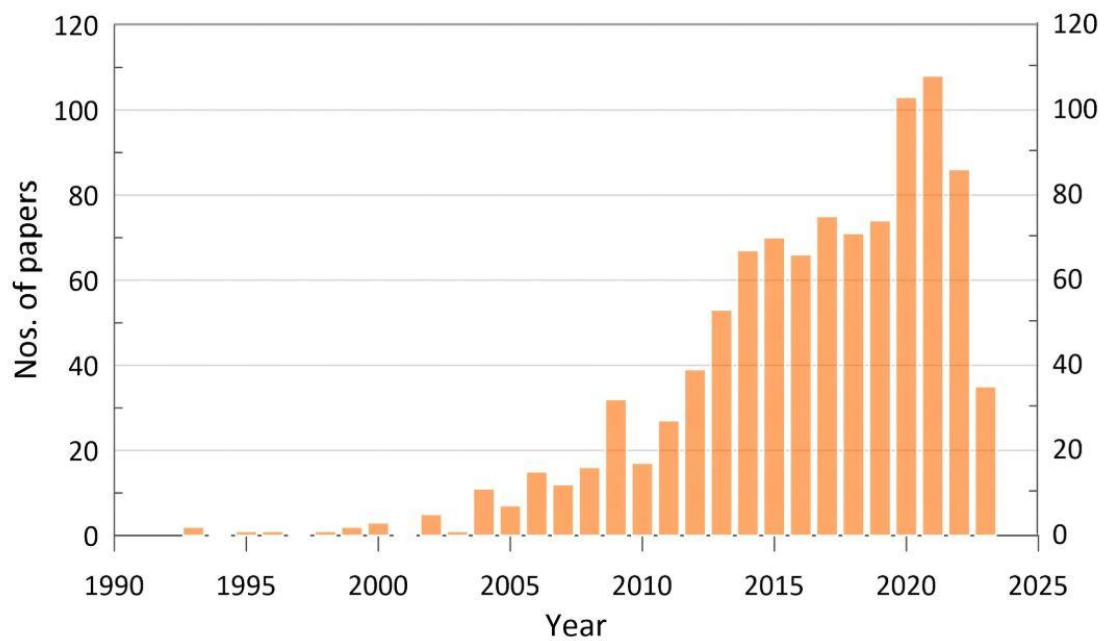


Рис. 1. Количество статей о природном водороде. Поиск проводился с использованием одновременного появления терминов «природный водород» и «геология» во всех областях статей в коллекции Web of Science (всего = 1024, период = с 1993 по 2023 год) [Cha, Lee, 2023].

Глава 2. Методы исследования

2.1. Изучение данных дистанционного зондирования Земли

2.1.1. Изучение космических снимков

В 2005 году компания Google сделала сервис Google Earth общедоступным для территории США, затем Европы, а позже - и для всего мира. С открытием широкого доступа к космическим снимкам для геологов наступила новая эпоха. Имея в арсенале газоанализаторы водорода (об этом будет сказано ниже) и представления об обилии водорода в недрах, оставалось только поискать на космических снимках (Google Earth, Bing Maps, Яндекс карты и др.) объекты, которые могли быть связаны с выходом водорода на поверхность. Этого набора оказалось достаточно для *дешифрирования* кольцевых, эллиптических и других изометричных объектов, необычных с точки зрения геоморфологии своей формой и размерами (Рис. 2). Кроме того, благодаря функции просмотра в Google Earth снимков, сделанных в разное время, появилась возможность понять *динамику развития* кольцевых структур, их взаимодействие, наложение, разрастание, старение и другие особенности.



Рис. 2. Кольцевые структуры в районе г. Борисоглебска Воронежской обл. Справа – с обведенными кольцевыми структурами.

2.1.2. Изучение рельефа

Первые полевые выезды показали, что выделенные кольцевые структуры представляют собой блюдцеподобные понижения (на 1–10 метров) рельефа, как правило, с плоским дном и иногда окружены по периметру невысоким (до 5-6 метров) пологим валом. С этого момента нами был введен в обиход термин Кольцевые структуры проседания (КСП), который был в дальнейшем принят на вооружение специалистами, изучающими это новое явление (в иностранной литературе можно встретить термин SCD (Sub-Circular Depressions)).

В некоторых случаях КСП были плохо читаемы или совершенно не видны на космических снимках, зато были прекрасно отражены в рельефе (Рис. 3).

В своей работе мы использовали три источника информации о рельефе: топографические карты, программу SAS.Планета (слой Рельеф (mars-for-free)) и слой LiDAR (источник Cintos.org) для Google Earth. Топографические карты оказались не всегда удобны в работе по разным причинам. Качество отражения небольших

особенностей рельефа на них оставляет желать лучшего, оперативный доступ к картам затруднён, удобной навигации нет. Но в отдельных случаях, когда нужно посмотреть характер развития КСП во времени, например изменение площади озёр, старые топографические карты могут оказаться полезны, т. к. на них отражена, хоть и генерализованно, поверхность Земли задолго до появления космических аппаратов.

Программа SAS.Планета в плане навигации и покрытия удобна, сайт с которого осуществляется загрузка (<https://maps-for-free.com/>) использует карты рельефа SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) с точностью по горизонтали около ± 15 м и точностью по вертикали около ± 6 м. По этой причине неглубокие КСП с помощью этого ресурса различить не удастся.

Лучше всего рельеф земной поверхности отображается с помощью технологии LiDAR (Рис. 3). К сожалению, область покрытия такой съемкой пока невысока. Поначалу нам удалось получить доступ к обработанным снимкам только на небольшую часть восточного побережья и центральных областей США, но и этого оказалось достаточно для нескольких лет исследований.

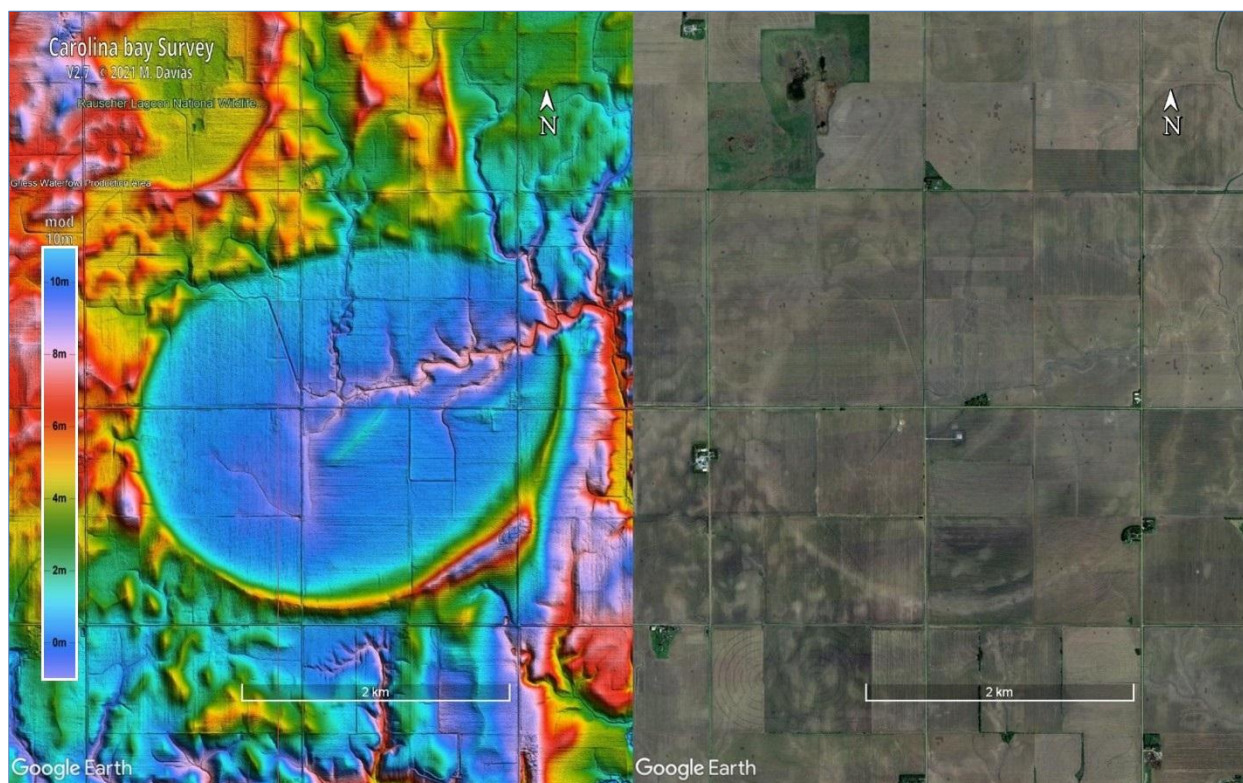


Рис. 3. Изображение КСП NE#3 (Небраска, США) в видимом диапазоне (справа) и с помощью LiDAR (слева). На иллюстрации слева отражен рельеф, где каждому интервалу

глубины отвечает свой цвет. Шкала цвета и относительной высоты местности находится в левой части рисунка.

2.2. Геохимические методы и сопутствующие подготовительные работы

2.2.1. Подготовительные работы, разметка профилей

Перед производством полевых работ размечаются профили на выделенных ранее потенциальных структурах дегазации, исходя из следующих соображений:

- 1) Профиль должен пересекать изучаемую структуру (КСП, разлом и пр.);
- 2) По возможности, профиль должен быть прямым;
- 3) Количество точек в профиле должно быть достаточным, чтобы выявить аномалию и, как правило, зависит от размера структуры;
- 4) Шаг точек выбирается исходя из размеров пересекаемой структуры и составляет, как правило от 5 до 200 метров;
- 5) Если производится оперативный замер концентрации водорода в скважинах (полевая водородометрия), то нужно стараться выйти за пределы аномалии, чтобы получить серию «нулей» в измерениях, т. е. фоновые или близкие к таковым концентрации;
- 6) При отборе проб грунта для последующей дегазации и газохроматографического анализа длина профиля выбирается исходя из предыдущего опыта. Тут надо отметить, что несмотря на более прогрессивные аналитические методы, результаты бывают доступны по возвращении с полевых работ. Поэтому, желательно иметь полевой хроматограф, чтобы не пропустить аномалию или, как вариант, наладить непрерывную еженедельную отправку проб в лабораторию с оперативным получением результатов анализов;
- 7) Ограничения на количество точек в профиле и его длину могут возникать из-за обводненности грунтов, труднодоступности, отсутствия разрешения от хозяев участка (иногда такое случалось в США) и других причин.

Разметка профилей производится, как правило, после полевой рекогносцировки и понимания доступности изучаемого объекта. Для этого применяется компьютер с приложением (напр. OziExplorer), позволяющим привязывать координаты к космическим снимкам в растровом формате. После чего проектные точки записываются (передаются) в навигатор (напр. GARMIN GPSMAP серии 60/62) или в смартфон с установленным приложением Locus Map. Использование Locus Map позволяет перемещаться по точкам измерений без потерь времени на привязку.

Также возможно оперативное создание точек профиля прямо в процессе производства измерений. Для этого используются те же портативные навигаторы, в которых можно создавать проектные точки профиля по азимуту и расстоянию. В случае небольшого размера структур и, как следствие, малого шага между точками применялась разметка профилей непосредственно на местности с помощью колышков или флажков и измерительного приспособления (рулетка, лента или веревка с узлами).

2.2.2. Полевая водородометрия. Оборудование и методика.

2.2.2.1. Оборудование

В 2005 году мы начали использовать метод полевой водородометрии, которой нас в ходе совместной экспедиции обучил В. Л. Сывороткин. В последующие годы были потрачены значительные усилия на улучшение первоначальной методики пробоотбора и измерений, а также разработаны варианты для разных грунтовых условий.

При полевых исследованиях применялись сенсорные измерители содержания водорода газообразных сред (водородные газоанализаторы). Водородные газоанализаторы серии ВГ (производства МИФИ) обладают несомненным преимуществом – селективностью по водороду. Газоанализаторы изготовлены с использованием сенсоров на основе МДП (металл-диэлектрик-полупроводник)-структур. МДП-сенсоры выделяются среди других типов сенсоров высокой

чувствительностью, простотой изготовления и длительным сроком службы [Nikolaev, Litvinov, Khalfin, 2004; Nikolaev, Kalinina, Litvinov, 2011].

Изначально применялся один газоанализатор ВГ-2А (0-50ppm) и ручной насос, включенный наоборот, что позволило использовать его для *выкачивания* воздуха из скважины. В качестве недостатка этой схемы можно отметить, что процесс выкачивания газа из скважины приводит к его замещению атмосферным воздухом, поступающим через уплотнение устья скважины, приводящим к разбавлению пробы. Так как концентрации водорода часто превышали верхний предел чувствительности газоанализатора, в схему был добавлен ещё один газоанализатор серии ВГ, который позволял измерять водород в концентрациях до 1000ppm (Рис. 4).

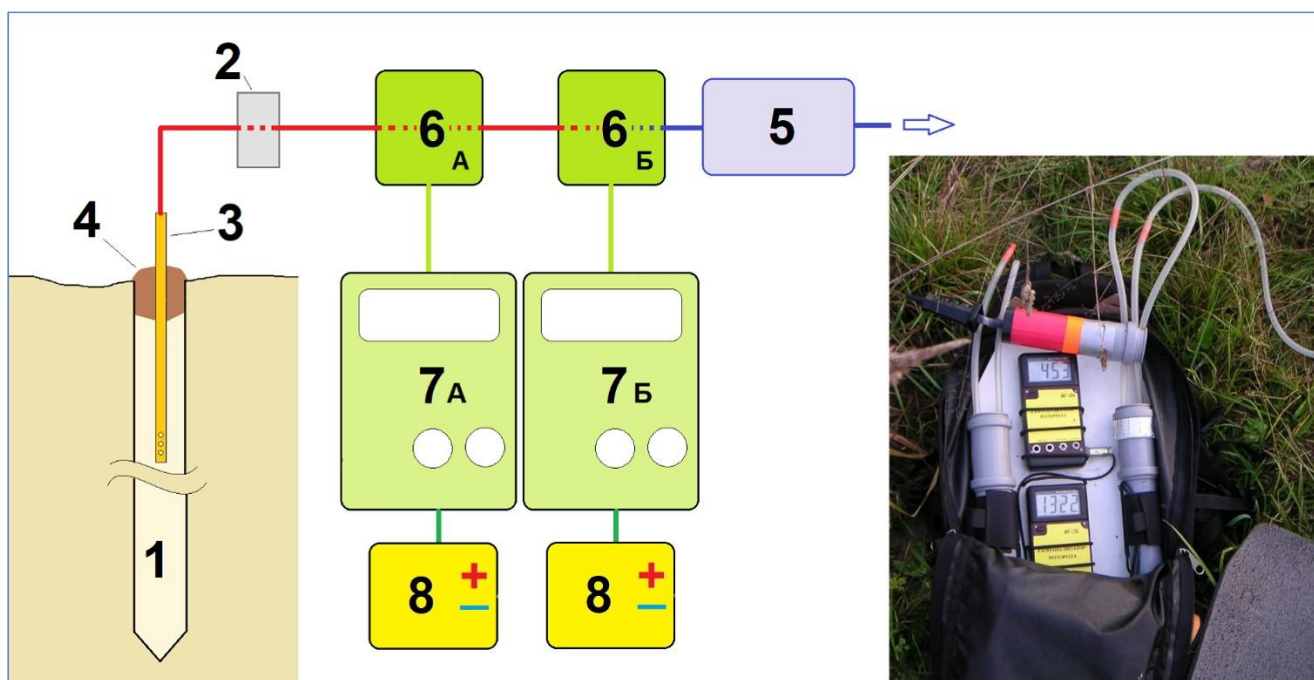


Рис. 4. Первоначальная схема измерения водорода. 1–скважина, 2–фильтр, 3–трубка с отверстиями, 4–глинянный замок, 5– ручной насос, 6–сенсоры, 7–блоки индикации, 8–аккумуляторы. Справа: ВГ-2А, ВГ-2Б и во время измерений. Липецкая обл., 2006 г.

Для измерения концентраций водорода, превышающих 1000 ppm, в схему был добавлен третий газоанализатор водорода. Сборка стала состоять из трёх последовательно соединенных газоанализаторов водорода серии ВГ: ВГ-2А, ВГ-2Б, ВГ-2В, (Рис. 5) с различной чувствительностью (0-50ppm, 0-1000ppm и 0-17000ppm соответственно), что позволило измерять концентрации водорода в более широком

диапазоне. Насос был заменен на компактный велосипедный, в котором был установлен плунжер в обратном направлении, после чего он стал работать на всасывание.

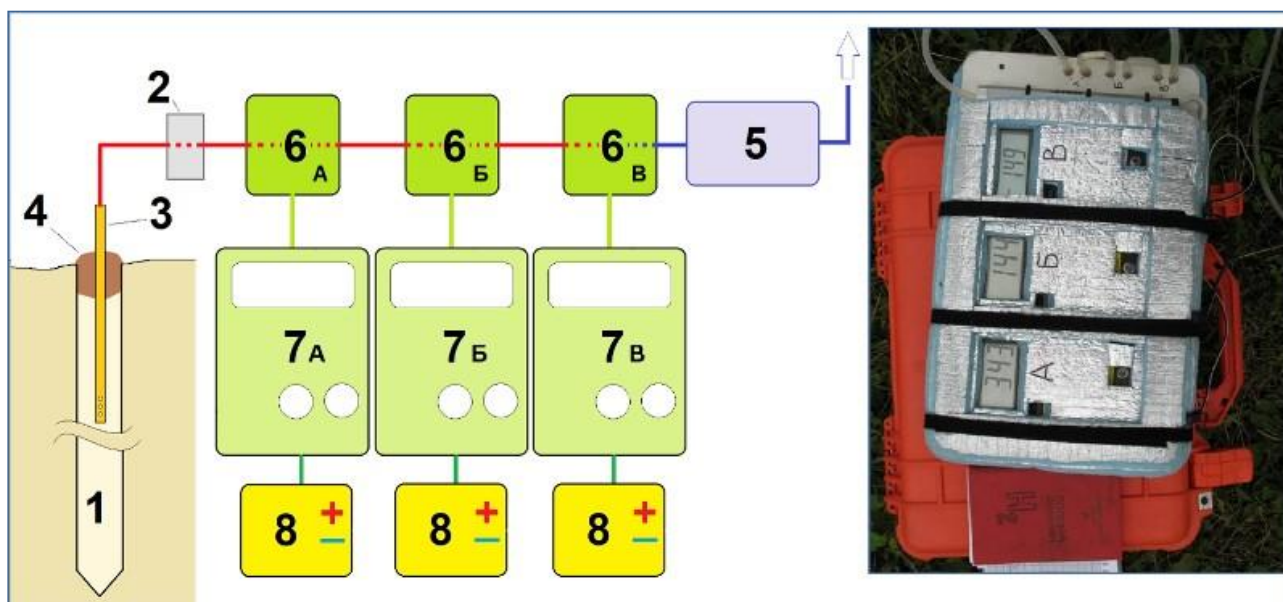


Рис. 5. Три последовательно соединенных газоанализатора серии ВГ и ручной насос. 1–скважина, 2–фильтр, 3–трубка с отверстиями, 4–глинянный замок, 5– ручной насос, 6–сенсоры, 7–блоки индикации, 8–аккумуляторы. Справа: ВГ-2А, ВГ-2Б и ВГ-2В во время измерений в Северной Осетии (2008 год).

При доступности в ходе проведения полевых работ дополнительного газоанализатора, оборудованного циркуляционным насосом (напр. Geotech GA2000), применялось подключение, которое обеспечивало в ходе измерений отсутствие потери пробы газа. Для этого дополнительный газоанализатор включался последовательно с сенсорами ВГ, и система закольцовывалась со скважиной через коническую пробку с латунными трубками различной длины (Рис. 6). Также, для защиты газоанализаторов от случайного всасывания воды, на входе и на выходе из скважины в схему были установлены не пропускающие жидкую воду фильтры с размером пор 0,65 мкм.

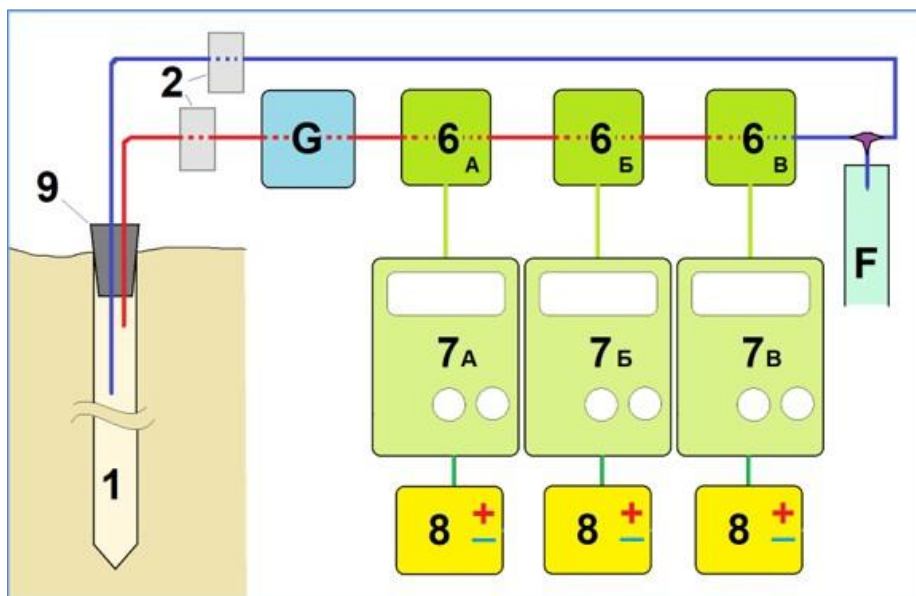


Рис. 6. Использование циркуляционного насоса, встроенного в дополнительный газоанализатор. 1–скважина, 2–фильтры, 6–сенсоры, 7–блоки индикации, 8–аккумуляторы, 9–коническая пробка с двумя латунными трубками разной длины, G – GA2000, F – воронка для отбора проб.

В целях обеспечения компактности оборудования, повышения его отказоустойчивости, увеличения времени работы без подзаряда и для уменьшения количества соединений, все три газоанализатора были разобраны и объединены в одном корпусе, а три отдельных Ni-MH батареи были заменены на одну гелевую свинцово-кислотную. В эту сборку был встроен циркуляционный мембранный насос с производительностью 0,5 л/мин, с помощью которого появилась возможность «закольцевать» скважину, что привело к отсутствию разбавления пробы в процессе измерений. В схему были установлены не пропускающие жидкую воду фильтры с размером пор 0,65 мкм. Кроме этого, был добавлен подключаемый паразитный объем, позволяющий измерять концентрации водорода, превышающие 1,7% (Рис. 7).

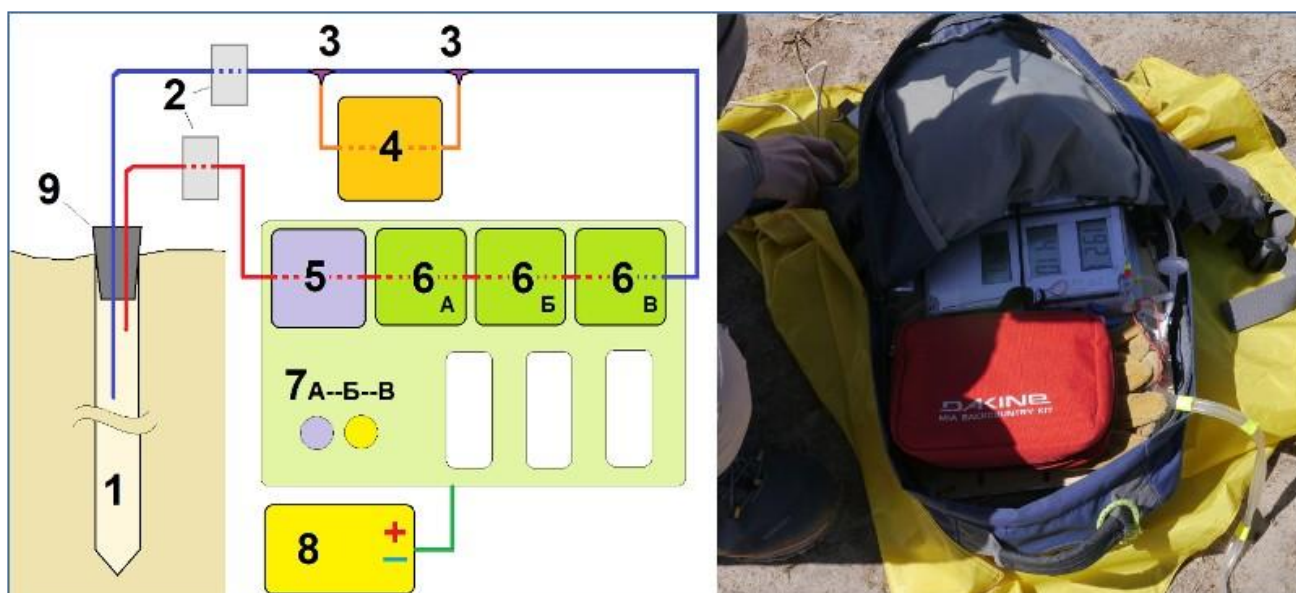


Рис. 7. Полевое использование сборки из трёх последовательно соединенных газоанализаторов водорода серии ВГ в одном корпусе с электрическим насосом (Небраска, США 2016). Слева – схема соединений: 1–скважина, 2–фильтры 0,65мкм, 3– трёхходовые краны, 4–паразитный объём, подключаемый при необходимости разбавления пробы, 5– электрический циркуляционный насос, 6–сенсоры, 7–блок индикации, 8–аккумуляторная батарея, 9–коническая пробка с двумя латунными трубками разной длины.

В дальнейшем сборка из трёх аналоговых приборов ВГ-2 была заменена более современным цифровым газоанализатором серии ВГ-7, который позволяет измерять концентрации водорода в воздухе от 0,5 ppm до 10000ppm (1%). При необходимости в схему добавлялись дополнительные газоанализаторы Geotech GA5000, GA 2000 Plus (с пределами измерения водорода 0–1000 ppm), SNOOPER mini (портативный течеискатель с диапазоном измерений водорода 0 – 2,2%) и водородный течеискатель HY-ALERTA 500 (диапазон измерений 15 ppm – 100%), которые включались последовательно с насосом и газоанализатором ВГ (Рис. 8) или использовались отдельно.

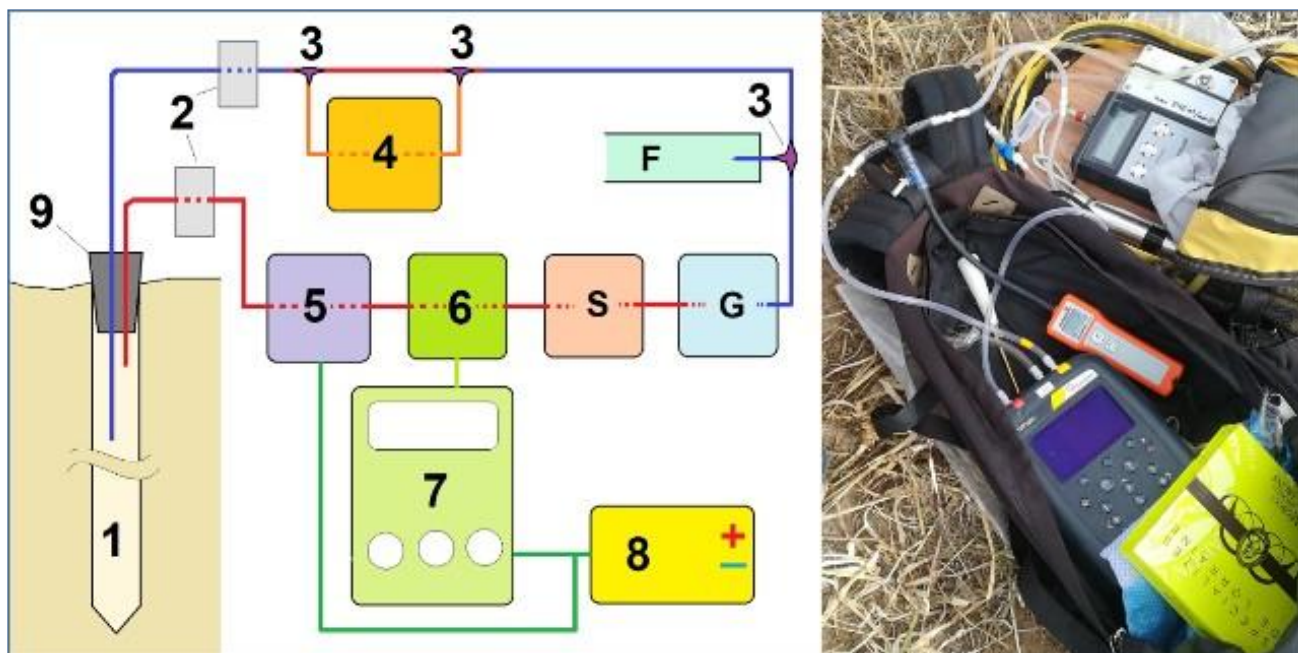


Рис. 8. Полевая сборка из трёх последовательно соединенных газоанализаторов (ВГ-7, GA5000, SNOOPER mini), внешнего циркуляционного насоса и воронки для отбора проб в вакуумированную пробирку. Слева – схема соединений: 1–скважина, 2–фильтры 0,65мкм, 3–трёхходовые краны, 4–объём, подключаемый при необходимости разбавления пробы, 5–электрический циркуляционный насос, 6–сенсор (ВГ-7), S – SNOOPER mini, G – GA5000, F – воронка, 7–блок индикации (ВГ-7), 8–аккумуляторная батарея, 9–коническая пробка с двумя латунными трубками разной длины. Справа – процесс измерений в Марокко, 2019 г.

Использование в одной сборке газоанализаторов с разным типом сенсоров (МДП-сенсор ВГ и сенсор на основе электрохимической ячейки в Geotech) позволяет, в ряде случаев, вовремя заметить неисправность или нештатное поведение одного из приборов. Опыт эксплуатации выявил недостатки Geotech GA5000, такие как дороговизна обслуживания, невозможность ремонта в полевых условиях, незаметный цвет корпуса и нечитаемый при ярком солнечном свете экран. Заметим, что предыдущая модель (GA2000) была желтого цвета, имела петли для крепления наплечного ремня и монохромный дисплей, на котором хорошо различима отображаемая информация даже при ярком солнце. Кроме того, в процессе эксплуатации выяснилось, что электрохимические ячейки обладают низким ресурсом, а их замена, как оказалось, стоит порядка 1000 евро за каждую. Течеискатели, с которыми приходилось работать, тоже не лишены недостатков. Пределы измерения SNOOPER mini составляют от 0 до 2,2%, но он неселективен к водороду, реагируя на

присутствие горючих газов. Течеискатель HY-ALERTA™ 500 не имеет дисплея, а индикация осуществляется комбинацией светодиодов разного цвета, что не всегда удобно при полевом применении. Всех перечисленных недостатков лишены приборы серии ВГ.

Для того, чтобы можно было в дальнейшем проанализировать пробы газа в лаборатории, в систему был добавлен узел для подключения воронки с иглой, позволяющей отбирать пробы газа в вакуумные пробирки Vacutainer.

В результате многолетних экспериментов и конструкторской работы получился переносной полевой комплекс, который позволяет оперативно измерять концентрацию водорода в пробе воздуха от долей ppm до нескольких процентов. Полученная конструкция в сборе со шлангами и набором ЗИП может переноситься в небольшом рюкзаке. Если газоанализаторы находятся во включенном и прогретом состоянии, то разворачивание для измерений и сворачивание комплекса для переноски к следующей точке наблюдения занимает не более минуты (без учёта времени на устройство скважины ~1-5 мин. и времени измерения ~2-20 мин.).

2.2.2.2. Методика проведения полевых измерений водорода.

После выбора объекта изучения проводится:

- 1) Разметка профиля путем создания точек в подходящих программах для ПК (напр. OziExplorer, SAS.Planet, QGIS, Google Earth и др.), приложении LocusMap для смартфона или портативном навигаторе (Garmin);
- 2) Выбор места измерения;
- 3) Погружение в землю (забивание кувалдой) цилиндрического заостренного штыря (длина=1200мм, диаметр=12мм). См. Рис. 9А;
- 4) Вытягивание штыря из земли с помощью домкрата – для этого используется рычаг и телескопическая опора. При этом, поднимающийся штырь работает как поршень – создавая за собой разрежение, которое вытягивает в образовавшуюся скважину газы, находящиеся в околоскважинном пространстве (Рис. 9В);

5) Извлечение штыря из скважины и быстрое закупоривание последней с помощью резиновой пробки с проходящими сквозь неё двумя трубочками различной длины. Трубочки заранее подключены к газоанализатору посредством ПВХ шлангов. См. Рис. 9 С, D;

6) Включение воздушного насоса, приводящее к циркуляции газа в системе «скважина – газоанализаторы». После выравнивания концентраций в системе и стабилизации показаний можно считывать значение концентрации с экранов газоанализаторов. Зная объем измерительной системы, объемы скважины и оценив потери, необходимо рассчитать поправочный коэффициент. Поправочный коэффициент вычисляется путём сравнения объёма скважины, содержащей пробу газа с суммой всех объёмов, заполненных перед включением насоса атмосферным воздухом. Второе можно вычислить двумя способами: оценив объемы сенсоров, шлангов, насоса и фитингов или введя в закольцованную систему известный объём газа с известной концентрацией (Мы использовали ПГС, содержащую 0,0932% гелия, 1,032% метана и 0,0950% водорода в воздухе);

7) При превышении верхнего предела чувствительности в $17000 \text{ ppm} = 1,7\%$ водорода, что соответствует 3,2% водорода в скважине, была предусмотрена возможность оперативного подключения к замкнутой системе «газоанализатор-скважина» (объемом 250 мл) дополнительного объема (1000 мл), что приводит к вторичному разбавлению пробы атмосферным воздухом в 4 раза. Разбавление воздухом позволяет измерять концентрации водорода в пробе до 8,6% (почти 16% в скважине с учётом $K=1,86$). Соответственно, если стоит задача измерять большие концентрации водорода, то можно использовать для разбавления дополнительный объем другого размера. Приведенные выше расчеты, в силу ряда причин, являются достаточно условными: во-первых, невозможно оценить какое количество газа было экстрагировано из грунта при подъеме штыря, действующего как поршень, а какое количество газа было затянута в скважину с поверхности; во-вторых, есть короткий промежуток времени между извлечением штыря из скважины и погружением в неё конической пробки с трубками с последующем закупориванием системы. Нужно стремиться к тому, чтобы скорость извлечения штыря из скважины всегда была

одинаковой, равно как и промежуток времени между извлечением штыря из скважины и закупориванием последней (порядка 1 с). Поэтому, при работе в паре, операторам нецелесообразно меняться ролями, в противном случае сравнение показаний в разных скважинах может оказаться некорректным. В пределах одного объекта нужно выполнять правило: Оператор №1 занимается всем, что связано со скважиной до момента извлечения из неё штыря, задача Оператора №2 состоит в погружении пробоотборника в скважину и измерениях;

8) В случае использования аналоговых приборов серии ВГ-2 считанный с дисплея результат сравнивается со стартовым значением и по полученной разнице, используя калибровочные графики, вычисляется концентрация водорода. При использовании цифрового газоанализатора ВГ-7 концентрация водорода считывается с дисплея.



Рис. 9. Методика получения и анализа пробы газа из скважины. **А** – забивание штыря в землю, **В** – вытягивание штыря с помощью рычага и телескопической треноги, **С** – ручное извлечение штыря, подготовка пробоотборника и контроль приборов, **Д** – установка пробоотборника в скважину, включение циркуляционного насоса и считывание показаний.

Приведенная методика неплохо работает в грунтах типа песков и суглинков. В случае тяжелых для забивания штыря (щебнистых, скальных и др.) грунтов

используется электрический аккумуляторный перфоратор и длинный бур (100-120см) диаметром 12-14мм (Рис. 10).



Рис. 10. Процесс бурения скважины в офиолитах Samail. Оман, 2012 год

Когда возникает необходимость в отборе проб газа с большей глубины или образцов грунта, то целесообразно использовать ручной мотобур Stihl BT-131 (Рис. 12) или тяжёлую гидравлическую технику (Рис. 13).

В Омане и в Северной Каролине проводились полевые эксперименты связанные с возможностью применения “slide hammer” (AMS Inc., Американ-Фолс, Айдахо, США) – специального устройства, в котором ударник (кувалда) выполнен в виде массивной трубы, которая имеет возможность скользить по инструменту, ударами загоняя его в землю на глубину до 2 метров.

Кроме этого, в Омане, в местах газопроявлений, где пузыри в водоёмах выходили в значимом количестве, отбирался газ для последующего лабораторного анализа. Для отбора проб применялись различные типы воронок (иногда из подручного материала) и контейнеры Swagelok tubes SS-4CD-TW-10 или SS-4CD-TW-25, снабженные кранами Swagelok SS-16DKS6, а также стеклянные пробирки Vacutainer, предварительно вакуумированные до 10^{-4} мБар.



Рис. 11. Пример отбора пузырей с помощью оборудования Swagelok. Слева – воронка с трубками и кранами для отбора пузырей и запираания пробы газа. Справа – устройство с резиновой мембраной для отбора проб с помощью иглы. Оман 2012 год



Рис. 12. Отбор проб грунта с помощью мотобура Stihl BT-131 и шнека с удлинителями. Монголия, 2019 г.



Рис. 13. Гидравлический пробоотборник (direct push) на гусеничном ходу. Небраска, США 2016 год.

2.2.3. Литогазогеохимическое опробование приповерхностных отложений

Развитие методик поиска природного водорода привело к созданию мобильной полевой лаборатории, которая в ходе работ непрерывно модернизировалась в последующие годы. Полевая мобильная лаборатория позволяет измерять сорбированные газы путём проведения литогазогеохимического опробования приповерхностных отложений. Этот тип исследований более затратен и трудоёмок, чем экспресс-метод, который использовался ранее, но позволяет получить результат, недостижимый при проведении полевой водородометрии.

При наличии достаточного опыта, этим методом можно получать хорошие результаты в случаях, когда описанные выше другие методики пробоотбора не работают. К несомненным плюсам метода можно отнести возможность использования полученной пробы газа для проведения измерения концентрации не только водорода, но и других газов, а также изотопных исследований.

2.2.3.1. Отбор и подготовка проб

Для пробоотбора проводится бурение до глубины 1-1,5 метра, в зависимости от грунтовых условий. Для этих целей применяется носимый ручной мотобур и шнек диаметром 65мм и длиной 1,5 метра с удлинителями или без них. После извлечения шнека на поверхность с него отбиралась проба грунта, которая консервировалась в насыщенном водном растворе NaCl в ёмкости объемом 500мл. Полученные в полевых условиях пробы перевозились в лагерь, где проводилась их термовакuumная дегазация.

2.2.3.2. Методика термовакuumной дегазации

Ёмкость с пробой подключается к предварительно вакуумированной до 0,01 атм. пипетке объемом 100–200 мл (зависит от предполагаемой газонасыщенности пробы грунта). После чего, в течение 15 мин на водяной бане при 70°C проводится нагрев ёмкости с пробой грунта. Вышедший из пробы газ переводится из пипетки в стеклянные флаконы объемом 30 мл. Эта операция проводится в ёмкости с насыщенным водным раствором NaCl при полном погружении пипетки и флакона.

2.2.3.3. Анализ газа

Содержащаяся под водно-солевым затвором проба газа может быть проанализирована с помощью хроматографа или водородного газоанализатора в полевой лаборатории. При отсутствии полевого хроматографа пробы упаковываются и отправляются в стационарную лабораторию для анализа, при этом в целях оперативного получения результатов желательно наладить периодическую, например еженедельную, отправку проб и получение результатов.

Глава 3. Результаты исследований

Современное содержание молекулярного водорода в приземном воздухе составляет 515 ppb в северном полушарии (Гренландия) и 550 ppb в высоких южных широтах Антарктиды. Причём содержание водорода, судя по данным бурения льда, менялось во времени. Реконструкции показывают, что в южном полушарии

содержание водорода в атмосфере было на уровне 330 ppb и оставалось относительно постоянным в середине-конце 1800-х годов, после чего последовал устойчивый рост до современного уровня 550 ppb [Patterson et al., 2021], тогда как в северном полушарии пиковые содержания атмосферного водорода на уровне 520 – 560 ppb были в 1980-х и 1990-х годах, за которыми последовало снижение до современного значения в 515 ppb [Petrenko et al., 2013].

Атмосфера является одной из оболочек планеты, и не только её состав, но и существование обусловлено дегазацией планеты Земля. Результаты изучения структур дегазации водорода приведены в этой главе в следующем порядке: Россия, Монголия, Оман и США. Все регионы, в которых проводилось изучение природного водорода и сопутствующих ему явлений, отмечены на карте (Рис. 14). Часть полевых результатов получена совместно с другими исследователями и пока не опубликована, поэтому они не были включены в настоящую главу.

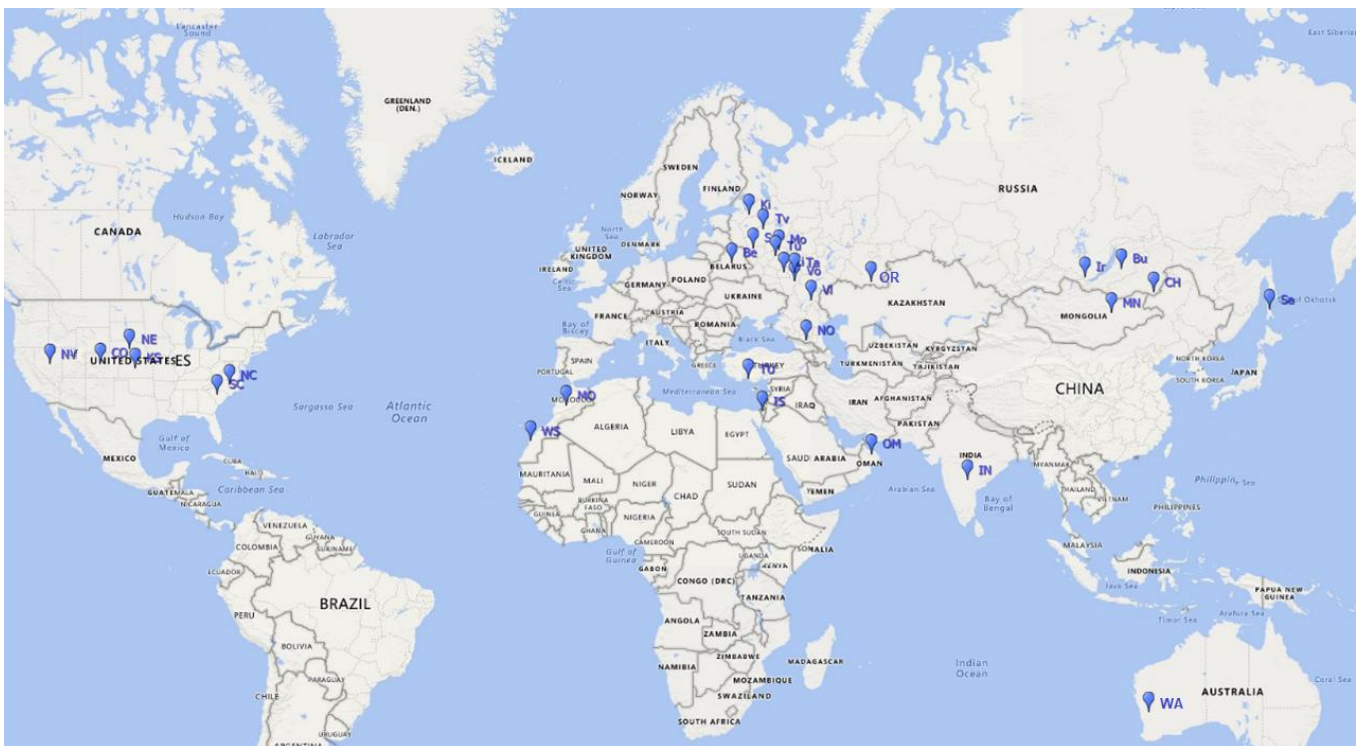


Рис. 14. Фрагмент карты мира. Метками отмечены регионы, в которых автором проводилось изучение водородной дегазации Земли.

3.1. Рязанская область.

В сентябре 2005 года отрядом в составе: В.Л. Сывороткин, А.В. Сывороткин, В.Н. Ларин и Н.В. Ларин была предпринята экспедиционная поездка с целью освоения используемой В.Л. Сывороткиным методики водородометрии. В качестве объекта исследования были выбраны воронки неясного генезиса (Рис. 16, 17) вблизи города Сасово Рязанской области (Рис. 15).

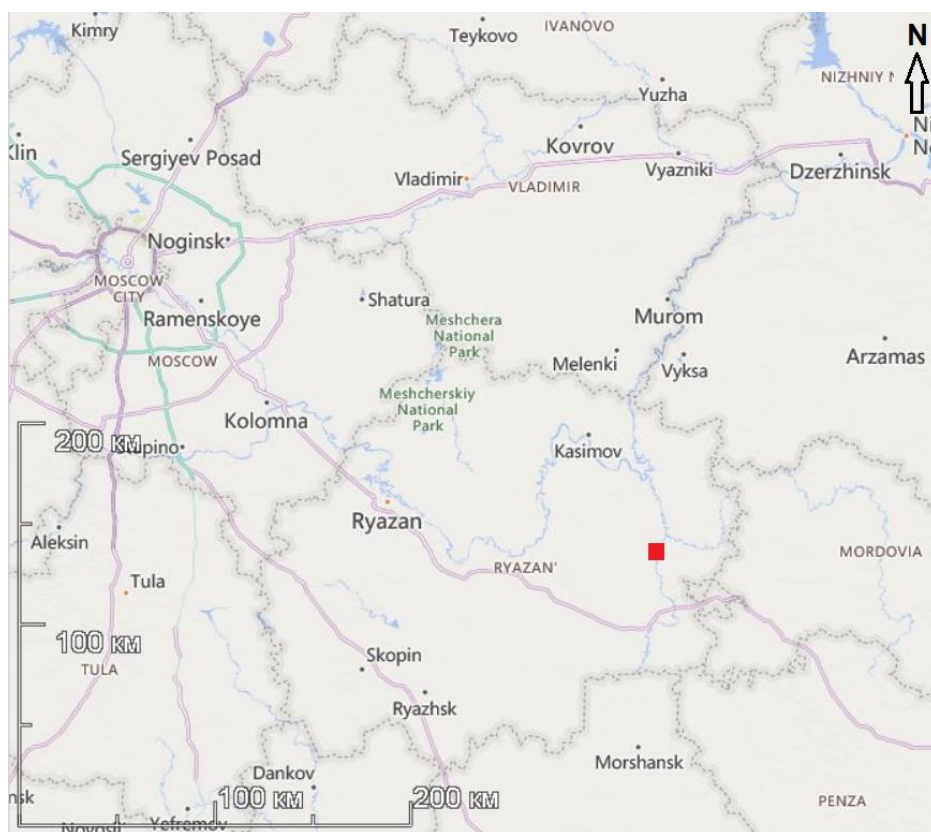


Рис. 15. Район исследований на карте. Показан вне масштаба.

Надо заметить, что сасовские воронки получили широкую известность, когда 12 апреля 1991 г. в 400 метрах от г. Сасово произошел взрыв; его взрывная волна выбила окна и двери в половине зданий города. По мнению специалистов, такой эффект мог быть вызван взрывом не менее 30 тонн тротила. Координаты воронки №1 $N54,33185^{\circ}$ $E41,92690^{\circ}$, диаметр составил 28 метров, глубина – 4 метра. Однако никаких следов взрывчатки обнаружено не было, а для того, чтобы получилась такая воронка, достаточно 1 тонны тротила. В июне 1992 г. в 7 км севернее г. Сасово на кукурузном

поле была обнаружена еще одна воронка (№ 2), её диаметр составил 15 м, а глубина 4 м. Весной, при посевных работах воронки ещё не было и хотя взрыва никто не слышал, взрывное происхождение было установлено по окружающему ее кольцообразному выбросу. Кроме того, по словам очевидцев, видевших кратер после его возникновения, вокруг воронки обнаружились огромные комья земли.



Рис. 16. Владимир и Алексей Сывороткины на краю воронки №1, Сентябрь 2005 (Сасово Рязанской обл.)

К моменту нашего посещения воронка №1 превратилась в небольшое озеро, поэтому проведение измерений содержания водорода было возможно только на её борту. Газоанализаторы показали повышенное относительно фона содержание водорода.

Воронка №2 хорошо сохранилась, оказалась совершенно сухой, и замер на ее дне показал вдвое большую концентрацию водорода по сравнению с прилегающей территорией.

К сожалению, подробная информация о результатах замеров не сохранилась. Соображения о природе взрывов, подобных сасовскому, будут изложены в главе «Обсуждение результатов».

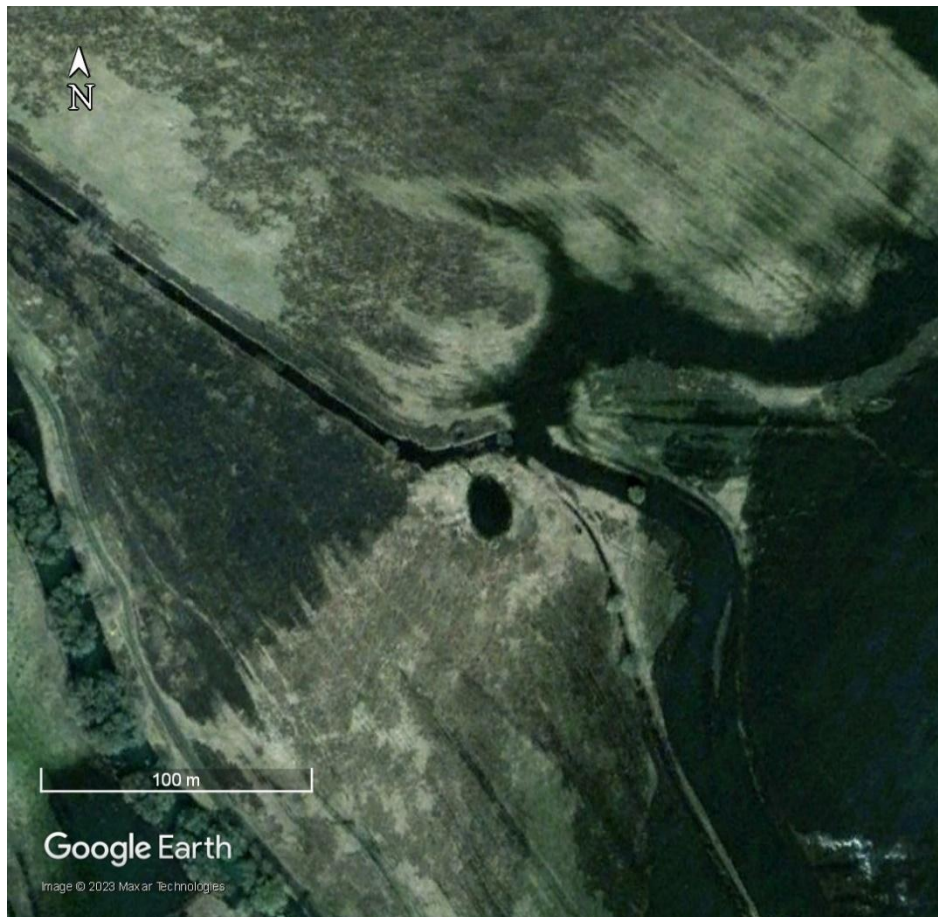


Рис. 17. Сасовская воронка (№1) в апреле 2006 г.

3.2. Липецкая область

Карстовая воронка и первая компактная водородная струя.

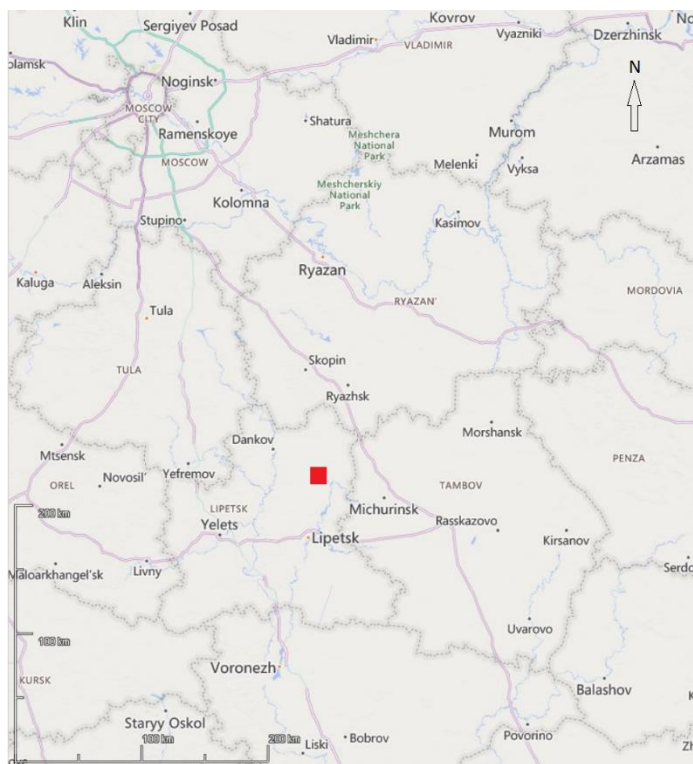


Рис. 18. Район работ на карте (август 2006 г.). Показан вне масштаба.

В августе 2006 года была предпринята поездка в Липецкую область (Рис. 18), в район, где, судя по публикациям в интернет, недавно появилась карстовая воронка (Рис. 19).

В северо-восточной части Липецкой области на пахотном черноземном поле была исследована карстовая воронка. Воронка была обнаружена местными жителями весной 2003 года при сельскохозяйственных работах. Объект расположен в 6 км на ЗСЗ от с. Крутое, его координаты $N53,02835^{\circ}$ $E39,72133^{\circ}$, диаметр – 13 метров, глубина – 4,5 метра. Проведенное бурение дна воронки выявило на глубине 3-х метров в аркозовых песках комки жирного чернозема, которые попали туда с поверхности, что подтверждало её провальное происхождение.



Рис. 19. Провальная воронка на севере Липецкой обл. в авг. 2006 года.

Замеры концентрации водорода на дне воронки показали нулевые значения. Было принято решение предпринять поиски водорода за пределами воронки. На расстоянии 50 метров и далее к западу газоанализаторы стали показывать небольшие, не более 5 ppm, концентрации водорода. Однако на расстоянии 120 м от воронки были зафиксированы значения более 100 ppm. Детализация данного места показала наличие локальной водородной аномалии (Рис. 20), которая протягивается в меридиональном направлении на 120 метров, имеет ширину порядка 10–15 метров, с максимальными значениями до 200–250 ppm. Пробоотбор (Рис. 21) производился с помощью заостренного штыря, кувалды и домкрата, анализ на водород проводился в соответствии со схемой, изображенной на Рис. 4 (см. главу «Методика ...»).

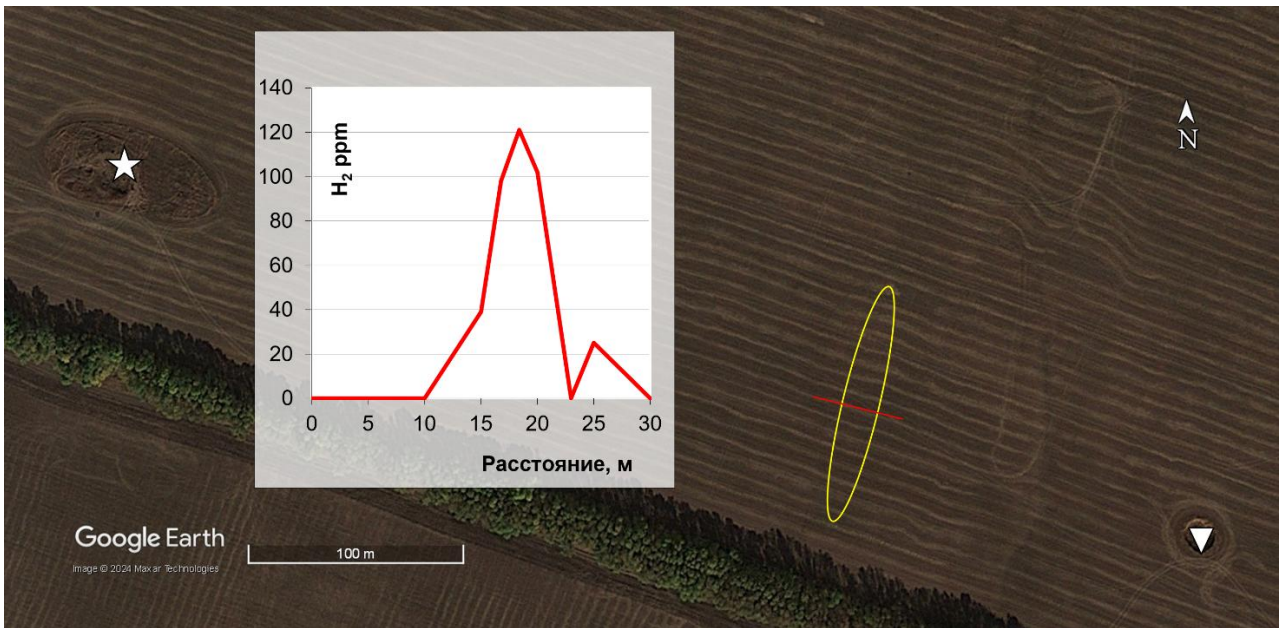


Рис. 20. Слева направо: выходы крепких песчаников (звездочка), график водорода (по линии 3-В), граница аномалии водорода (желтый эллипс), один из профилей водородометрии (красная линия) и карстовая воронка (треугольник). Масштабы снимка и оси расстояний графика не совпадают.



Рис. 21. В. Н. Ларин занимается полевой водородометрией на структуре дегазации №1

Село Ссёлки

Исследования на северной окраине г. Липецка (Рис. 22) были начаты после того, как благодаря программе Google Earth, был предоставлен широкий доступ к цветным космическим снимкам высокого разрешения. Этот момент позволил перейти на новый уровень поиска и изучения структур дегазации водорода. Посредством дешифрирования КС были выделены кольцевые структуры, которые, предположительно, были сформированы при участии водорода. Для проверки этого тезиса было осуществлено полевое исследование этих кольцевых структур на местности.

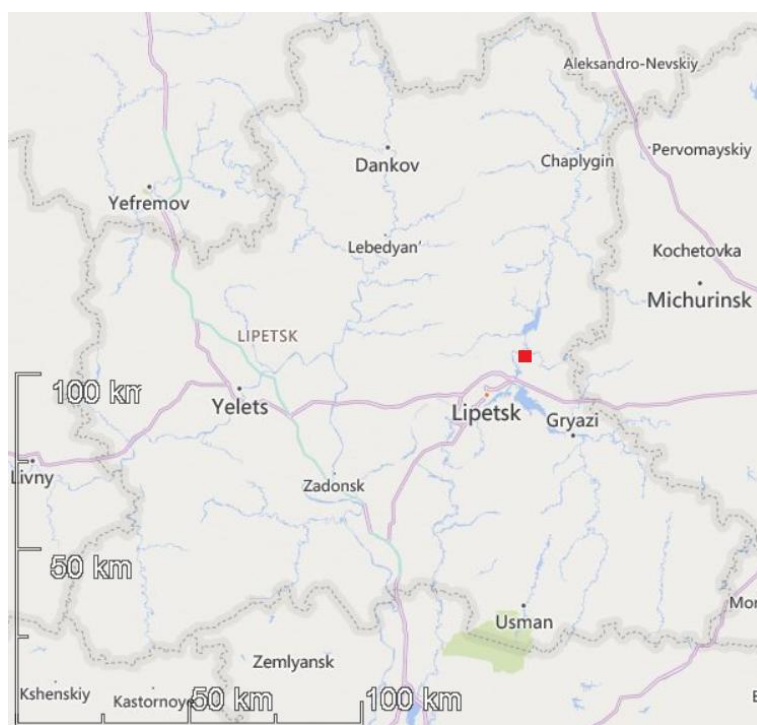


Рис. 22. Положение полигона работ на карте Липецкой обл.

Кольцевая структура в районе Ссёлок была выбрана в качестве объекта исследования из-за её компактности и фотогеничности. КСП имеет диаметр около 200 метров, координаты её центра N52,67717° E39,74897°. Структура является одной из группы кольцевых структур, расположенных у с. Ссёлки в северо-восточном пригороде г. Липецка. При первом посещении этого места (сентябрь 2007 г.) было обращено внимание на некоторые особенности: на заброшенном и заросшем двухметровой травой поле, структура выделялась пониженной, до полуметра, высотой травы. При этом центр структуры представлял собой площадку диаметром 10–15

метров, покрытую светло-серой глиной(?), и отличался полным отсутствием растительности.

В октябре 2008 года провели на этой структуре была проведена полевая водородометрия. Результаты этих исследований приведены на Рис. 23 и 24.



Рис. 23. Кольцевые структуры у с. Ссёлки в северном пригороде г. Липецка. Профиль через изученную КСП показан желтой линией.

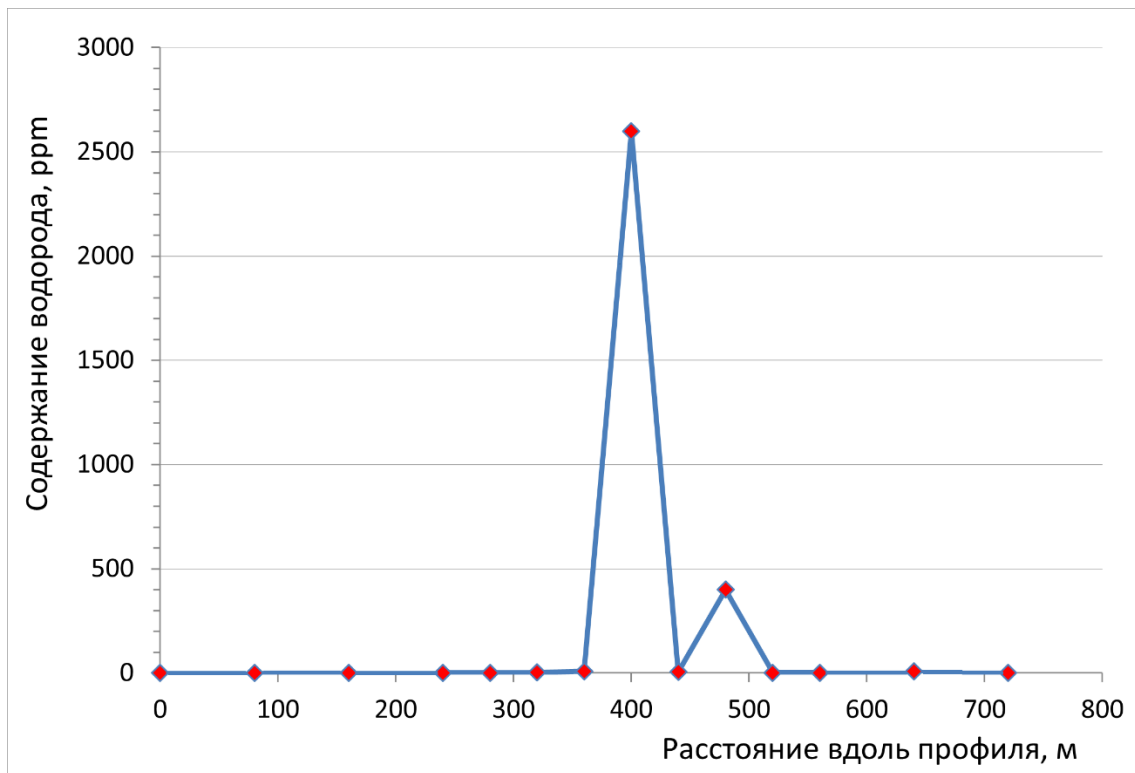


Рис. 24. Результаты полевой водородометрии на КСП у с. Ссёлки, северный пригород г. Липецка

Табл. 1. Результаты полевой водородометрии.

структура, профиль	номер точки	расст., м	Водород, ppm
Ссёлки, 1	1	0	1
	3	80	1
	5	160	1
	7	240	1
	8	280	1,5
	9	320	2,5
	10	360	8
	11	400	2600
	12	440	5
	13	480	400
	14	520	1
	15	560	1
	17	640	8
	19	720	1

В мае 2010 года отрядом, состоящим из геологов (Ларин Н. В., Сысолин А. И), почвоведов (Суханова Н. И., Кирюшин А. В.) и географов (Комиссаровы В. Ю. и Е. Е.) была проведена повторная водородометрия (см. Рис. 25) и выкопаны почвенные разрезы.

Для изготовления скважины применялись кувалда, штырь и домкрат, а для пробоотбора и анализа газов – ручной насос и газоанализаторы серии ВГ-2 в соответствии со схемой, показанной на Рис. 5 (см. главу «Методика...»). Всего было сделано 40 замеров по профилю с шагом 7,5 м. Результаты полевой водородометрии приведены на Рис. 25. Как видим, центру КСП соответствуют высокие (до 0,3%) содержания водорода [Sukhanova et al., 2013; Суханова et al., 2013; Суханова, Ларин, Кирюшин, 2014].

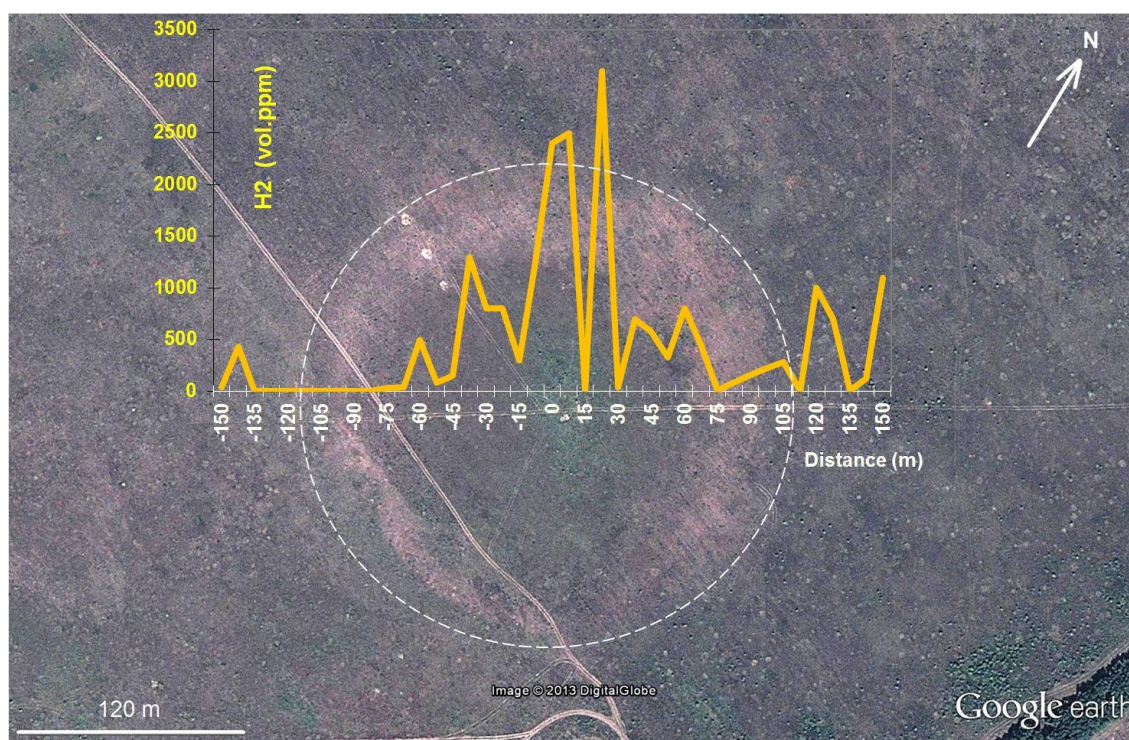


Рис. 25. КСП у с. Ссёлки Липецкой обл. с нанесенным графиком результатов водородометрии.

В настоящее время поле, на котором находятся кольцевые структуры, стало недоступно для посещения ввиду активной застройки частными домами.

Табл. 2. Результаты замеров водорода в районе с. Ссёлки

№	Расстояние от центра, м	Содержание водорода, ppm	№	Расстояние от центра, м	Содержание водорода, ppm
1	-150,0	40	22	7,5	2500
2	-142,5	430	23	15,0	0
3	-135,0	3,5	24	22,5	3100
4	-127,5	3,5	25	30,0	40
5	-120,0	0	26	37,5	700
6	-112,5	0,5	27	45,0	580

7	-105,0	0	28	52,5	330
8	-97,5	0	29	60,0	800
9	-90,0	0	30	67,5	450
10	-82,5	2	31	75,0	10
11	-75,0	30	32	82,5	80
12	-67,5	40	33	90,0	160
13	-60,0	500	34	97,5	225
14	-52,5	80	35	105,0	280
15	-45,0	150	36	112,5	1
16	-37,5	1300	37	120,0	1000
17	-30,0	800	38	127,5	700
18	-22,5	800	39	135,0	9
19	-15,0	300	40	142,5	120
20	-7,5	1250	41	150,0	1100
21	0	2400			

Тот факт, что центральным частям КСП отвечают высокие содержания водорода, свидетельствует о том, что она является структурой дегазации водорода.

3.3. Московская область

Село Жилино, г.о. Химки, Московская обл

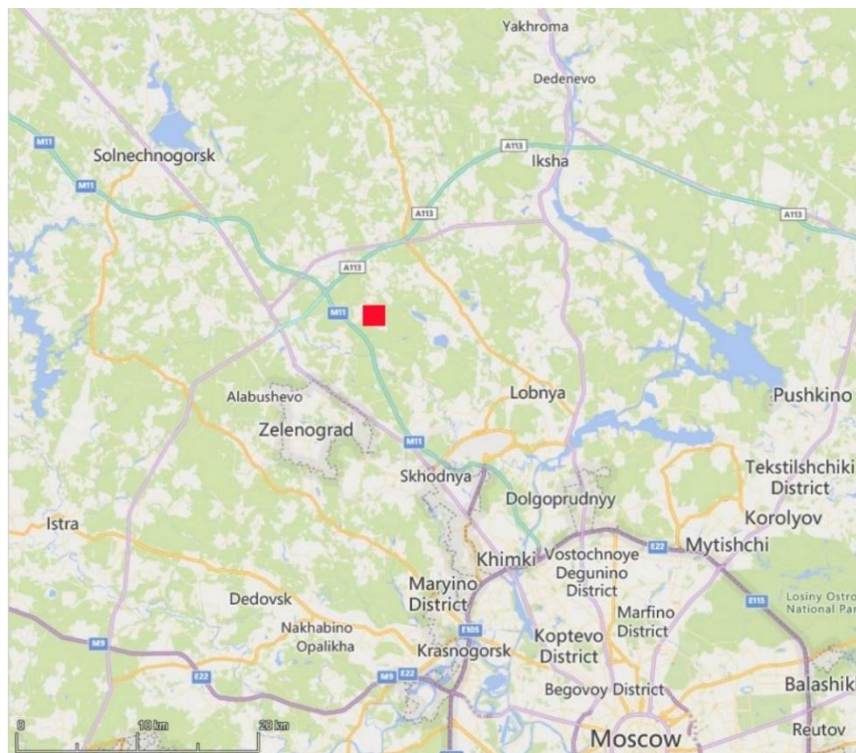


Рис. 26. Местоположение объекта. Участок показан вне масштаба.

При изучении космических снимков было обращено внимание на факт широкого развития в северной части Московской области кольцевых структур проседания, подобных изображенной на иллюстрации (см. Рис. 27).

В июне 2008 года отрядом в составе: Ларин В. Н., Ларин Н. В. и Горбатилов А. В. на указанной структуре была проведена серия полевых исследований, включавших в себя водородометрию.



Рис. 27. Кольцевая структура Жилино и профиль водородометрии через неё.

Изученная КСП расположена (Рис. 26) между деревнями Жилино и Вереvское в 22 км на ССЗ от Москвы. Размеры КСП составляют 450x350 м, координаты центра N56,06410° E37,26241°. Старый, преимущественно еловый, лес уничтожен, структура просела, заболотилась и заросла соснами. Сосны низкорослые, высотой 3–4 метра, диаметр ствола у комля около 3–5 см, возраст, судя по подсчетам годовых колец, порядка 90 лет и в целом выглядят как уменьшенная копия больших деревьев.

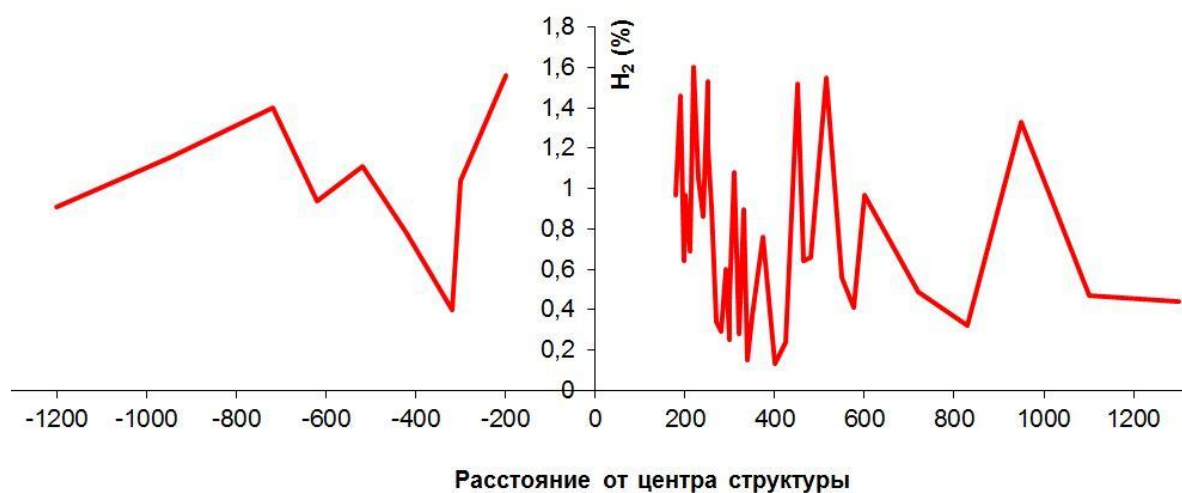


Рис. 28. Профиль водородометрии через структуру Жилино. 400-метровый разрыв на графике связан с невозможностью провести измерения из-за высокой обводненности КСП.

Табл. 3. Результаты полевой водородометрии через КСП Жилино.

№	Расстояние от центра, м	Содержание водорода, ppm	№	Расстояние от центра, м	Содержание водорода, ppm
1	-1200	0,91	24	300	0,25
2	-950	1,15	25	300	0,45
3	-720	1,4	26	310	1,08
4	-620	0,94	27	320	0,28
5	-520	1,11	28	330	0,9
6	-420	0,78	29	340	0,15
7	-320	0,4	30	350	0,37
8	-300	1,04	31	375	0,76
9	-200	1,56	32	400	0,13
10	180	0,97	33	425	0,24
11	190	1,46	34	450	1,52
12	198	0,64	35	465	0,64
13	200	0,97	36	480	0,66
14	210	0,69	37	515	1,55
15	220	1,6	38	550	0,56
16	230	1,05	39	575	0,41
17	240	0,86	40	600	0,97
18	250	1,53	41	720	0,49
19	250	1,2	42	830	0,32
20	260	0,91	43	950	1,33
21	270	0,34	44	1100	0,47
22	280	0,29	45	1300	0,44
23	290	0,6			

Многочисленные замеры концентраций водорода в данном месте обнаружили аномалию (Рис. 28), которая выходит за пределы профиля. В центре этой аномалии вблизи КСП содержания водорода превышали 1,6%, по периферии значения пилообразно спадали до 0,5%, что также очень много. Для изготовления скважин применялись кувалда, штырь и домкрат, а для пробоотбора и анализа газов ручной насос и газоанализаторы серии ВГ-2 (см. главу «Методика...», Рис. 5).

В мае 2012 года полевым отрядом в составе: Ларин Н. В., Згонник В. А., Родина С. Н. были проведены повторные замеры в районе структуры Жилино-Веревское. Измерения в самой КСП, как и ранее, в силу высокой обводнённости, были невозможны. Поэтому была проведена полевая водородометрия и отобраны контрольные пробы газа по периметру этой депрессии, которые в дальнейшем были проанализированы на газовом хроматографе (Табл. 4) в IFPEN (Париж, Франция). Результаты водородометрии показали высокие значения содержания водорода, вплоть до 8000 ppm, что подтверждало полученные ранее результаты. Рассчитанный поток водорода оказался наибольшим для всех КСП, изученных в северном Подмосковье, и составил, для условной круглой площадки диаметром 1 км, от 21 000 до 27 000 м³ в сутки, [Larin et al., 2014].

Табл. 4. Результаты полевых (ВГ-2) и лабораторных газохроматографических исследований (Май 2012 г.).

№ пробы	Координаты		ВГ-2	Лабораторный ГХ анализ				
	Е °	Н °	H ₂ ppm	H ₂ ppm	O ₂ %	N ₂ %	CH ₄ %	CO ₂ %
R35a-Va35	37,26768	56,06468	2000	1023	20,75	78,99	0,0009	0,15
R35b-Va38	37,26768	56,06468	1000	910	21,12	78,69	0,0012	0,10
R35c-Va40	37,26763	56,06401	3000	823	20,48	79,20	0,0012	0,24
R35d-Va42	37,26763	56,06401	3000	2676	20,69	78,89	0,0016	0,15
R35e-Va44	37,26781	56,06408	2000	1675	20,48	79,07	0,0013	0,29
R35f-Va46	37,26781	56,06408	8000	7498	20,50	78,63	0,0014	0,11
R35g-Va48	37,26806	56,06416	5500	4271	20,44	78,93	0,0020	0,20
R35h-Va50	37,26806	56,06416	2000	1636	20,21	79,37	0,0012	0,25

Участок у г. Яхрома в Дмитровском городском округе Московской обл.

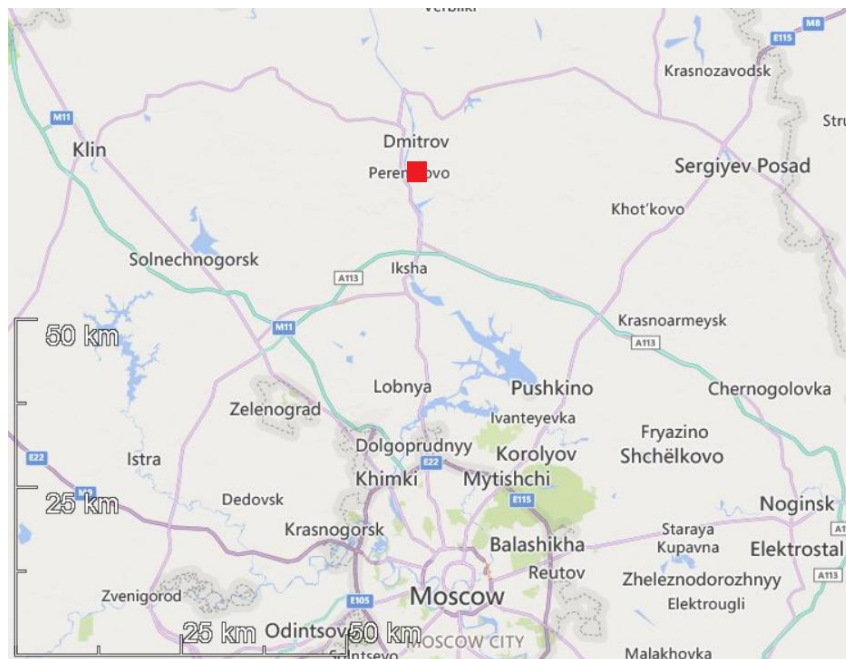


Рис. 29. Местоположение объекта. Участок показан вне масштаба.

Структура «Яхрома» расположена в Дмитровском районе Московской области (Рис. 29), её координаты N56,28861° E37,52577°. Объект изучения представляет собой небольшое понижение рельефа и имеет размеры около 50х60 м, на момент посещения центральная часть была заполнена водой, что делало возможным проведение водородометрии только на борту структуры (Табл. 5).

Табл. 5. Результаты водородометрии на структуре Яхрома. Координаты начала профиля N56,28885° E37,52554°.

№	Расстояние от начала профиля, м	Содержание водорода, ppm	№	Расстояние от начала профиля, м	Содержание водорода, ppm
1	0	154	7	16	110
2	2	516	8	20	191
3	4	570	9	24	25
4	6	601	10	28	5
5	8	260	11	32	0
6	12	537	12	42	35

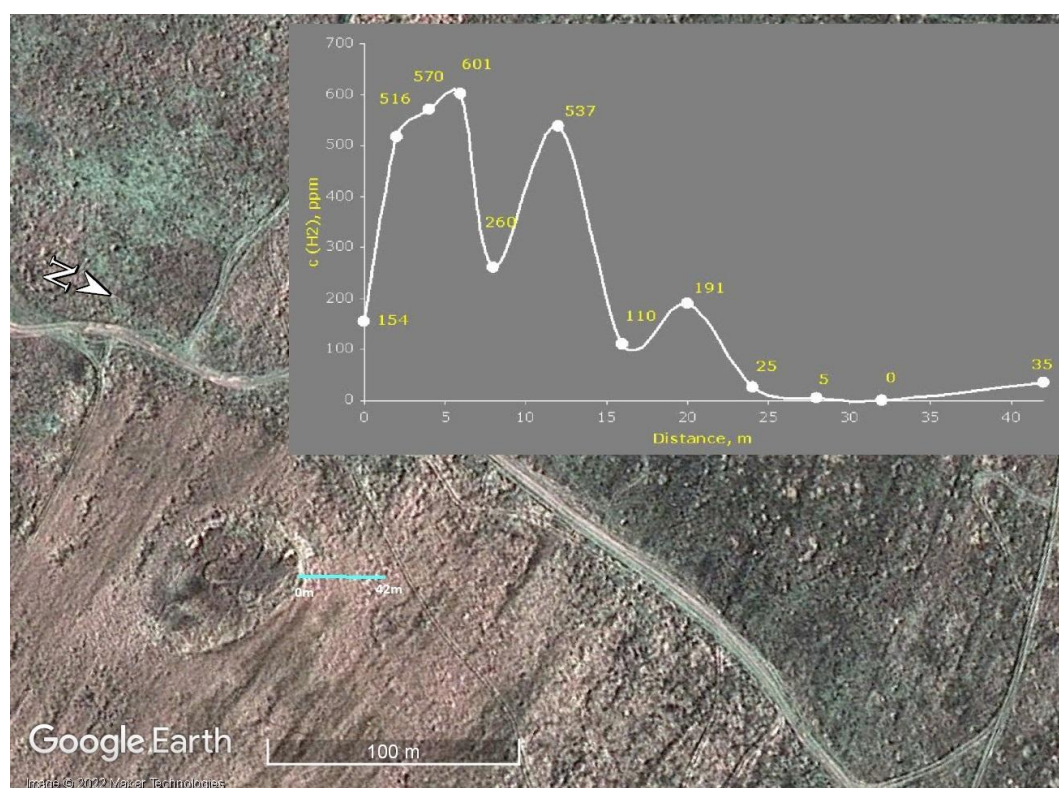


Рис. 30. Результаты полевой водородометрии на структуре «Яхрома» в Дмитровском районе Московской обл. Профиль показан голубой линией. Дата проведения измерений 23/05/2012.

График с измеренными концентрациями водорода и положение профиля показаны на рисунке (Рис. 30). Было выполнено 12 измерений вдоль профиля длиной 42 м, начиная от зоны обводнения на границе впадины и заканчивая участками, расположенными вне её. В 25 м от впадины концентрация водорода снизилась до почти нулевых значений. Наибольшие концентрации были зафиксированы на расстоянии 12 м от внешнего края депрессии. Для изготовления скважин применялись кувалда, штырь и домкрат, а для пробоотбора и анализа – циркуляционный насос, встроенный в Geotech GA2000 и газоанализаторы серии ВГ-2 (схема подключения приведена на Рис. 6).

- Параметрическая точка D-14

В 300 метрах севернее структуры Яхрома имеется точка с координатами N56,29191° E37,52638° (обозначена на карте как D14, см. Рис. 31), на которой периодически проводилась водородометрия. Для изготовления скважин применялись кувалда, штырь и домкрат, а для пробоотбора и анализа использовались варианты подключения, приведенные на Рис. 4 – Рис. 6.

На точке D-14 в 2008 г. были зафиксированы очень высокие концентрации водорода (1,25%), тогда как в 2012 г. было обнаружено только 28 ppm H₂ (Рис. 32) [Larin et al., 2014]. Подробнее о возможных причинах данного явления будет сказано ниже, в главе «Обсуждение...».

Табл. 6. Результаты измерений концентрации водорода на параметрической точке D-14.

Дата измерений	Концентрация водорода, %	Дата измерений	Концентрация водорода, %
2007-04-22	0,530	2010-11-15	0,082
2007-09-02	0,100	2011-08-27	0,018
2008-04-06	0,495	2012-05-23	0,0028
2008-04-20	1,250	2015-07-29	0,123
2008-09-23	1,180	2016-05-09	0,100

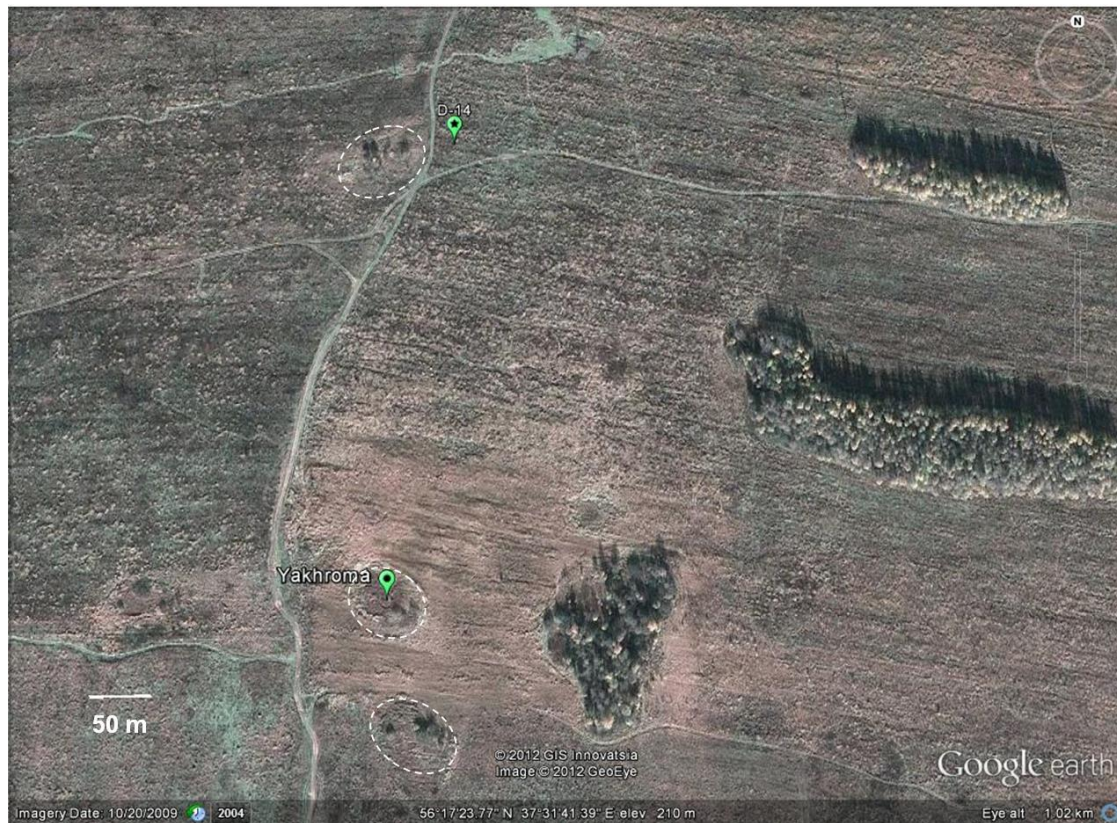


Рис. 31. Район проведения исследований западнее г. Яхромы. Пунктиром обозначены границы КСП, зелеными метками показаны изучаемая КСП (метка Yakhroma) и параметрическая точка D-14 (в северной части снимка).

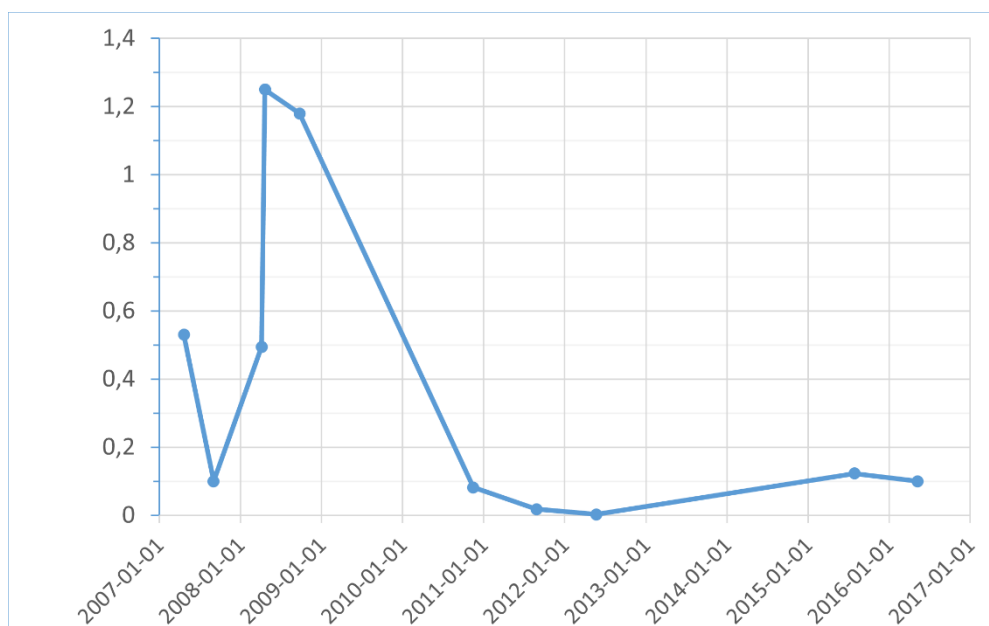


Рис. 32. Результаты 9-летних эпизодических измерений концентрации водорода на точке D-14.

Никулино

Структура Никулино (N56,22682° E37,70465°) расположена в 13 км к ЮВ от Яхромского участка и представляет собой заболоченный участок эллиптической формы с размерами 270×150м. Было изучено распределение водорода на СЗ борту этой структуры. Результаты замеров приведены на иллюстрации (см. Рис. 33). Максимальное значение концентрации водорода, обнаруженное в этой структуре, совпадало с границей впадины и составило 394 ppm.

Табл. 7. Результаты полевой водородометрии на структуре Никулино.

№	Расстояние от начала профиля, м	Содержание водорода, ppm
1	0	196
2	2	46
3	4	394
4	6	224
5	8	88
6	10	12
7	12	45

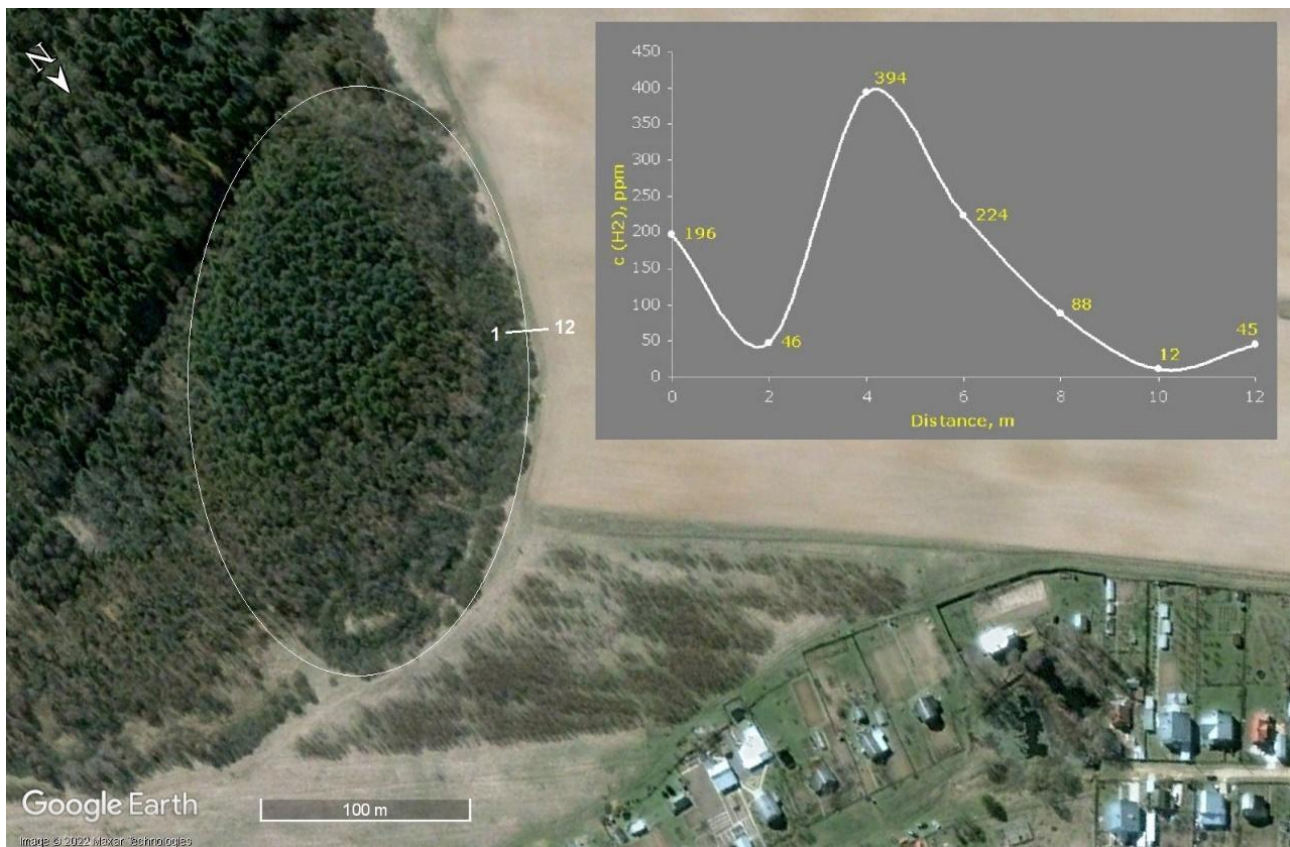


Рис. 33. Распределение водорода на внешней (СЗ) границе структуры Никулино Дмитровского р-на Московской обл. Дата измерений 23/05/2012.

Электросталь

Эта небольшая по размеру структура с координатами центра N55,77317° E38,50842° (Рис. 34) представляет особый интерес, поскольку она появилась недавно, судя по космическим снимкам, между 2002 и 2004 гг. (Рис. 35). Расположенная к востоку от города Электросталь, территория частично огорожена запретной для посетителей зоной, доступ к которой возможен только с юга. При посещении этого места в мае 2012 года можно было наблюдать, что центр структуры был залит водой, а её размеры составляли 230×190 м. В центре заболоченного участка видны стволы деревьев, упавших в период с 2002 по 2004 год. При изучении космических снимков и посещении этого места было обращено внимание, что вывал леса имеет не антропогенный характер и произошел недавно, по всей видимости в связи с появлением КСП (Рис. 35). Так как измерения внутри западины были невозможны из-за воды, то исследования были сосредоточены на бортах впадины. На границе

структуры были обнаружены относительно высокие концентрации H_2 (Рис. 35), при этом максимальное обнаруженное значение составило 130 ppm. Для изученной структуры, несмотря на относительно низкие концентрации H_2 , расчетный поток водорода составил около 30–50 м³ в сутки с площади 0,15 км² [Larin et al., 2014].

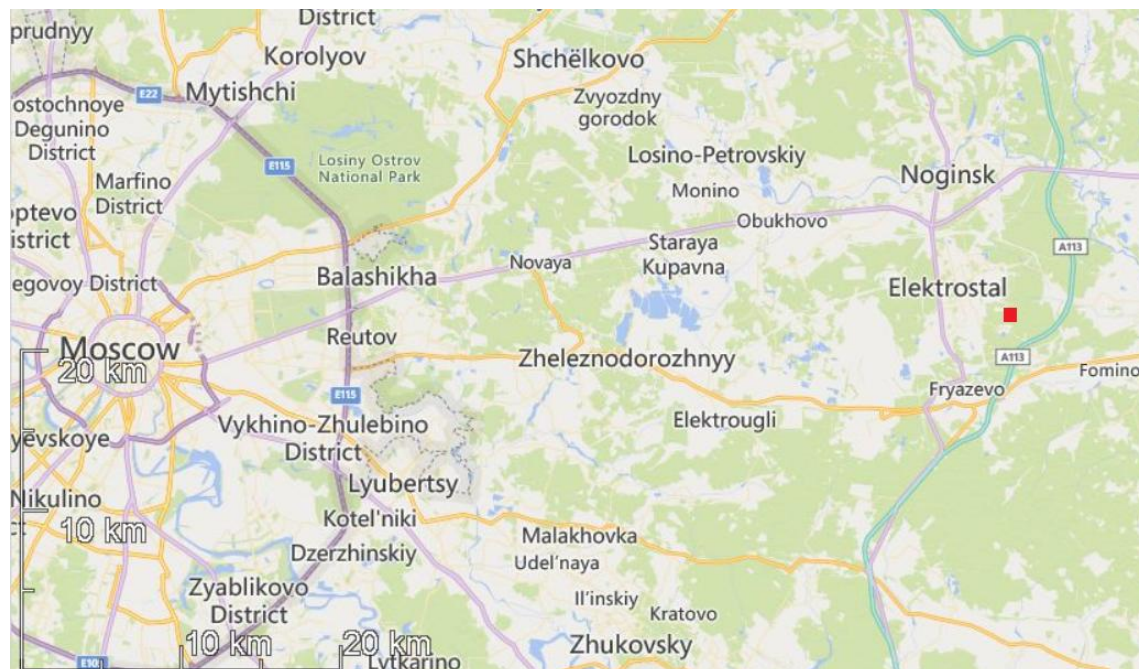


Рис. 34. Положение объекта (красный квадрат) на карте восточного Подмосковья.



Рис. 35. Структура Электросталь. Динамика развития по годам и результаты водородометрии проведённой в мае 2012 г. [Larin et al., 2014].

Табл. 8. Результаты водородометрии на структуре Электросталь по двум профилям ЗЮЗ и ВЮВ направления.

№	Расстояние от точки №1 в направлении ЗЮЗ, м	Содержание водорода, ppm
1	0	2
2	10	11
3	17	10
4	25	10
5	26	28
6	27	7
7	28	5
8	29	9
9	31	3
10	33	130
11	35	11
12	37	0
13	39	0
14	41	0
15	49	0
16	53	0

№	Расстояние точки №17 в направлении ВЮВ, м	Содержание водорода, ppm
17	0	13
18	2	6
19	4	17
20	6	40
21	8	11
22	10	18
23	12	8
24	14	10
25	16	0
26	18	24
27	20	2
28	22	9
29	24	0
30	26	25
31	28	12
32	30	13
33	32	22
34	34	28
35	36	16
36	38	5
37	40	27
38	42	29
39	44	31
40	54	6
41	64	12
42	74	3
43	84	20
44	94	5
45	104	6

3.4. Воронежская область.

Озеро Падовое

При изучении космических снимков было обращено внимание на крупные кольцевые структуры, уверенно дешифрируемые благодаря осветлению гумусного горизонта на периферии структур.

Одна из таких структур – озеро Падовое, которое расположено восточнее села Октябрьское Борисоглебского р-на Воронежской области (координаты её центра N51,21230° E42,01879°). Впадина представляет собой круглую чашу с плоским дном, размерами 2,4 × 2,7 км и глубиной до 6 метров. В центре этой депрессии находится круглое озеро и две другие округлые заболоченные внутренние впадины.

На структуре Падовое было сделано два профиля замеров подпочвенного газа. Профили размещались на сухих участках, максимально близко к центру депрессии. На первом профиле в августе 2009 года отрядом в составе: Ларин Н. В., Ларин В.Н., Кацура И. К., было произведено 45 измерений с шагом 100 м между точками (Рис. 37). Результаты приведены на Рис. 36.

В октябре 2010 года отрядом в составе: Ларин Н. В., Alain Prinzhofer, Eric Deville, Родина С. Н., сделаны ещё 15 измерений по второму профилю с шагом 100–400 м [Larin et al., 2014]. Результаты повторных измерений подтвердили полученные ранее данные о присутствии аномально высоких концентраций водорода в центральных частях структуры.

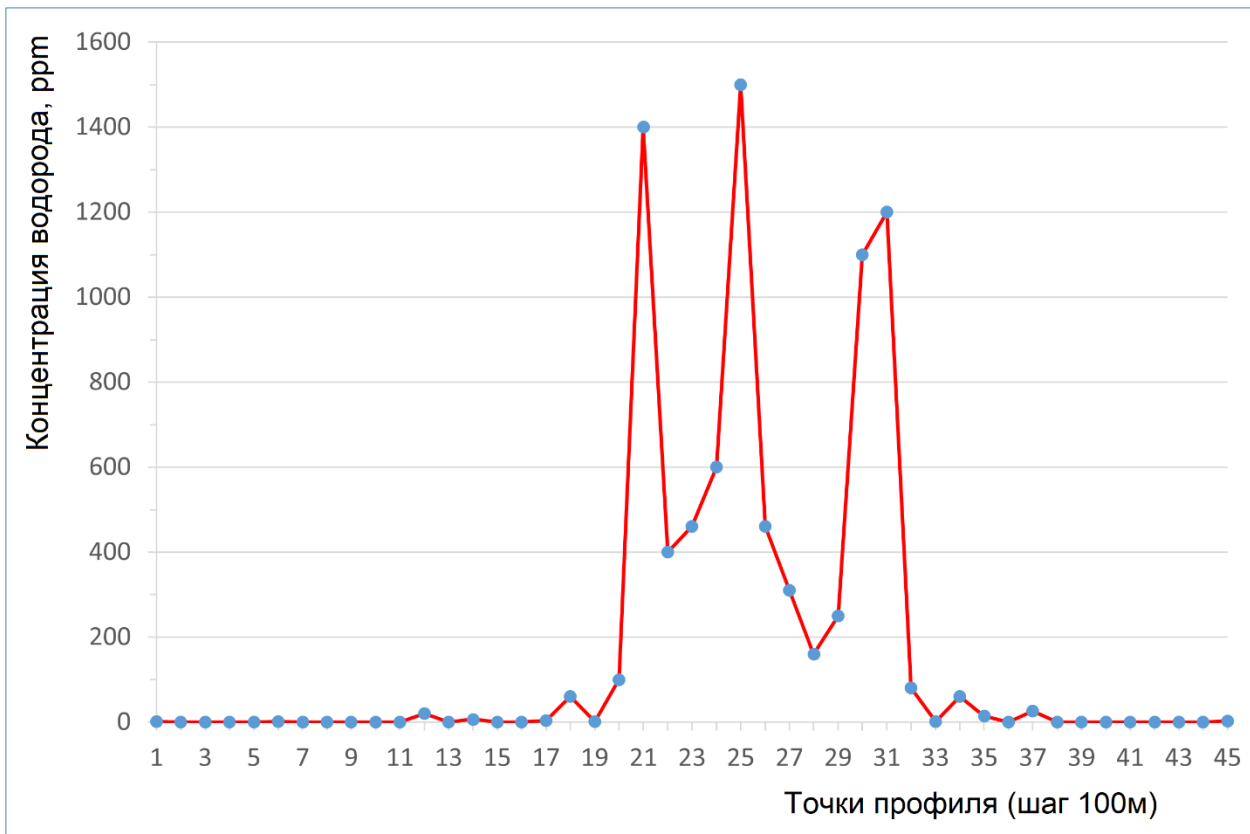


Рис. 36. Результаты полевой водородометрии на структуре Падовое (Авг. 2009)

Табл. 9. Результаты полевой водородометрии на структуре Падовое в августе 2009 года.

№ точ.	Расст. от начала проф., м	Содерж. H ₂ , ppm
1	0	1
2	100	0
3	200	0
4	300	0
5	400	0
6	500	1
7	600	0
8	700	0
9	800	0
10	900	0
11	1000	0
12	1100	20,5
13	1200	0
14	1300	6,5
15	1400	0

№ точ.	Расст. от начала проф., м	Содерж. H ₂ , ppm
16	1500	0
17	1600	4
18	1700	60
19	1800	1,5
20	1900	100
21	2000	1400
22	2100	400
23	2200	460
24	2300	600
25	2400	1500
26	2500	460
27	2600	310
28	2700	160
29	2800	250
30	2900	1100

№ точ.	Расст. от начала проф., м	Содерж. H ₂ , ppm
31	3000	1200
32	3100	80
33	3200	1
34	3300	60
35	3400	14
36	3500	0
37	3600	26
38	3700	0,5
39	3800	0
40	3900	0
41	4000	0
42	4100	0
43	4200	0
44	4300	0,1
45	4400	2



Рис. 37. Структура Падовое. Положение точек опробования. Координаты начала профиля: N51,21839° E42,98439°, конца: N51,19919° E42,03955°

Небольшая структура-спутник «Сателлит» к северу от оз. Падовое

Координаты центра N51,22969° E42,03606° имеет диаметр около 100 м и расположена к СВ от структуры Падовое (Рис. 38). Эта небольшая КСП была обнаружена случайно при срабатывании водородного течеискателя HY-ALERTA 500, который показал присутствие водорода в атмосфере. Чтобы удостовериться в реальности аномалии, на структуре был размечен профиль и проведена серия измерений, а также отобраны пробы газа, которые в дальнейшем были проанализированы в IFPEN (Табл. 10).

Надо заметить, что впервые в практике полевых работ удалось зафиксировать *залповый* выброс водорода из КСП.

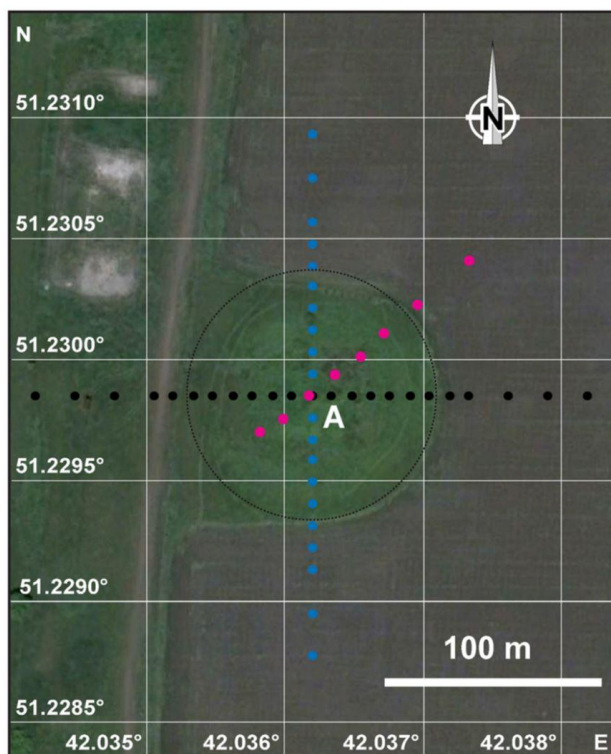


Рис. 38. Сателлит оз. Падовое с отмеченными точками, в которых проводились замеры.

Красные точки – 2010г, черные – 2011 (З-В) и голубые – 2011 (С-Ю). Иллюстрация из статьи [Larin et al., 2014].

Табл. 10. Полевые и лабораторные результаты анализа некоторых проб газа. Разница в содержании водорода обусловлена различием в методиках отбора и анализа проб. Высшие углеводороды не обнаружены. Данные взяты из статьи [Larin et al., 2014].

Номер пробы	Координаты		Полевые замеры	Результаты лабораторной газовой хроматографии				
	N	E		H ₂ , ppm	O ₂ %	N ₂ %	CH ₄ %	CO ₂ %
R2/1-Va3	51,22973°	42,03581°	2000	1084	20,72	79,07	0,0011	0,10
R2/2-Va7	51,22978°	42,03596°	50	10	20,99	78,93	0,001	0,07
R2/3-Va9	51,22986°	42,03615°	3000	1753	20,89	78,86	0,0013	0,07
R2/4-Va11	51,22993°	42,03631°	700	341	20,95	78,91	0,0008	0,11
R2/5-Va13	51,23000°	42,03648°	1000	705	20,77	78,96	0,0010	0,20

Водородометрия, проведенная в ходе последних полевых работ показала, что на момент проведения измерений, аномалия этого участка демонстрирует самые высокие из измеренных на Черноземье содержания водорода. В мае 2011 года были сделаны исследования, заключающиеся в проведении повторной водородометрии (Рис. 38).

Профили были проведены через центр депрессии. За пределами аномалии водородометрию прекращали при появлении устойчивой серии нулевых значений. Во внутренней части этой структуры дегазации было подтверждено наличие водорода, тогда как за её пределами водород полностью отсутствовал (Рис. 39). Средние концентрации, измеренные в почве внутри структуры, превышали 1100 ppm, а самая высокая обнаруженная концентрация в этой КСП составила 6500 ppm.

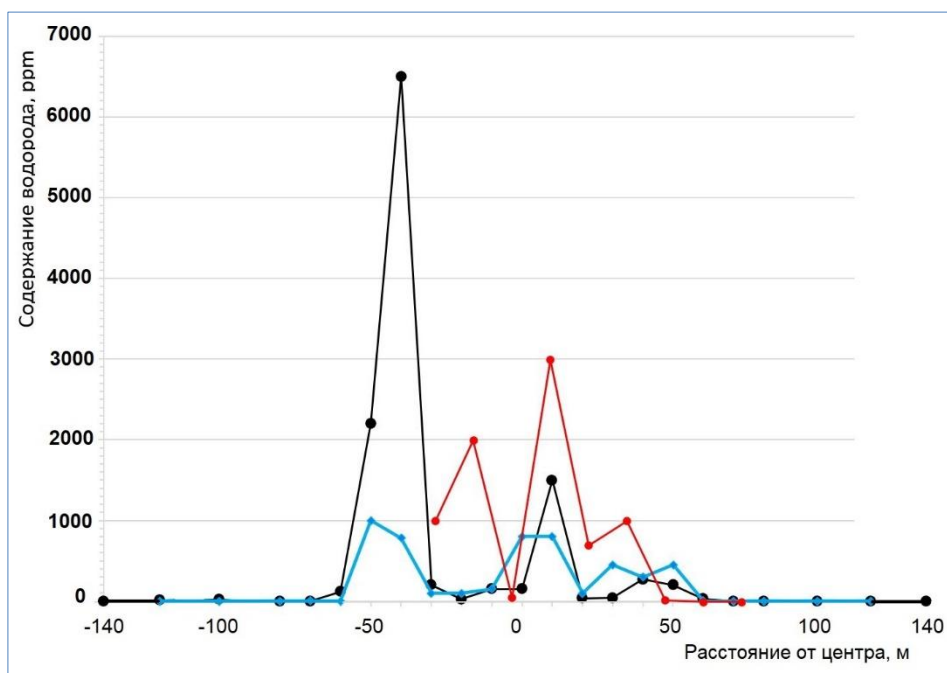


Рис. 39. Результаты водородометрии на участке «Сателлит». Красный график – замеры 2010 г., черный – 2011 г. (3-В) и голубой – 2011 г. (С-Ю).

Табл. 11. Результаты водородометрии на участке Сателлит в 2010 и 2011 годах.

Профиль ЮЗ-СВ (2010)			Профиль 3-В (2011)			Профиль С-Ю (2011)		
№	расстояние от центра	H ₂ , ppm	№	расстояние от центра	H ₂ , ppm	№	расстояние от центра	H ₂ , ppm
1	-35	1000	1	-140	0	1	-120	0
2	-30	2000	2	-120	12	2	-100	0,5
3	-15	50	3	-100	20	3	-80	1
4	5	3000	4	-80	0	4	-70	2
5	20	700	5	-70	0	5	-60	1
6	35	1000	6	-60	120	6	-50	1000
7	50	20	7	-50	2200	7	-40	780
8	70	0	8	-40	6500	8	-30	100
9	110	0	9	-30	200	9	-20	100
			10	-20	25	10	-10	150

			11	-10	150		11	0	800
			12	0	150		12	10	800
			13	10	1500		13	20	100
			14	20	35		14	30	450
			15	30	40		15	40	300
			16	40	270		16	50	450
			17	50	200		17	60	5
			18	60	30		18	70	0
			19	70	0		19	80	0
			20	80	0		20	100	0
			21	100	0		21	120	0
			22	120	0				
			23	140	0				

3.5. Байкал и Забайкалье.

Озеро Байкал занимает центральную часть в системе грабенов Байкальской рифтовой системы, протягивающуюся из Северо-Западной Монголии через нагорья Восточной Сибири в пределы Южной Якутии.

В Иркутской обл. в сентябре 2017 г. были проведены поиски природного водорода на двух участках вблизи оз. Байкал: один располагался на южном берегу, между поселками Выдрино и Мурино, второй – между пос. Култук и пос. Быстрая на западном окончании Байкала (Рис. 40).

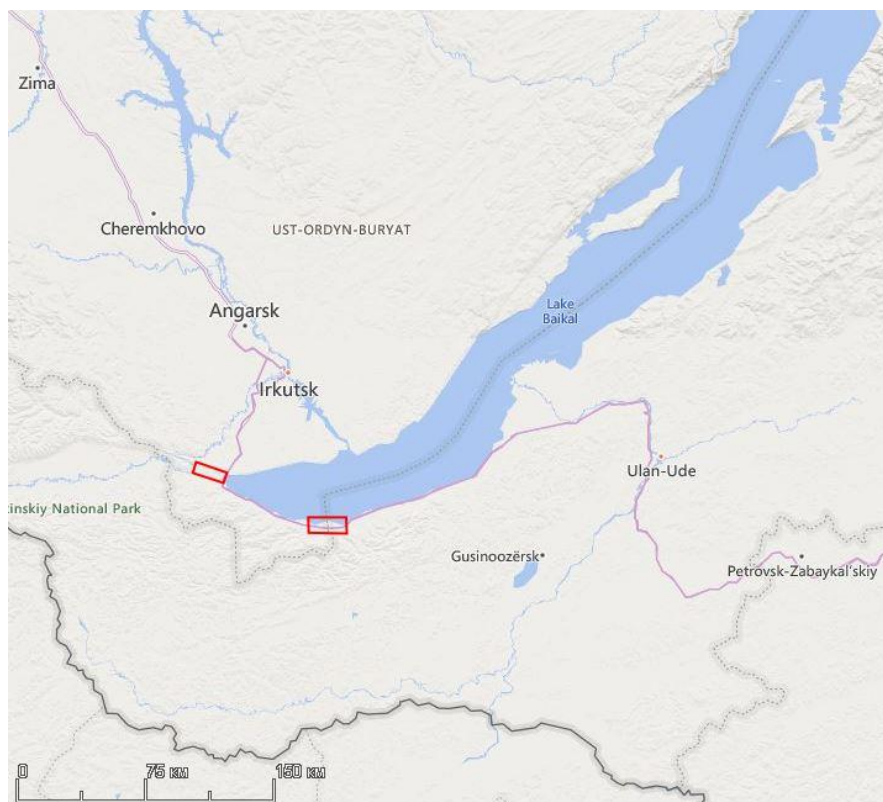


Рис. 40. Участки полевых работ в Иркутской обл.

Участок Выдрино – Мурино

В пределах рассматриваемой территории преобладают глубокометаморфизованные кристаллические породы Архея и Протерозоя, представленные разнообразными гнейсами, кристаллическими сланцами, мраморами и кальцифирами. Их прорывают архейские и протерозойские интрузии гранитоидов, габброидов и диоритов.

В отдельных участках на размытой поверхности пород кристаллического комплекса и прорывающих их интрузий залегают кайнозойские отложения, представленные глинами, песками, галечниками, валунниками.

• Структура 1.

Представляет собой болото грядово-мочажинного типа изометричной формы диаметром около 1 км. Координаты центра болота N51,45425° E104,56131°. Болото подстилается светло-серой глиной. В сухом виде глина имеет белый цвет, её состав не изучался.

Профиль 1. Длина 1600м. Шаг точек 100м. Количество точек 17. Профиль через заболоченный участок проходил по невысокой насыпи вдоль железной дороги. Результаты водородометрии приведены ниже (см. Рис. 41).

Профиль 1А от северного борта болота на север в сторону берега оз. Байкал. Длина 250м. Шаг точек 50м. Количество точек 6.

На всех профилях участка Выдрино-Мурино для отбора проб и проведения водородометрии применялся комплект кувалда-штырь-домкрат и газоанализаторы серии ВГ, включенные по схеме в соответствии с Рис. 5 (см. главу 2, «Методы ...»).

Профиль 1В проходил от южного борта болота на юг в сторону шоссе. Длина профиля составила 100м, шаг точек 20м, количество точек 6. На этих шести точках была применена новая для нас методика: «Литогазогеохимическое опробование приповерхностных отложений», заключающаяся в извлечении пробы с помощью шнекового бурения, консервации её под затворной жидкостью с последующей дегазацией и газовой хроматографией в лаборатории (ООО ПГК «Сибгеоком»). Результаты замеров приведены на графике (см. Рис. 42). Обращает на себя внимание существенная разница между результатами, полученными с помощью различных методик пробоотбора.

Перерыв между профилями 1А и 1В связан с высокой обводнённостью территории (непроходимое болото), в связи с чем оказалось невозможным проведение замеров или отбор проб по существующим методикам.

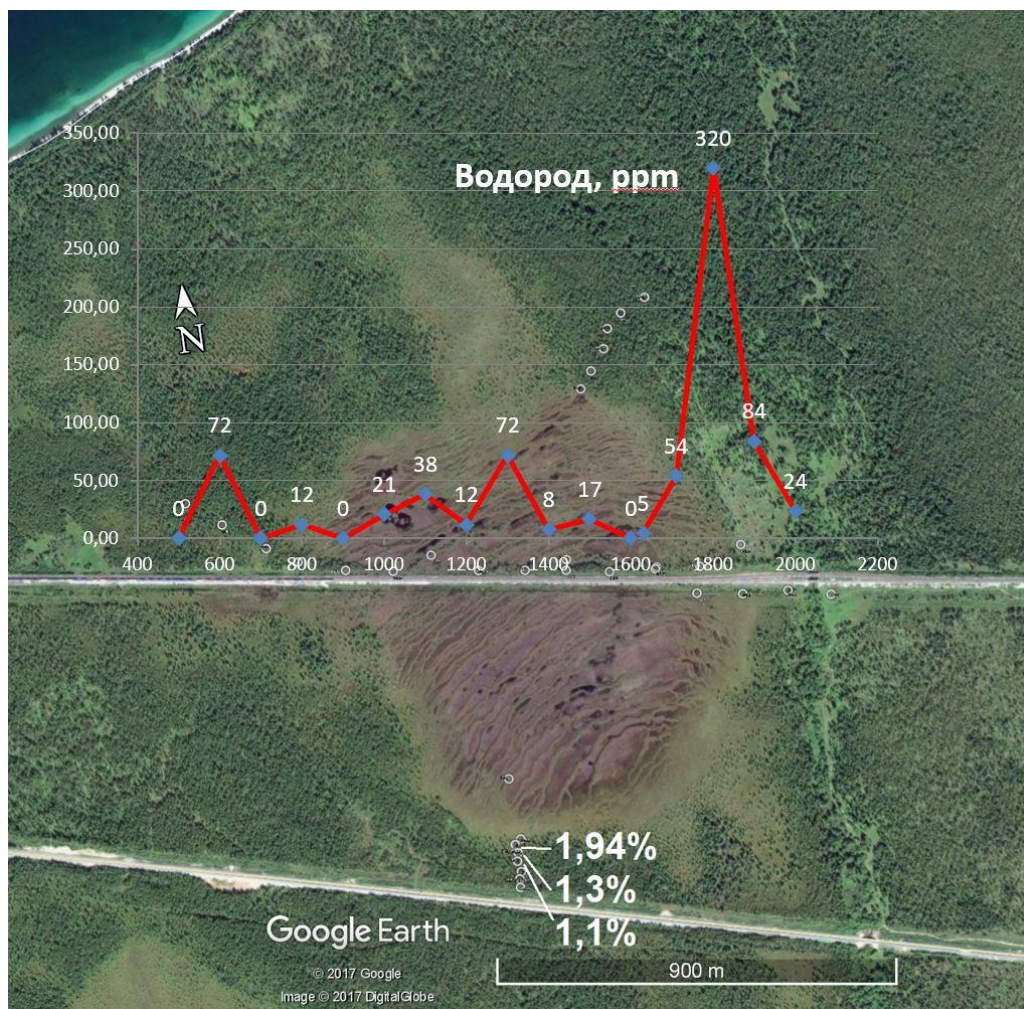


Рис. 41. Точки опробования по профилям 1, 1А, 1В и результаты водородометрии на профилях 1 и 1В.

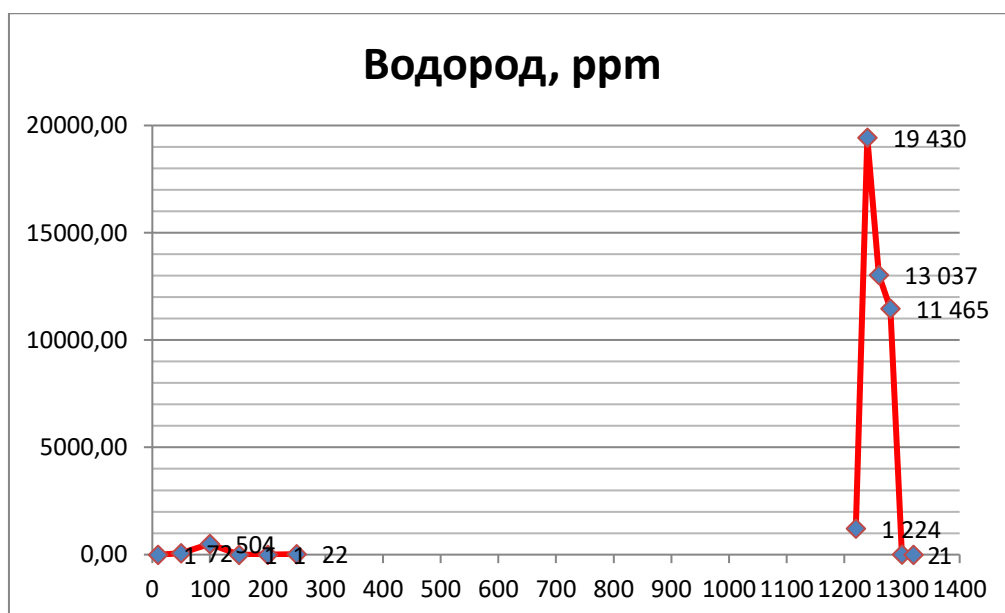


Рис. 42. Результаты водородометрии на профилях 1А (слева) и 1В (справа). По горизонтальной оси отложено расстояние в метрах.

- Структура 2



Рис. 43. Гарь, как поисковый признак на водород.

Объект расположен (координаты центра N51,44553° E104,60946°) западнее р. Снежная и на юге граничит с а/д «Байкал». Это место хорошо заметно с автодороги, поскольку представляет собой старую гарь, выделяющуюся на фоне окружающего пейзажа характерной особенностью – достаточно высокими (3–6 м) сухими берёзовыми стволами. Причём горело в этом месте как минимум два раза, и последний раз, судя по годовым кольцам молодых берёз, около 5 лет назад. Подобный ландшафт (со следами гари или без таковых) иногда встречается на структурах дегазации в европейской части России. Структура была выбрана в качестве объекта исследования не при камеральной подготовке к полю, а уже на месте – было принято решение проверить причины возникновения лесных пожаров. Через структуру было сделано 2 профиля в направлении С-Ю и З-В. Структура сухая, подстилается валунниками, что сильно осложнило поиски мест для отбора пробы и, как следствие, полевой водородометрии при применении штыря, кувалды и домкрата.

Профиль 2 (направление З-В). Длина 1500м. Шаг точек 100м. Количество точек 16. Результаты водородометрии приведены на рисунке ниже (Рис. 44).

Профиль 2А (направление Ю-С). Длина 130м. Шаг точек 100м. Количество точек 14. Результаты водородометрии приведены на графике (см Рис. 45).

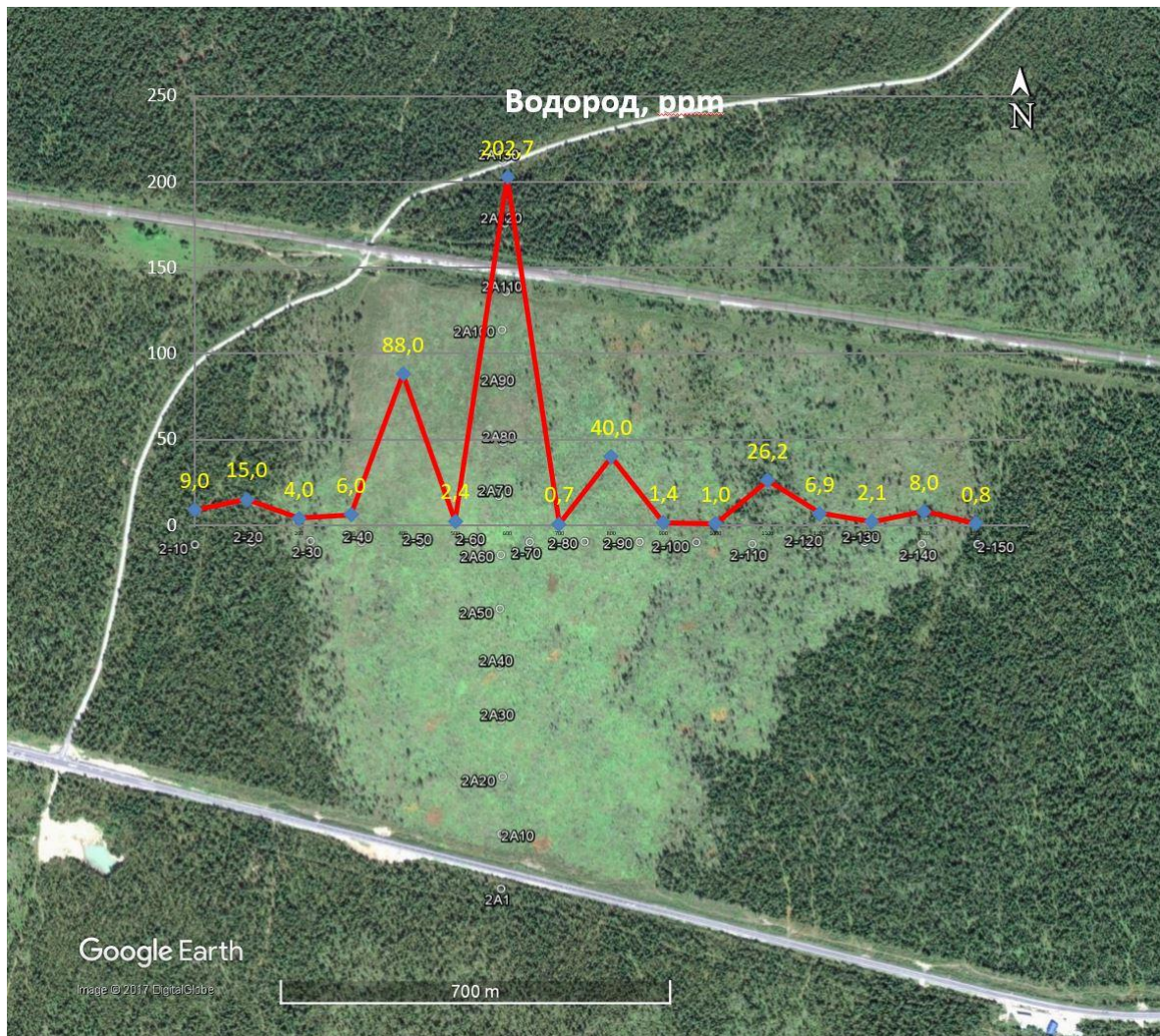


Рис. 44. Структура №2. Точки опробования по профилям 2 и 2А, график концентраций водорода на профиле 2.

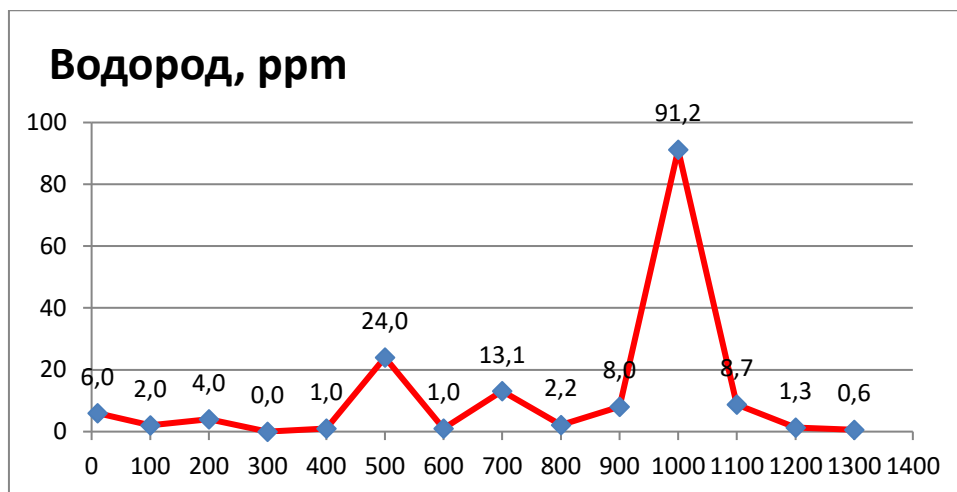


Рис. 45. Концентрации водорода вдоль профиля 2. По горизонтальной оси отложено расстояние в метрах.

Табл. 12. Результаты водородометрии на структурах 1 и 2.

структура, профиль	номер точки	расст., м	Водород, ppm	структура, профиль	номер точки	расст., м	Водород, ppm
1	1	500	0	2	1	0	9
	2	600	72		2	100	15
	3	700	0		3	200	4
	4	800	12		4	300	6
	5	900	0		5	400	88
	6	1000	21		6	500	2
	7	1100	38		7	600	203
	8	1200	12		8	700	1
	9	1300	72		9	800	40
	10	1400	8		10	900	1
	11	1500	17		11	1000	1
	12	1600	0		12	1100	26
	13	1630	5		13	1200	7
	14	1710	54		14	1300	2
	15	1800	320		15	1400	8
	16	1900	84		16	1500	1
	17	2000	24		1	10	6
1, A	1	10	1	2, A	2	100	2
	2	50	72		3	200	4
	3	100	504		4	300	0
	4	150	1		5	400	1
	5	200	1		6	500	24
	6	250	22		7	600	1
1, B	1	1220	1224		8	700	13
	2	1240	19430		9	800	2
	3	1260	13037		10	900	8

	4	1280	11465			11	1000	91
	5	1300	2			12	1100	9
	6	1320	1			13	1200	1
						14	1300	1

Таким образом, полевые наблюдения позволили предположить, что гарь является структурой дегазации водорода и, по-видимому, является причиной возникновения лесных пожаров, что и было подтверждено с помощью полевой водородометрии.

- Структура 3. оз. Тыклинское

Объект исследования представляет собой озеро с заболоченными берегами, расположенное западнее р. Снежная на берегу оз. Байкал.

Профиль 3А (направление С-Ю). Координаты центра профиля N51,47724° E104,61248°. Длина профиля 122м. Шаг точек от 4 до 40м. Количество точек 8. На юге профиль заканчивается у уреза воды озера. Продлить профиль на север не представляется возможным по причине преобладающих валунных отложений. Результаты водородометрии приведены на следующих иллюстрациях (Рис. 46 и Рис. 47).

Часть точек была сделана по стандартной методике и было зафиксировано максимальное значение содержания водорода 827 ppm. Кроме этого, на двух точках было применено литогазогеохимическое опробование приповерхностных отложений, с помощью которой были обнаружены высокие содержания (до 14,3%) водорода, что подтвердило предположение о природе выбранного объекта – оз. Тыклинское является структурой дегазации водорода.



Рис. 46. точки опробования на структуре 3 с указанием аномальных значений концентрации водорода

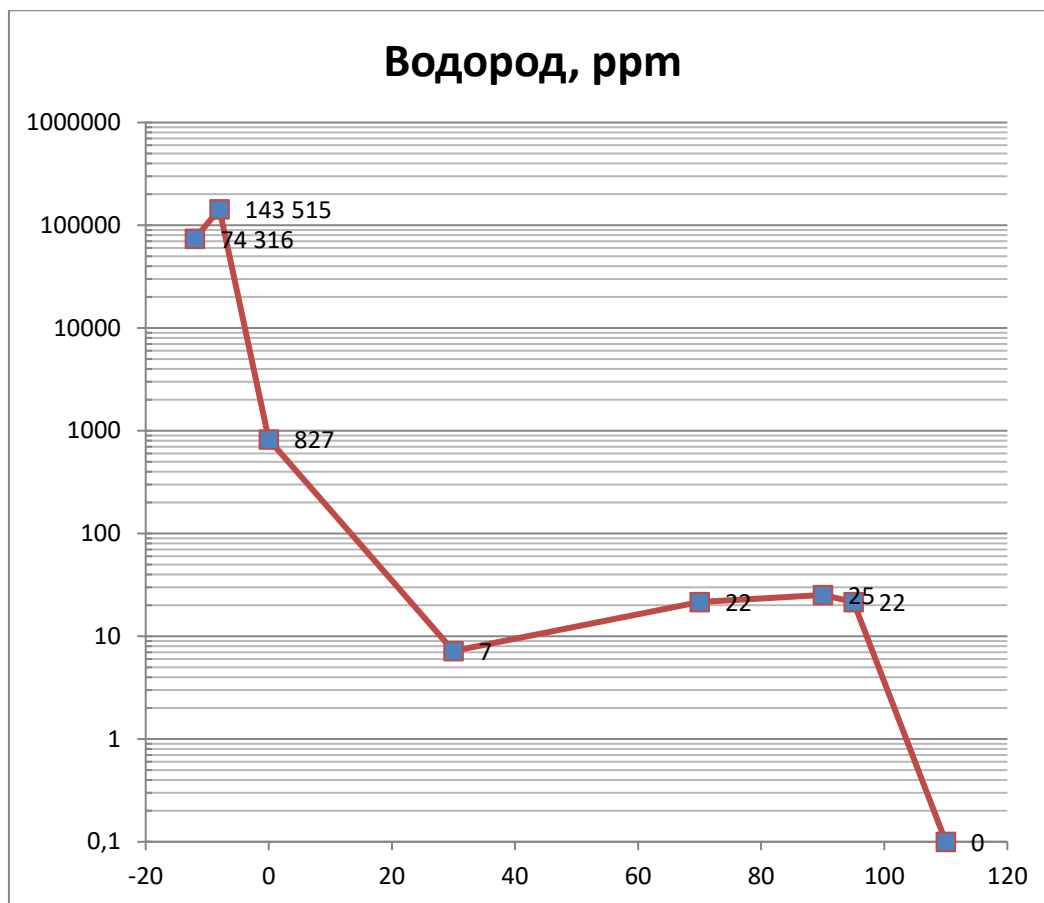


Рис. 47. Измеренные концентрации вдоль профиля 3А. По горизонтальной оси отложено расстояние в метрах.

- Структура 4.

Объект исследования - круглая поляна в кедровом лесу, заросшая молодыми берёзами, имеющими возраст 10–15 лет. Поляна расположена на ЮВ берегу оз. Тыклинского, координаты её центра N51,47374° E104,61651°.

Профиль 4А (направление СЗ-ЮВ). Длина профиля 70м. Шаг точек от 2 до 10м. Количество точек 11. Продлить профиль на СЗ не представилось возможным по причине высокой обводнённости грунта. Результаты водородометрии приведены на рисунке (Рис. 48).

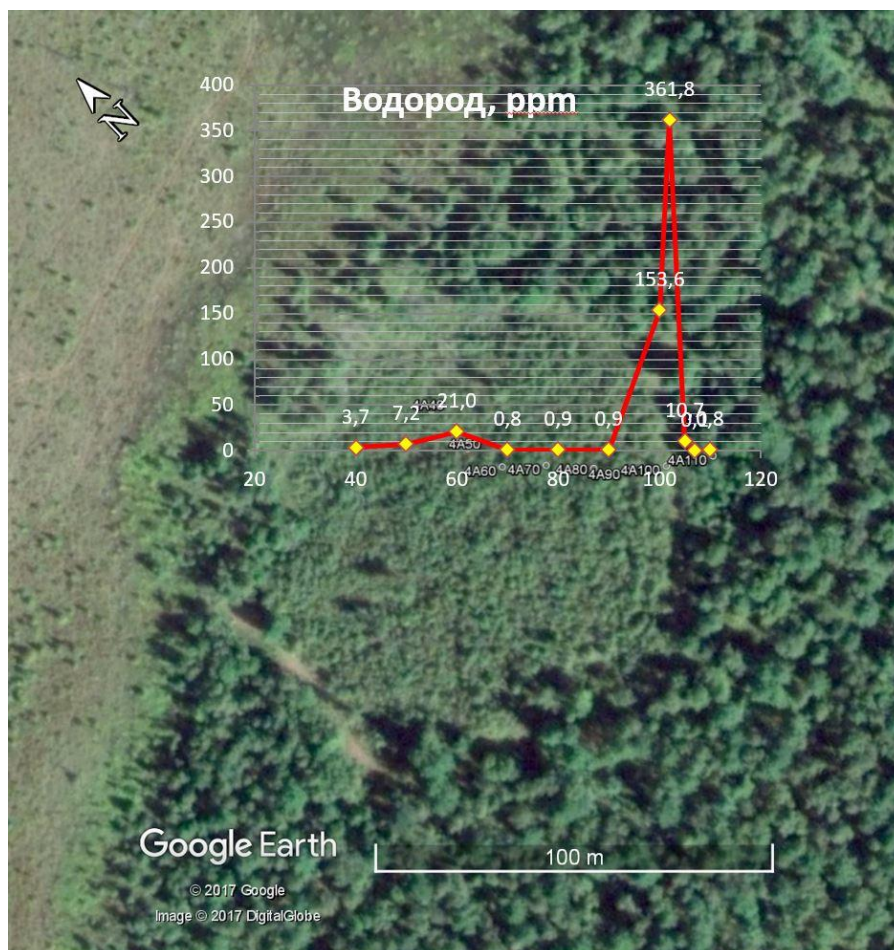


Рис. 48. Точки опробования на структуре №4 и график содержания водорода

Зафиксированы относительно высокие содержания (362ppm) водорода, приуроченные к ЮВ борту структуры. Таким образом, с помощью полевой водородометрии было подтверждено, что выбранный объект является структурой дегазации водорода.

- Структура 5.

Объект исследования представляет собой грядово-мочажинное болото изометричной формы диаметром около 500м (Рис. 49). Объект расположен между а/д «Байкал» и железной дорогой, западнее пос. Паньковка.

Профиль 5А (направление СЗ-ЮВ). Длина 99м. Шаг точек от 4 до 20м. Количество точек 7. Продлить профиль на СЗ не представилось возможным по причине высокой обводнённости грунта. Результаты водородометрии приведены на рисунке ниже.

С помощью полевой водородометрии было подтверждено, что выбранный объект является структурой дегазации водорода. Зафиксированы относительно высокие содержания ($2100 \text{ ppm} = 0,21\%$) водорода, приуроченные к краю структуры.

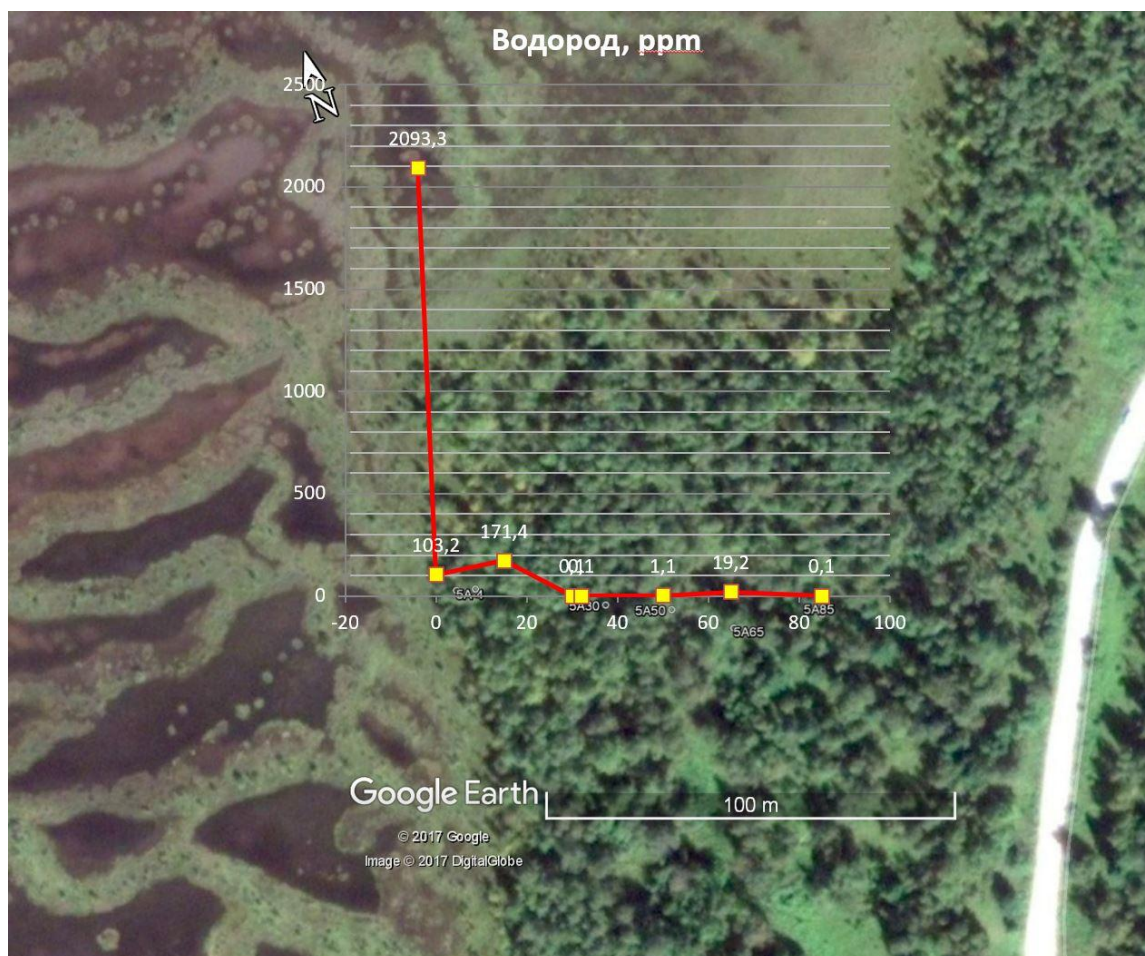


Рис. 49. Положение точек на профиле 5 и график содержания водорода. По горизонтальной оси отложено расстояние в метрах.

Участок Култук – Быстрая

В районе участка преобладают глубокометаморфизованные кристаллические породы Архея, представленные гнейсами, гнейсо-гранитами, амфиболитами, кристаллическими сланцами, мраморами и кальцифирами. Архейские породы прорываются гранитами, пегматитами, диабазами, габброидами, сиенитами и породами ультраосновного состава. В отдельных местах встречаются неогеновые дайки долеритов и покровы базальтов. В межгорных долинах залегают четвертичные пески, супеси, галечники и конгломераты, а также грубообломочные образования.

Поиски природного водорода на этом участке были приурочены к Главному Саянскому разлому, как основной и самой крупной разрывной структуре юго-западной ветви Байкальской рифтовой зоны. Разлом служит границей между блоковыми поднятиями Восточного Саяна и Шарыжалгайским выступом цоколя Сибирской платформы. Протяженность разлома достигает почти 1000 км; ширина разломной зоны колеблется от нескольких сотен метров до 7–8 км, а в западной части – до 50–60 км. Кинематический тип разлома – левый сбросо-сдвиг. Азимут падения большинства плоскостей сместителей – на юго-запад $205-210^\circ$, угол падения $65-88^\circ$.

Морфологическим выражением разлома на поверхности является V-образная долина.

Исходя из предположения, что разлом является проницаемым для водорода, было принято решение о его изучении газогеохимическими методами. Поперёк долины, вкrest простирания разлома, были заложены два профиля водородометрии – профили 7 и 8. Первый оказался осложнен труднопроходимыми участками, на втором (профиль 8) удалось форсировать реку, что позволило сделать полный профиль через долину. Длина профиля составила 620 м. Шаг точек от 20 до 60 м. Количество точек 14. Координаты центра профиля $N51,73994^\circ E103,61557^\circ$.

На всех профилях участка Култук-Быстрая для отбора проб и проведения водородометрии применялся комплект кувалда-штырь-домкрат и газоанализаторы серии ВГ, включенные по схеме в соответствии с Рис. 5 (см. главу 2, «Методы ...»).

Результаты водородометрии и положение точек опробования приведены на рисунках ниже. Обращает на себя внимание тот факт, что максимум водорода приурочен к висячему (ЮЗ) боку разлома (см. Рис. 50). Соображения автора по поводу такой локализации потока будут изложены в главе «Обсуждение результатов».

Измерения показали, что эта структура образована выходом водорода на поверхность. Зафиксированы повышенные содержания (до 436 ppm) водорода.

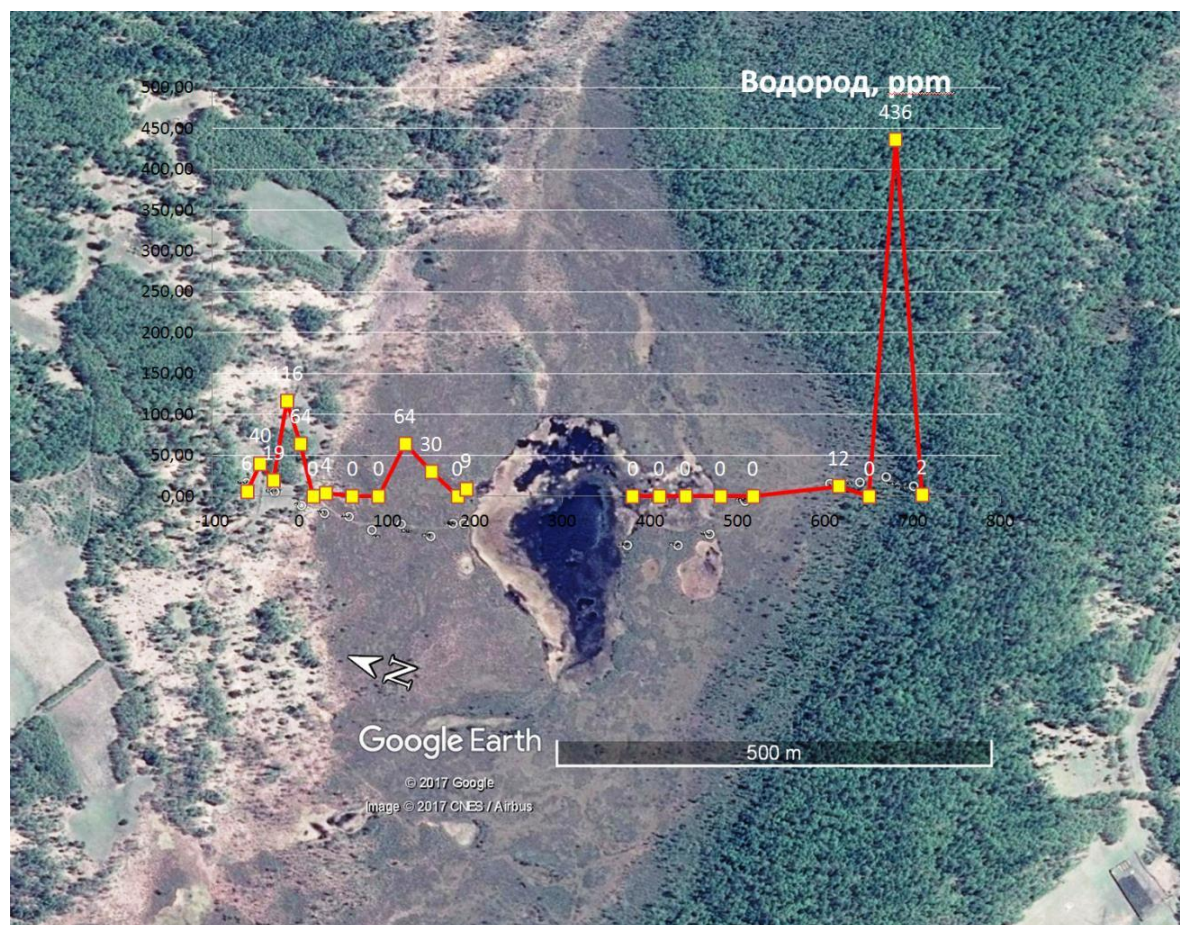


Рис. 51. Результаты водородометрии через озеро у пос. Быстрая. Точки замеров обозначены белыми кружками.

Табл. 13. Результаты водородометрии на структурах 3, 4, 5 и 9.

структура, профиль	номер точки	расст., м	Водород, ppm	структура, профиль	номер точки	расст., м	Водород, ppm
3, А	1	-12	74316	9, В	1	-60	6
	2	-8	143515		2	-45	40
	3	0	827		3	-30	19
	4	30	7		4	-15	116
	5	70	22		5	1	64
	6	90	25		6	15	0
	7	95	22		7	30	4
	8	110	0		8	60	0
4, А	1	40	4		9	90	0
	2	50	7		10	120	64
	3	60	21		11	150	30
	4	70	1		12	180	0

	5	80	1		13	190	9
	6	90	1		14	380	0
	7	100	154		15	410	0
	8	102	362		16	440	0
	9	105	11		17	480	0
	10	107	0		18	517	0
	11	110	1		19	615	12
5, А	1	-4	2093		20	650	0
	2	0	103		21	680	436
	3	15	171		22	710	2
	4	30	0				
	5	50	1				
	6	65	19				
	7	85	0				

3.6. Бурятия.

Еравнинская впадина

Еравнинская впадина является одной из мезо-кайнозойских впадин Витимского плоскогорья, образующих преимущественно параллельные друг другу полосы, вытянутые в северо-восточном направлении. Общее простираие поясов и отдельных впадин подчиняется северо-восточному направлению и унаследовано от древних глубинных разломов (Косыгин, Ю.А., 1962). Еравнинская впадина протягивается от оз. Бол. Еравное до р. Витим и имеет длину около 120 км и ширину от 10 до 30 км. Впадина представляет собой сложнопостроенную грабен-синклиналь, в пределах которой по геофизическим данным выделяются котловины, ограниченные разнонаправленными разломами и разделенные поднятыми блоками.

Наибольшая мощность осадочного чехла до кристаллического фундамента достигает 3350 м. Фундамент представлен глубокометаморфизованными породами Архея и Протерозоя (на поверхность не выходят и представлены в виде разнообразных ксенолитов в гранитоидах) рифейскими сланцами и метапесчаниками, а также венд-кембрийскими эффузивами среднего и кислого состава, сланцами и яшмоидами. Также в разрезе присутствуют красноцветные песчаники, конгломераты, кремнистые сланцы

и известняки позднекембрийского-раннеордовикского возраста. Кроме того, разрез фундамента осложнен раннепалеозойскими интрузиями габбро-норитового комплекса, а также гранитами и сиенитами среднего-позднего карбона.

Во впадине залегают раннетриасовые, преимущественно кислые, вулканогенные образования, в бортовых частях – средне-позднеюрские разнообразные вулканогенно-осадочные породы пёстрого состава, а котловины выполнены меловыми осадками, представленными обломочными и вулканогенно-обломочными породами (Фишев Н. А., Шелгачев К. М., Игнатович В. И., 2011).

Предварительное изучение космоснимков позволило предположить, что изометричные в плане Еравнинские озёра (Рис. 53) могут быть кольцевыми структурами проседания. В начале сентября 2017 года полевым отрядом в составе Ларин Н. В., Черкасов А. В., Ботоев К. П. были проведены рекогносцировочные полевые исследования, которые, с целью проверки предположений автора, включали в себя геологические маршруты и водородометрию.

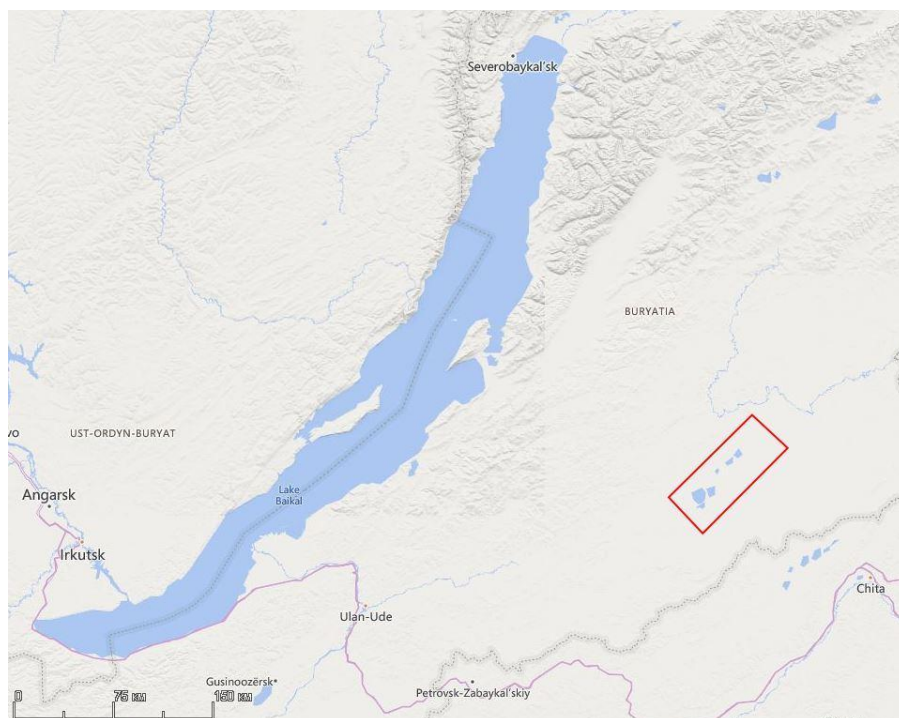


Рис. 52. Полигон работ в районе Еравнинских озёр.



Рис. 53. Еравнинские озёра. Положение объектов исследования и их номера на космическом снимке.

Результаты полевой водородометрии

- Объект №10. Озеро Эксенд

Представляет собой изометричное высохшее озеро размером 1400х1600м с песчаными берегами. Донные отложения подстилаются серой глиной. В сухом виде глина имеет белый цвет, её состав не изучался. Предположительно, она имеет

каолиновый состав. Длина профиля составила 1800м. Шаг точек от 50 до 100м. Количество точек 22. Координаты центра профиля N52,83462° E111,70257°. Положение точек опробования и результаты полевой водородометрии приведены на рисунках ниже.

На всех объектах Еравнинского участка для отбора проб и проведения водородометрии применялся комплект кувалда-штырь-домкрат и газоанализаторы серии ВГ, включенные по схеме в соответствии с Рис. 5 (см. главу 2, «Методы ...»).



Рис. 54. Положение точек опробования на оз. Эксенд

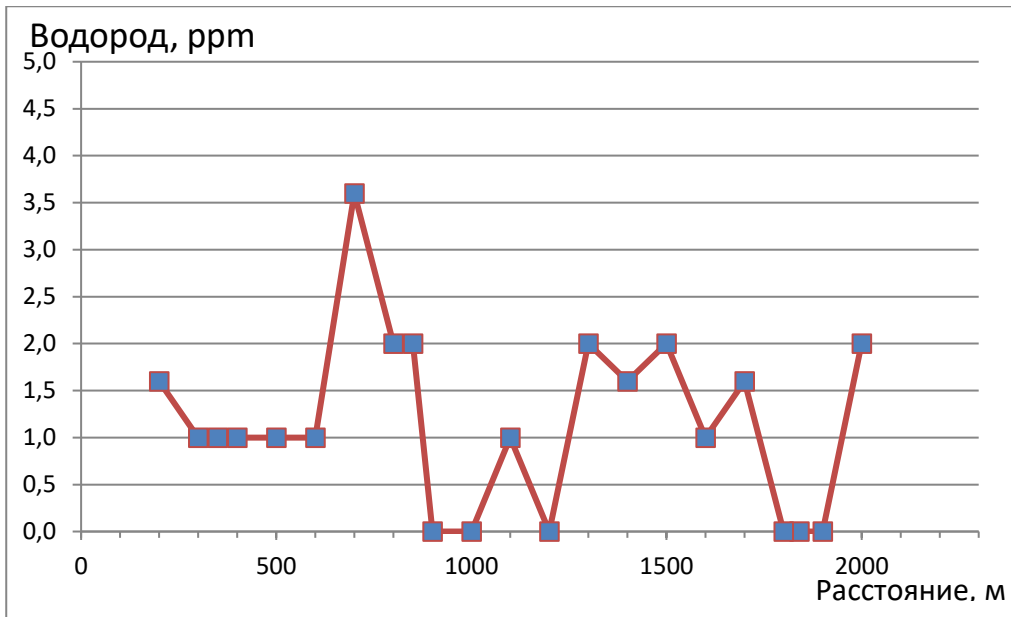


Рис. 55. Результаты полевой водородометрии на профиле 10 (оз. Эксенд)

Надо заметить, значения содержания водорода не очень высокие (Табл. 14, Рис. 55). Атмосферный фон максимально превышен в 7 раз, что очень незначительно, но это вполне ожидаемый результат. Предыдущие исследования показали, что если есть трещины усыхания (см. Рис. 56), то зафиксировать значимые концентрации водорода обычно не удаётся, в силу того что водород свободно улетучивается из почвы.



Рис. 56. Трещины усыхания на дне оз. Эксенд. Открытая глубина трещин более 1м.

- Объект №11. Озеро Гунда

Объект представляет собой овальное озеро размером 4800×3300м с песчаными берегами. Озеро заполнено водой. Т.к. существующая методика не позволяет осуществлять пробоотбор в воде, то водородометрия была проведена на берегу, начиная от уреза воды и до фиксации нулевых (фоновых) значений водорода.

Длина профиля составила 70м. Шаг точек от 30 до 40м, количество точек 3. Координаты точки у уреза воды N52,81284° E111,72914°.

Положение точек опробования и результаты полевой водородометрии приведены ниже (см. Рис. 57, 58, Табл. 14).

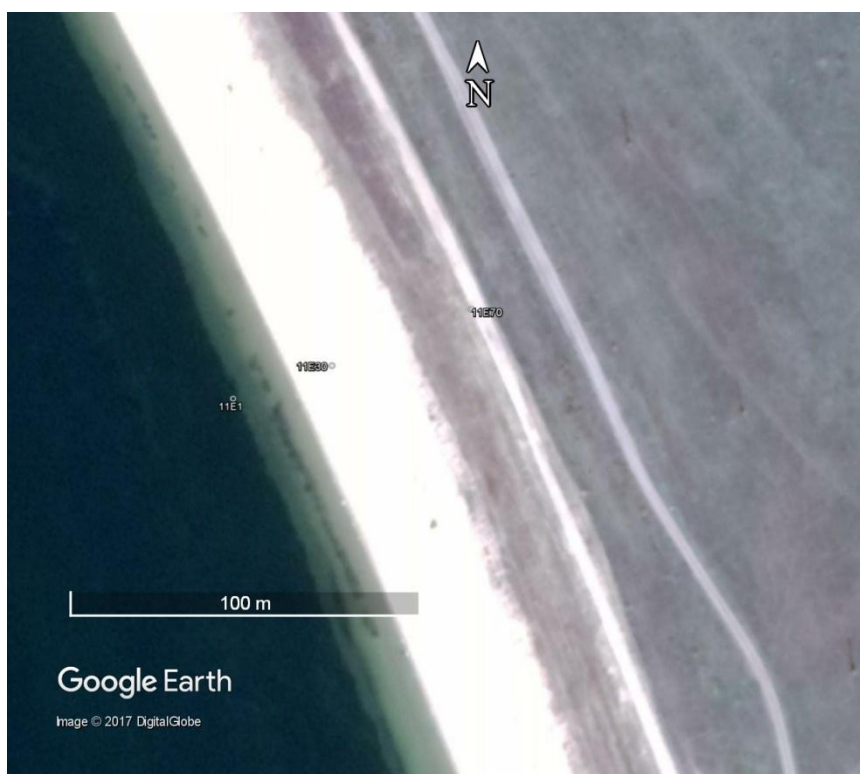


Рис. 57. Положение точек опробования на профиле 11

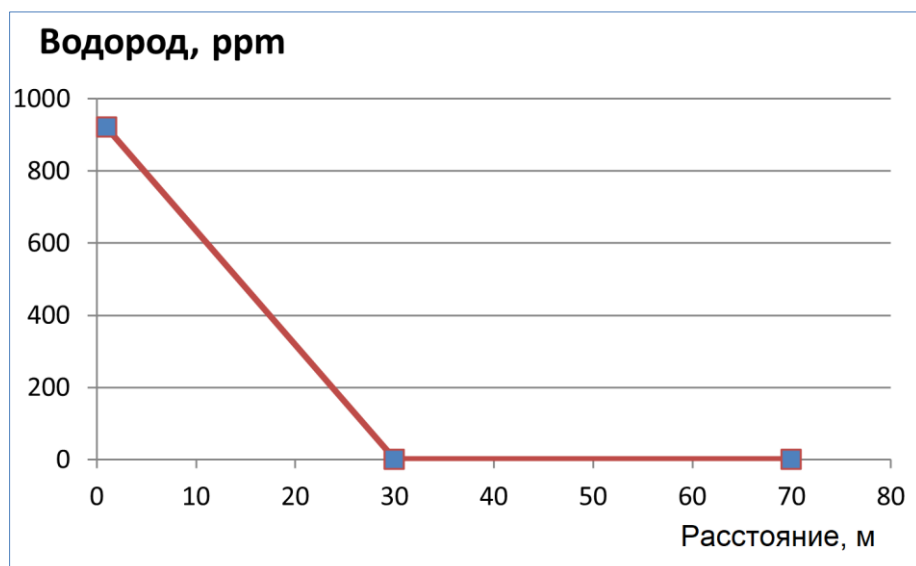


Рис. 58. Результаты полевой водородометрии на профиле 11

- Объект №12. Озеро Сосновое

Объект изучения представляет собой овальное озеро размером 6×4 км с песчаными берегами. Озеро заполнено водой. Как и на профиле №11, водородометрия была проведена на берегу, начиная от уреза воды и до фиксации нулевых (фоновых) значений водорода.

Длина профиля составила 68м., шаг точек от 10 до 33м., количество точек 5. Координаты точки у уреза воды N52,57726° E111,56492°.

Положение точек опробования и результаты полевой водородометрии приведены ниже (см. Рис. 59 и Рис. 60, Табл. 14).



Рис. 59. Профиль №12 на берегу оз. Сосновое

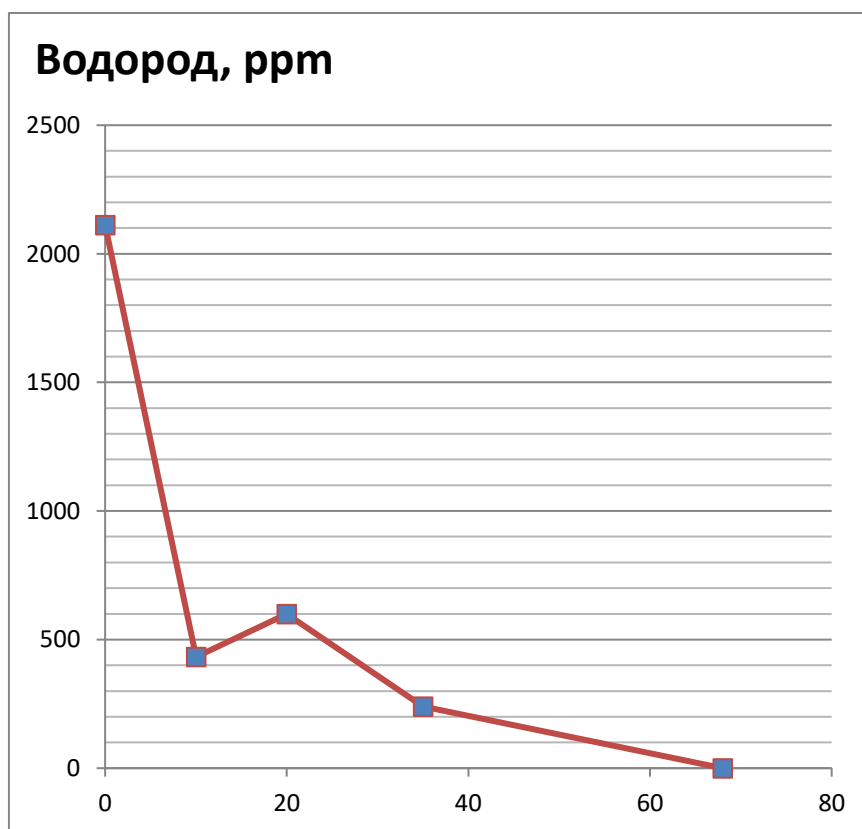


Рис. 60. Результаты полевой водородометрии на берегу оз. Сосновое (профиль 12). По горизонтальной оси отложено расстояние в метрах.

Как видим, зафиксированы достаточно высокие значения концентрации водорода (до 0,22 об. %).

- Объект №13. Озеро Хорхойта

Объект представляет собой овальное высыхающее озеро размером 1400×1100 м с песчаными берегами. Водородометрия была проведена на сухом участке дна и на берегу, начиная от уреза воды и до фиксации нулевых (фоновых) значений водорода. Длина профиля составила 287м, шаг точек от 19 до 47м, количество точек 12. Координаты точки у уреза воды N52,54050° E111,61429°.

Положение точек опробования и результаты полевой водородометрии приведены на рисунках ниже (см. Рис. 61 и Рис. 62, Табл. 14).



Рис. 61. Космический снимок озера Хорхойта с наложенным графиком содержаний водорода.

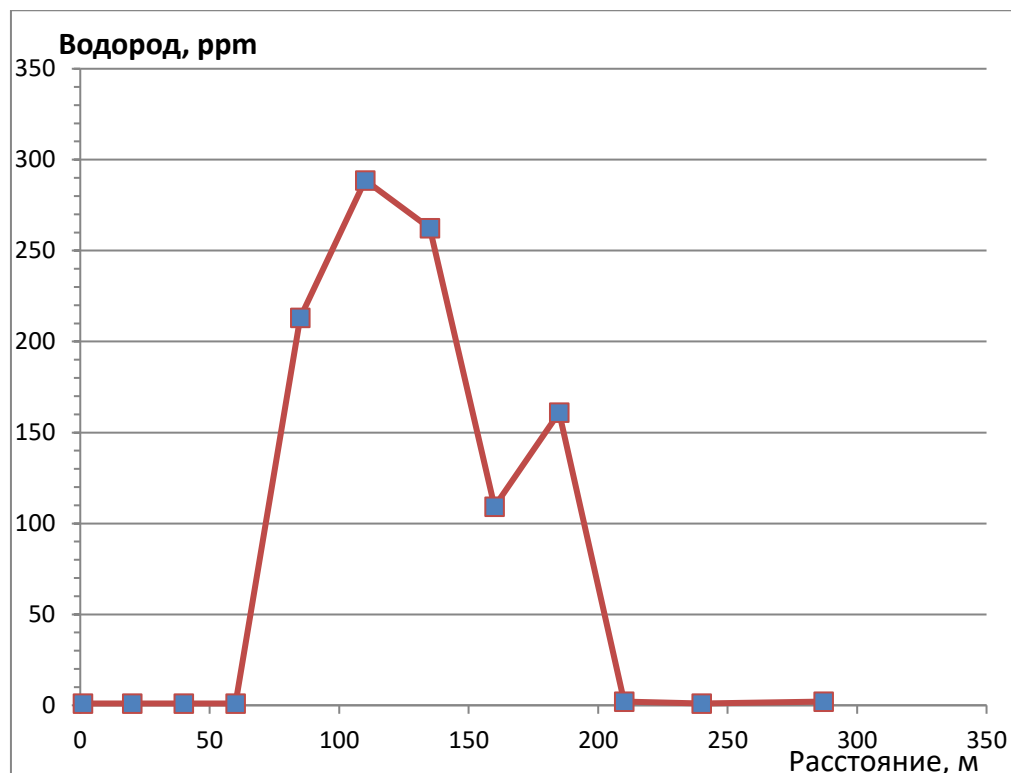


Рис. 62. Содержание водорода вдоль профиля №13

- Объект №14. Озеро Соболхо (Собалка)

Объект представляет собой овальное озеро размером (по впадине) 200×250м с песчаными берегами. В момент проведения замеров водой была заполнена только центральная часть впадины примерно 100 м в поперечнике. Водородометрия была проведена на берегу, около уреза воды.

Количество точек 1. Положение точки опробования (N52,55355° E111,72751°) приведено на рисунке (Рис. 63). Зафиксировано повышенное содержание (368 ppm) водорода (Табл. 14).



Рис. 63. Точка замера на берегу оз. Соболхо

- Объект №14. Озеро Большое Еравное

Объект представляет собой овальное озеро размером 10,5×12,5 км с песчаными берегами. Водородометрия была проведена на северном берегу, около уреза воды в месте впадения реки Тулдун.

Количество точек 4. Профиль не закладывали, т. к. все точки расположены компактно. Расстояние между крайними точками не превышает 25м. Координаты группы точек N52,66928° E111,54485°. Были получены следующие результаты: 1097ppm, 10204ppm (1,02%), 544ppm, 1962ppm (Табл. 14).

Зафиксировано рекордное, за время измерений, содержание (1,02 об. %) водорода (Табл. 14).

Положение точек опробования приведено на рисунке (Рис. 64).

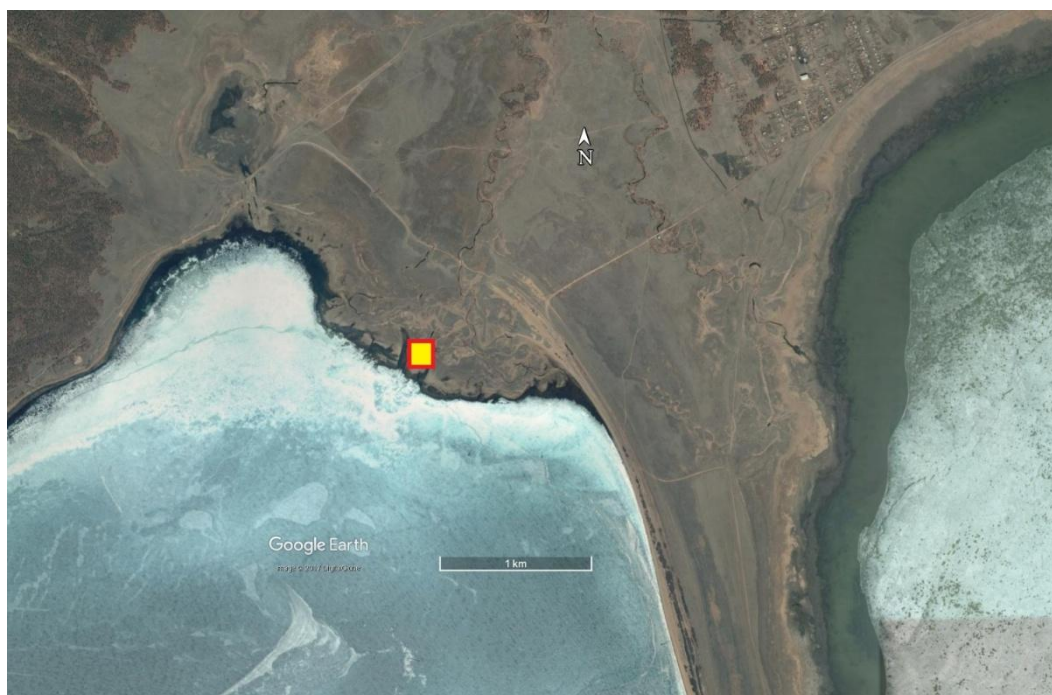


Рис. 64. Положение точек опробования на берегу оз. Большое Еравное

Из изложенного выше можно сделать предварительные выводы: цели поездки были достигнуты, Еравнинские озёра являются структурами дегазации водорода, и они оказались перспективными для дальнейших масштабных исследований.

Табл. 14. Результаты полевой водородометрии в районе Еравнинских озёр. 10 - оз. Эксенд (высохшее), 11 - оз. Гунда, 12 - оз. Сосновое, 13 - оз. Хорхойта, 14 – оз. Соболю, 15 – оз. Большое Еравное.

структура	номер точки	расст., м	Водород, ppm	структура	номер точки	расст., м	Водород, ppm
10	1	200	1,6	12	1	0	2112
	2	300	1		2	10	432
	3	350	1		3	20	600
	4	400	1		4	35	240
	5	500	1		5	68	0
	6	600	1	13	1	1	1
	7	700	3,6		2	20	1
	8	800	2		3	40	1
	9	850	2		4	60	1
	10	900	0		5	85	213

	11	1000	0			6	110	289
	12	1100	1			7	135	262
	13	1200	0			8	160	109
	14	1300	2			9	185	161
	15	1400	1,6			10	210	2
	16	1500	2			11	240	1
	17	1600	1			12	287	2
	18	1700	1,6		14	1	0	368
	19	1800	0		15	1	0	1097
	20	1840	0			2	5	10204
	21	1900	0			3	15	544
	22	2000	2			4	25	1962
11	1	0	920					
	2	30	0					
	3	70	0					

3.7. Читинская область.

В августе 2010 года автор посетил Краснокаменское урановое месторождение, к ЮЗ от которого расположены Умыкейские озёра, находящиеся в дугообразной разломной долине длиной 125 км и простиранием от СВ – ЮЗ до ЗСЗ – ВЮВ. Субстрат, на котором заложились озёра, сложен разнообразными породами: рифейскими, представленными интрузивными гранитами, гранит-порфирами и осадочными карбонатными и терригенными породами; юрскими лавами и туфами кислого и среднего состава, трахибазальтами и трахиандезитами с прослоями песчаников и конгломератов; четвертичными аллювиально – пролювиальными терригенными породами [Павлова et al., 2001].

Изучение картографического материала показало, что с 1950-х годов площадь четырех озёр – Кука-Азырга, Умыкий, Цаган-Тором и ещё одного, безымянного, увеличилась настолько, что они слились в одно озеро (Рис. 65). В 2013 году для предотвращения затопления г. Краснокаменска и близлежащих населенных пунктов между системой Умыкейских озёр и озером Хара-Нур был построен канал длиной 2,8 км.

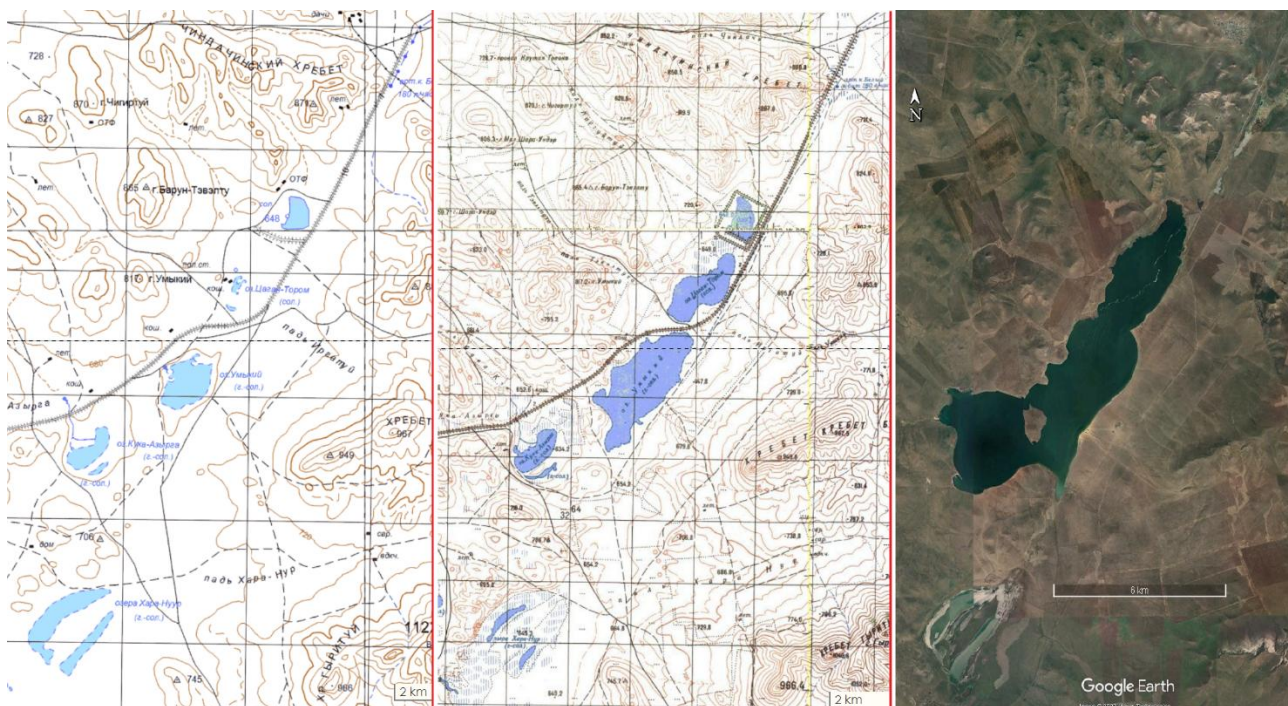


Рис. 65. Превращение группы озёр в одно. Карта слева отражает состояние ландшафтов в 1950-х (слева), в 1980-х (в центре) и справа - фрагмент космического снимка, отражающий современную обстановку.

Обращает на себя внимание, что ЮВ берег озера имеет необычные очертания – залив округлой формы, что наводит на мысль, что группа озёр может быть структурами дегазации водорода. В некотором смысле им можно присвоить статус кольцевых структур проседания, при учёте того, что в СЗ части их форма осложнена окружающим рельефом. Для проверки этого предположения на берегу залива округлой формы была проведена полевая водородометрия.

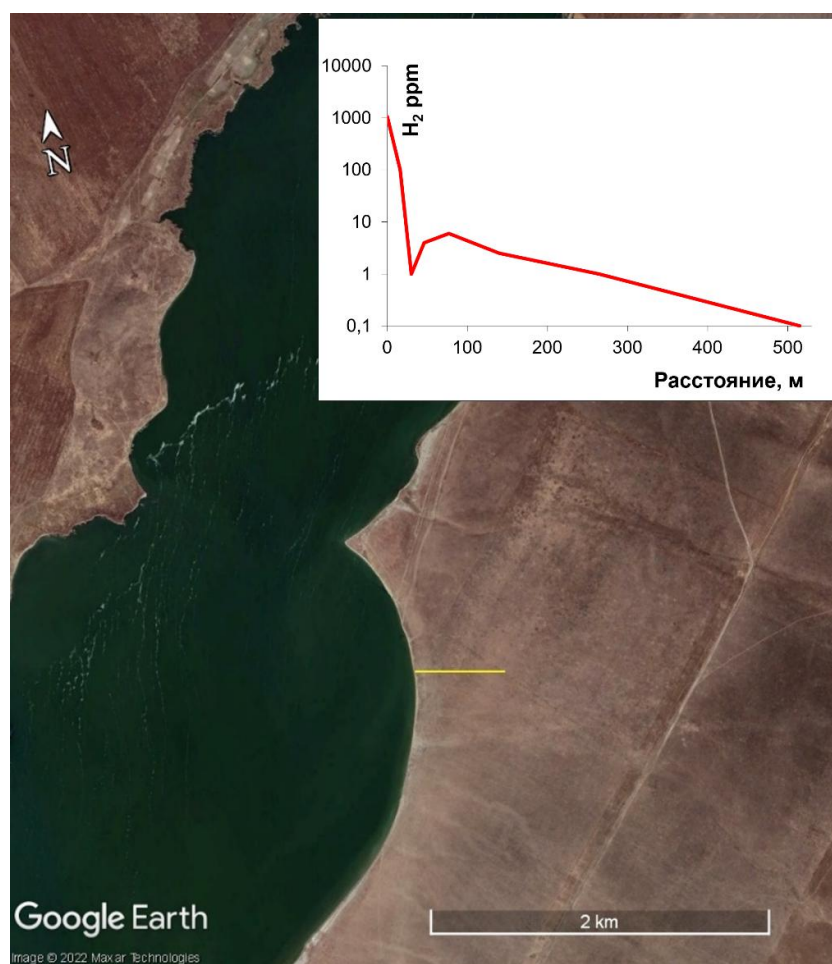


Рис. 66. Результаты водородометрии на одной из структур дегазации Умыкейских озёр. Профиль измерений показан желтой линией. Масштаб вертикальной оси – логарифмический.

Мы располагали ограниченным временем, поэтому удалось сделать всего 7 точек с шагом от 15 до 250 метров (Рис. 66). Были зафиксированы относительно высокие содержания водорода, но и этого оказалось достаточно для того, чтобы подтвердить предположение о природе Умыкейских озёр.

Табл. 15. Результаты полевой водородометрии на берегу оз. Умыкий.

структура, профиль	номер точки	расст., м	Водород, ppm
оз. Умыкий, Пр. 1	1	0	1050
	2	16	100
	3	30	1
	4	46	4
	5	77	6
	6	140	2,5
	7	265	1
	8	515	0,1

Координаты точки с максимальной концентрацией водорода N49,96516° E117,95277°. Полевая водородометрия проводилась по методике, предусматривающей забивание штыря, его вытаскивание и замеры водорода в скважинном газе в соответствии со схемой приведенной на Рис. 5 (см. главу «Методика ...»).

3.8. Остров Сахалин

Полигон исследования находится в грабене шириной 5–15 км и протяженностью около 80 км. Грабен заполнен четвертичными терригенно-осадочными отложениями, в бортах обнажены меловые, палеогеновые и неогеновые осадочные и эффузивные отложения, представленные преимущественно песчаниками, конгломератами, алевролитами, аргиллитами, кремнистыми породами, вулканитами: андезитами, андезито-базальтами, дацитами и их туфами, также встречаются прослои каменных углей и известняков. Кроме того, в восточном борту обнажены перемятые мезозойские зеленые сланцы, филлиты, слюдистые сланцы, графитистые сланцы и кварциты, а также редкие интрузии серпентинизированных пироксенитов и горнблендитов с подчиненными габбро-диоритами [Жаров, Гальверсен, 2001].

В северной и южной частях грабена развиты торфяные болота. На них, как потенциальных структурах дегазации, было заострено внимание по двум причинам: во-первых, их форма в плане достаточно изометрична и во-вторых, они находятся на водоразделах – их поверхность, что достаточно необычно для торфяного болота, приподнята над руслом обрамляющих ручьёв на 3–5 метров (Рис. 67).



Рис. 67. Торфяные болота. Рельеф вдоль профиля (белая линия) показан внизу рисунка.

В качестве объекта изучения автором было выбрано осушенное для добычи торфа болото. По сообщению директора добывающей компании, выбранный объект представляет собой выклинивающуюся к краям торфяную линзу размером $1,6 \times 3,2$ км с максимальной глубиной до 7 м, которая подстилается синими глинами и характеризуется повышенной зольностью торфа на периферии залежи.

В сентябре 2016 года отрядом в составе Ларин Н. В. и Сысолин И. Г., с разрешения руководства добывающей компании, была осуществлена полевая водородометрия по методике, предусматривающей забивание штыря, его вытаскивание и замеры водорода в скважинном газе по схеме подключения, приведенной на Рис. 6 (см. главу «Методика ...»). Результаты исследования приведены на Рис. 68, 69 и в Табл. 16.

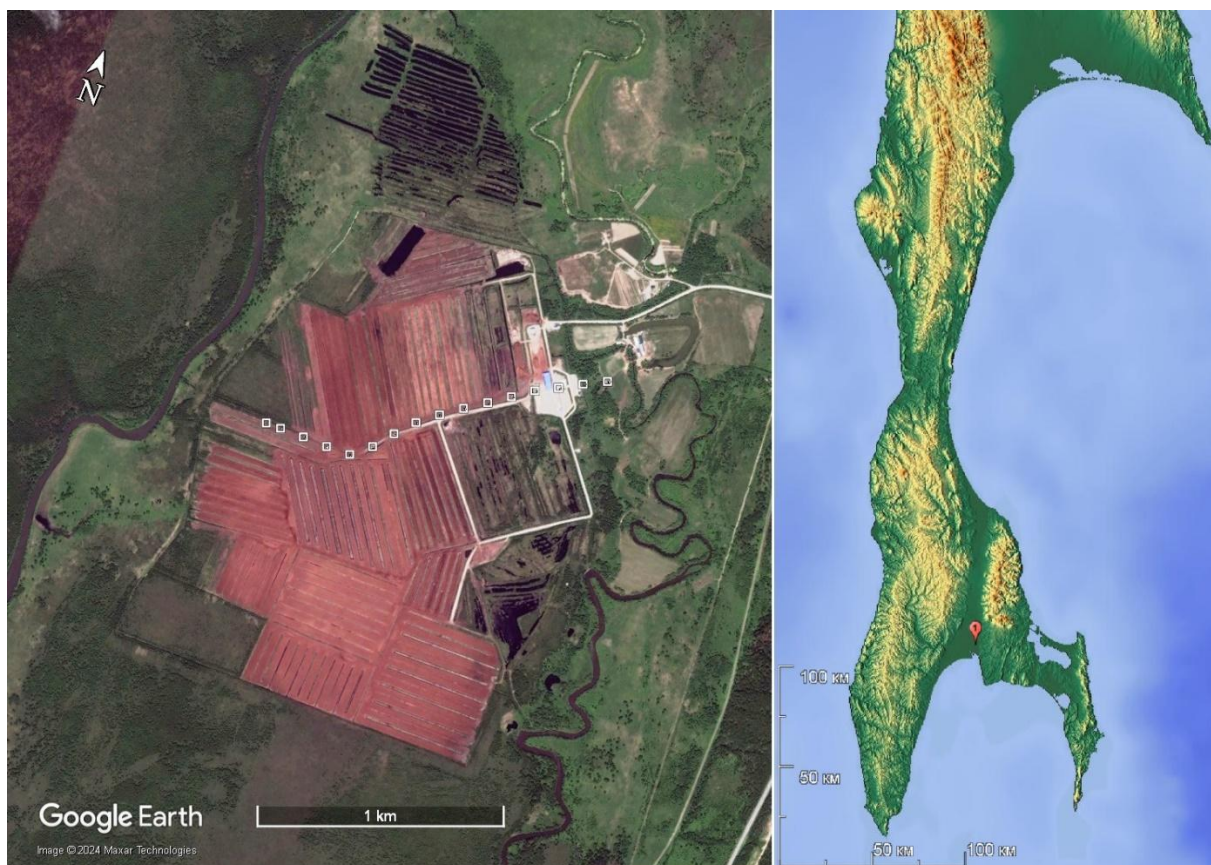


Рис. 68. Южный Сахалин. Структура дегазации водорода с нанесенными точками замеров (белые квадраты). Координаты центра профиля N46,78712° E142,71349°. Справа – карта рельефа с отмеченным полигоном работ (красная метка).

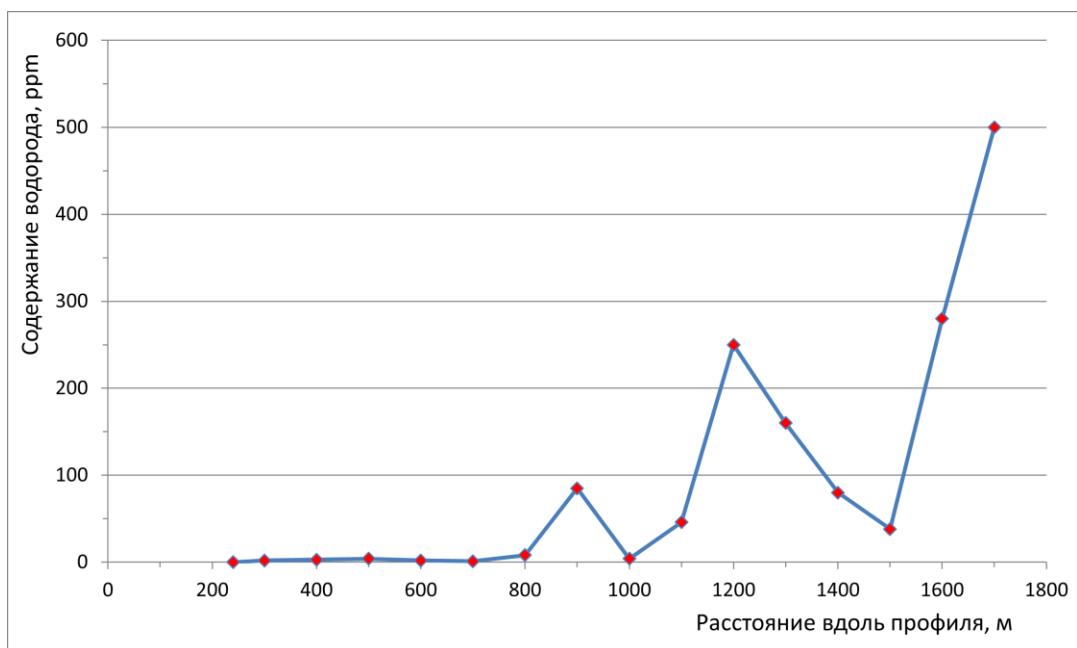


Рис. 69. Результаты полевой водородометрии на осушенном торфяном болоте.

Продлить профиль на запад за пределы осушенного участка и в СВ направлении (в сторону максимальных значений) не представилось возможным из-за высокого

уровня грунтовых вод. Полученные результаты, вкпе с информацией о строении участка (наличие голубых глин), позволяют утверждать, что исследованное торфяное болото является структурой дегазации водорода.

Табл. 16. Результаты полевой водородометрии на осушенном торфяном болоте в р-не села Мицулевка.

структура, профиль	номер точки	расст., м	Водород, ppm
Осушенное торфяное болото, Пр,1	1	240	0
	2	300	2
	3	400	3
	4	500	4
	5	600	2
	6	700	1
	7	800	8
	8	900	85
	9	1000	4
	10	1100	46
	11	1200	250
	12	1300	160
	13	1400	80
	14	1500	38
	15	1600	280
	16	1700	500

3.9. Оман

Совместная с институтом IFPEN (Париж, Франция) экспедиция в Султанат Оман была предпринята в январе 2012 года отрядом в составе: Eric Deville, Valérie Beaumont, Daniel Pillot, Згонник В.А. и Ларин Н.В. Целью экспедиции было изучение проявлений водородной дегазации и проверки бытующих представлений о генетической связи потоков природного водорода с породами ультраосновного состава (офиолитами).

Оманские офиолиты изучались не одним поколением исследователей, так как это лучшее крупное обнажение офиолитовых пород на Земле. Принято считать, что офиолиты Омана соответствуют части океанической литосферы Аравийского моря, которая в позднемеловое время была надвинута на группу Hawasina пермско-мелового возраста. Отложения группы Hawasina сами надвинуты на меловые карбонаты

платформы, имеющей возраст от позднепермского до позднемелового, которые откладывались на докембрийский фундамент. Получившаяся конструкция была вторично деформирована с образованием крупной антиформы фундамента в районе Jebel Akhdar [Zgonnik et al., 2019].

В горах Омана выделения водорода в виде *пузырей* в водоёмах достаточно хорошо изучены [Beaumont et al., 2013; Neal, Stanger, 1983; Sano et al., 1993; Vacquand et al., 2018b]. Одной из целей экспедиции было сравнение состава газов отобранных из различных по составу и происхождению породах.

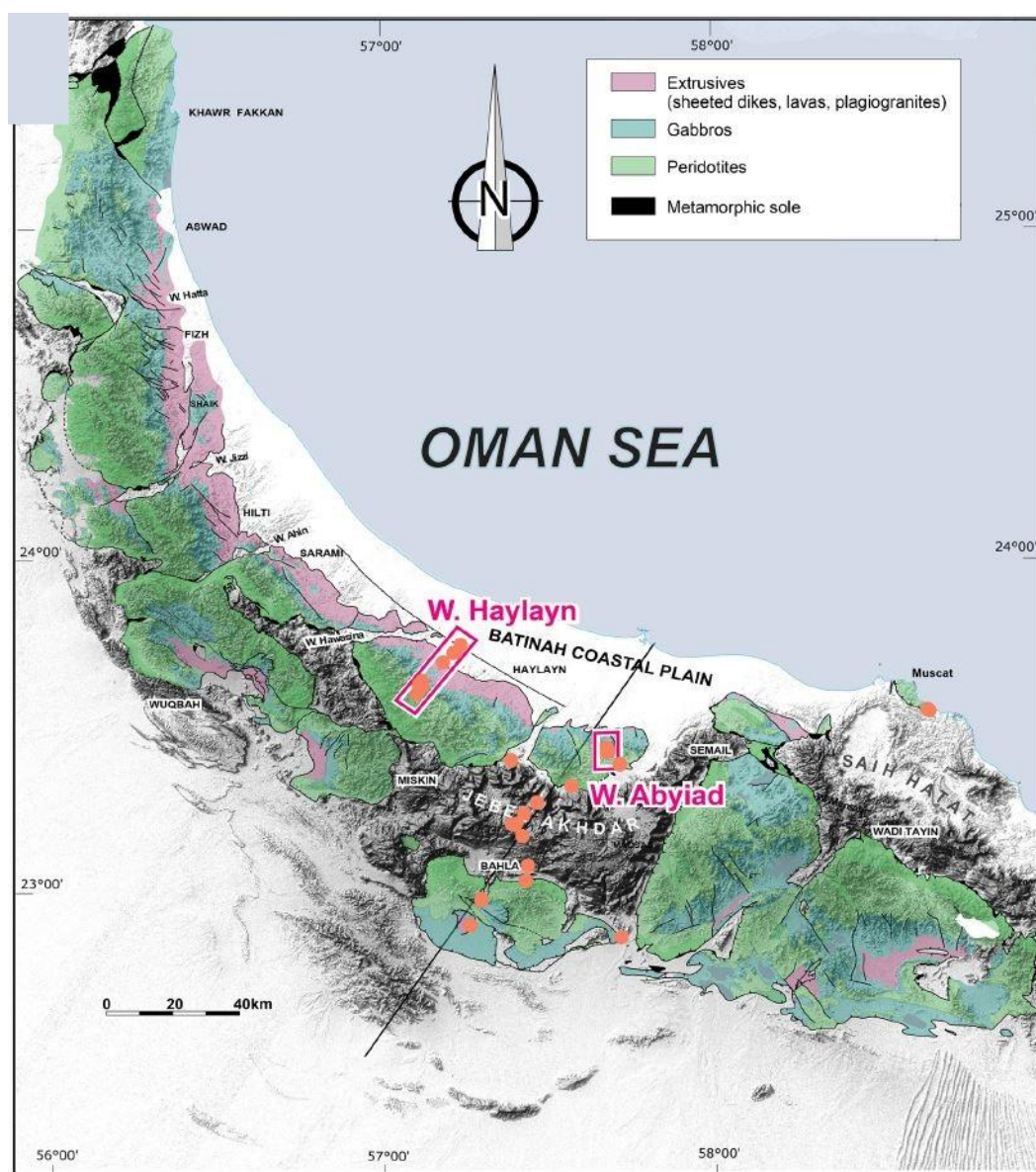


Рис. 70. Геологическая карта северо-западного Омана. Линией отмечено положение схематического разреза, приведенного на Рис. 71. Места отбора проб показаны оранжевыми кружками. Иллюстрация взята из статьи [Zgonnik et al., 2019]

В точках пробоотбора (см. Рис. 70), с помощью аккумуляторного перфоратора и бура диаметром 12 мм и длиной 300 или 1200 мм, бурились скважины. В скважины вставлялась трубка, которая на устье скважины герметизировалась пластилином. Через эту трубку отбирался газ для анализа газоанализаторами серии ВГ и Geotech GA2000 Plus на месте и в герметичные контейнеры Vacutainer® для последующего лабораторного хроматографического анализа. Также, при отборе газа проводились полевые эксперименты связанные с использованием зонда длиной 2 м из комплекта от AMS Inc., Американ-Фолс, Айдахо, США. Этот набор имеет выдвижной наконечник, который позволяет брать пробы почвенного газа на определенной глубине. Полевой эксперимент показал, что в условиях скальных грунтов северного Омана это оборудование применять нецелесообразно. Кроме этого, в местах газопроявлений в водоёмах Wadi Haylayn с помощью воронки, трубок Swagelok и пробирок Vacutainer был отобран газ из пузырей для последующего лабораторного анализа (см. гл. 2 «Методы ...»).

Результатом исследований стало обнаружение в горах Западный Хаджар Северного Омана рассеянного потока молекулярного водорода. При этом, как видно из Рис. 71, присутствие водорода отмечается во всех формациях, связанных с перидотитовым комплексом, и пожалуй самое важное, что водород больше распространен в более глубоких структурных единицах – в верхнем протерозое (см. Рис. 71). Сравнение результатов полевой водородометрии и газовой хроматографии образцов, отобранных при бурении скважин, приведены в Табл. 17. Результаты газовой хроматографии проб, отобранных в пузырях источников и водоёмов, отражены в Табл. 18.

Для расчета потока водорода были примерно оценены его градиенты. Они имели следующие средние значения: четвертичные аллювиальные песчано-гравийные отложения 28 ppm/м; офиолиты, представленные серпентинизированными

перидотитами и габбро, 230 ppm/м; яшмоиды и карбонаты Hawasina, имеющие возраст от триаса до мела, 1060 ppm/м; и палеозойские и протерозойские сланцы и мраморы 1430 ppm/м. Следует отметить, что измеренные концентрации и посчитанные потоки являются минимальными значениями, что связано с несовершенством процесса отбора проб. Так, например, во время бурения устье скважины не герметизировано, что позволяет большей части водорода улечься в атмосферу через зазор между стенками скважины и буром. Второй момент связан с процессом измерения – при прокачивании пробы газа через заполненные воздухом детекторы, происходит разбавление первоначальных концентраций водорода.

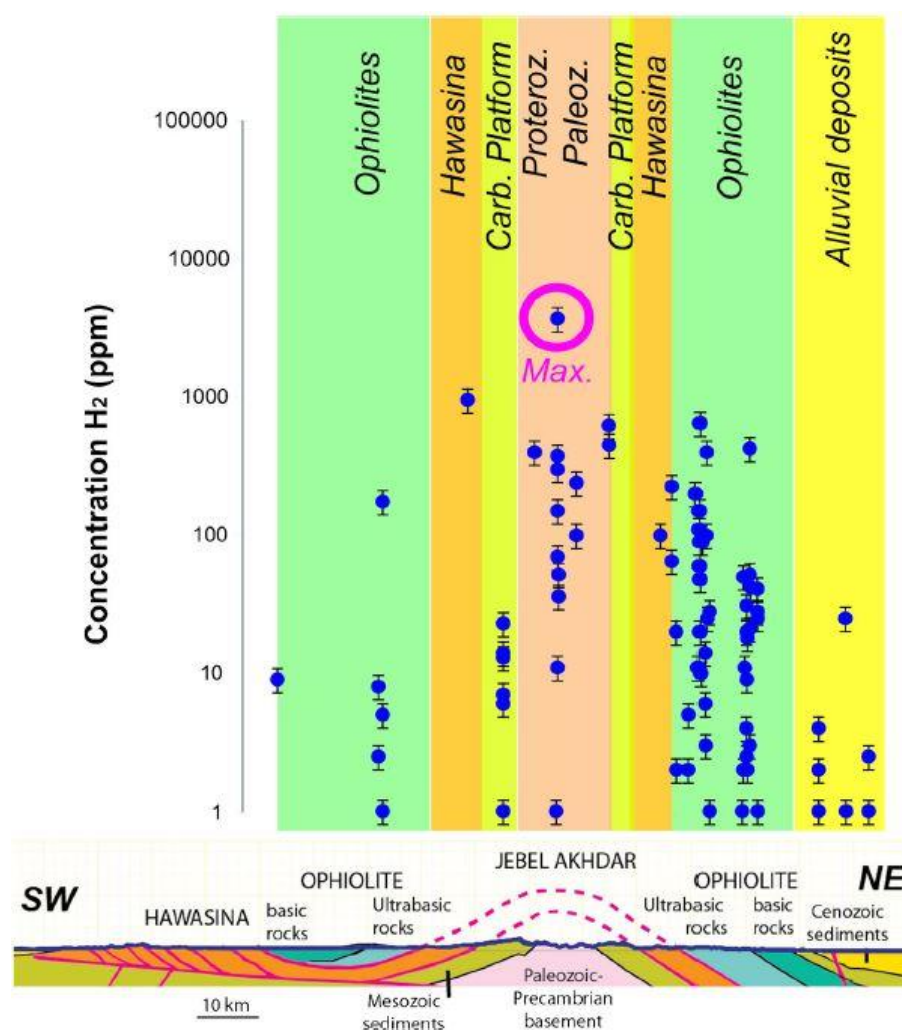


Рис. 71. Вверху: Измеренные концентрации водорода в поверхностных образцах грунта и в трещиноватых породах, нанесенные в соответствии с их положением в различных образованиях, показанных на геологической карте (см. Рис. 70). Внизу: схематический разрез исследуемой территории. Разрез проходит через места отбора проб вдоль линии на Рис. 70. Вертикальный масштаб на разрезе преувеличен [Zgonnik et al., 2019].

Оценки пористости, полученные скорости и объемы диффузионного потока приведены в Табл. 19. Далее, на основе геологической карты [Kusky, Robinson, EL-Baz, 2005], для каждой формации была посчитана общая площадь поверхности. Умножение значений этих площадей на оценки суточного стока дает оценку общего суточного стока водорода из каждой формации в атмосферу. Расчетные потоки водорода для гор Хаджар Северного Омана представлены в Табл. 19. Принимая во внимание множество сделанных предположений, эти цифры представляют собой лишь очень приблизительные значения.

Наиболее важным результатом можно считать тот факт, что рассчитанные минимальные потоки водорода составили от 70 до 150 м³/км² в сутки из перидотитов и до 1300 м³/км² в сутки из пород верхнего протерозоя. Как видим, поток из протерозойских пород превышает таковой из офиолитов на порядок. Эти наблюдения позволяют предполагать наличие источника водорода *под офиолитами* [Zgonnik et al., 2019].

Также необходимо отметить, что в перидотитах офиолитового массива Семаил водород обнаружен только в связи с трещиноватыми породами, тогда как в нетрещиноватых перидотитах следов этого газа не обнаружено.

Табл. 17. Результаты газовой хроматографии проб, отобранных в вакуумированные пробирки (Vacutainers), в сравнении с полевыми измерениями газоанализаторами серии ВГ. Формации: So – офиолиты Semail, H – Hawasina, P – Permian, PCC – Докембрий и Кембрий; Литология: G – габбро, P – перидотиты, JC – яшмы и карбонаты, S – сланцы, M – мраморы

Номер пробы	Координаты, °		Формация и литология	Глубина скважин, см	Полевые замеры, ppm	Результаты газовой хроматографии, ppm		
	N	E				H ₂	CH ₄	CO ₂
S 1 f 2 (1)	23,61986	57,11344	So, G	80	425	194	81	0
S 1 f 2 (2)	23,61986	57,11344	So, G	80	425	227	82	0
S 30 f 1	23,42416	57,67205	So, P	110	90	10	29	58

S 30 f 2	23,42416	57,67205	So, P	110	20	48	24	38
S 46 f 1a	23,39641	57,38097	H, JC	100	225	0	11	80
S 46 f 1b	23,39641	57,38097	H, JC	100	225	54	12	116
S 48 f 1	23,39633	57,38141	H, JC	90	65	44	12	115
S 49 f 2	23,27425	57,45791	P, S	100	450	264	49	219
S 50 f 1	23,27391	57,45830	P, S	90	625	127	0	75
S 51 f 1	23,24105	57,42019	PCC, M	20	240	32	15	81
S 51 f 2	23,24105	57,42019	PCC, M	30	100	8	59	102
S 52 f 2	23,21208	57,39591	P, S	40	52	0	14	202
S 54 f 1	23,21102	57,38397	PCC, S	30	150	0	0	80
S 54 f 2	23,21102	57,38397	PCC, S	60	375	0	0	75
S 54 f 4	23,21102	57,38397	PCC, S	110	3400	1732	36	88
S 55 f 1	23,17580	57,41466	P, S	30	400	139	88	154
S 61 f 1	22,88200	57,71163	H, JC	60	375	190	27	167

Табл. 18. Результаты газовой хроматографии пузырей, отобранных в ультращелочных источниках и водоёмах. Концентрации гелия и углеводородов C2+ ниже предела обнаружения. Формации: So – офиолиты Semail; Литология: G – габбро, P – перидотиты, T – отложения террас.

Номер пробы	Координаты, °		Формация и литология	H ₂ %	O ₂ %	N ₂ %	CH ₄ %	CO ₂ ppm
	N	E						
S 30 (1)	23,42416	57,67205	So, P	30,3	1,1	61,0	7,6	0,0
S 30 (2)	23,42416	57,67205	So, P	30,7	1,1	60,6	7,5	0,0
S 8 (1)	23,61805	57,10780	So, P	70,0	2,2	24,3	3,5	301,7
S 8 (2)	23,61805	57,10780	So, P	71,7	1,7	23,0	3,5	0,0
S 39 (1)	23,42933	57,66825	So, T	37,3	3,1	52,8	6,8	0,0
S 39 (2)	23,42933	57,66825	So, T	35,1	4,4	54,3	6,2	0,0
S 2-1	23,61988	57,11319	So, G	77,0	0	14,2	8,8	0

Табл. 19. Оценки пористости в местах замеров и соответствующие расчеты диффузионного потока водорода.

Формация	Расчетная пористость	Диффузионный поток H_2 , $\times 10^{-10} \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Суточный поток H_2 , м^3 на 1 км^2	Площадь формаций, км^2	Оценка для всей поверхности, $\times 1000 \text{ м}^3$ в сутки
Аллювий	> 40%	9	71	37	2,6
Перидотиты	пористость массивного перидотита: <1% (микротрещиноватость), пористость материала в трещинах: 10-15%, пористость открытых трещин 5-10%, расчетная средняя пористость 5-10%;	9 - 18	73 - 147	185	13,5 - 27,2
Hawasina	пористость породы 1-10%, пористость открытых трещин 10-20%, расчетная средняя пористость 5-15%	41 - 120	340 - 1000	105	35,7 - 105
PR и PZ	пористость матрицы: 1-10%, пористость открытых трещин 10-15%, расчетная средняя пористость 5-15%	55 - 110	450 - 1300	66	29,7 – 85,8

Результаты приведенного выше исследования были опубликованы в журнале «Arabian Journal of Geosciences», см. [Zgonnik et al., 2019].

3.10. Северная Америка. США

Восточное побережье

Изучение кольцевых структур проседания в Северной Америке началось с посещения Штата Северная Каролина, расположенного на Восточном побережье США. Было принято решение провести проверку предположения о том, что Carolina Bays являются структурами дегазации водорода. Carolina Bays представляют собой многочисленные впадины с формой от эллиптической (Рис. 72) до круглой (Рис. 73), распространенные вдоль Атлантического побережья штатов Нью-Йорк, Нью-Джерси, Делавэр, Мэриленд, Вирджиния, Северная Каролина, Южная Каролина, Джорджия и Флорида. Надо заметить, что термин «Carolina Bays» (Заливы Каролины) является неудачным, но начиная с трудов L. C. Glenn [Glenn, 1895] название укоренилось в научной литературе.

Атлантическая прибрежная равнина, провинция восточной части Северной Америки, представляет собой формирующуюся часть платформы на пассивной континентальной окраине и в настоящее время характеризуется врезанными долинами, разделяющими плоские междуречья [Farrell et al., 2013]. Средний тренд длинных осей Carolina Bays варьируется от NW16° в Джорджии до NW 39° в Южной Каролине, а в штате Мэриленд приобретает неорганизованный характер ориентации. В южной части прибрежной равнины в Джорджии и Флориде Carolina Bays имеют примерно круглую форму со слабой северной ориентировкой [Johnson, 1942].

Большинство описываемых впадин состоят из нескольких метров песка и (или) ила, залегающих несогласно на более твердом субстрате, не имеющем признаков деформации или других нарушений [Swezey, 2020]. Состав и возраст этого субстрата варьируется от места к месту. Как правило юго-восточное замыкание Carolina Bays имеет приподнятый на 0,5–3 метра вал, сложенный белым песком. Площади впадин отдельных Carolina Bays лежат в диапазоне от 0,5 Га до десятков тысяч Га, при этом распределение размеров демонстрирует уменьшение количества депрессий по мере увеличения их площади [Semlitsch, 2000; Semlitsch, Bodie, 1998].

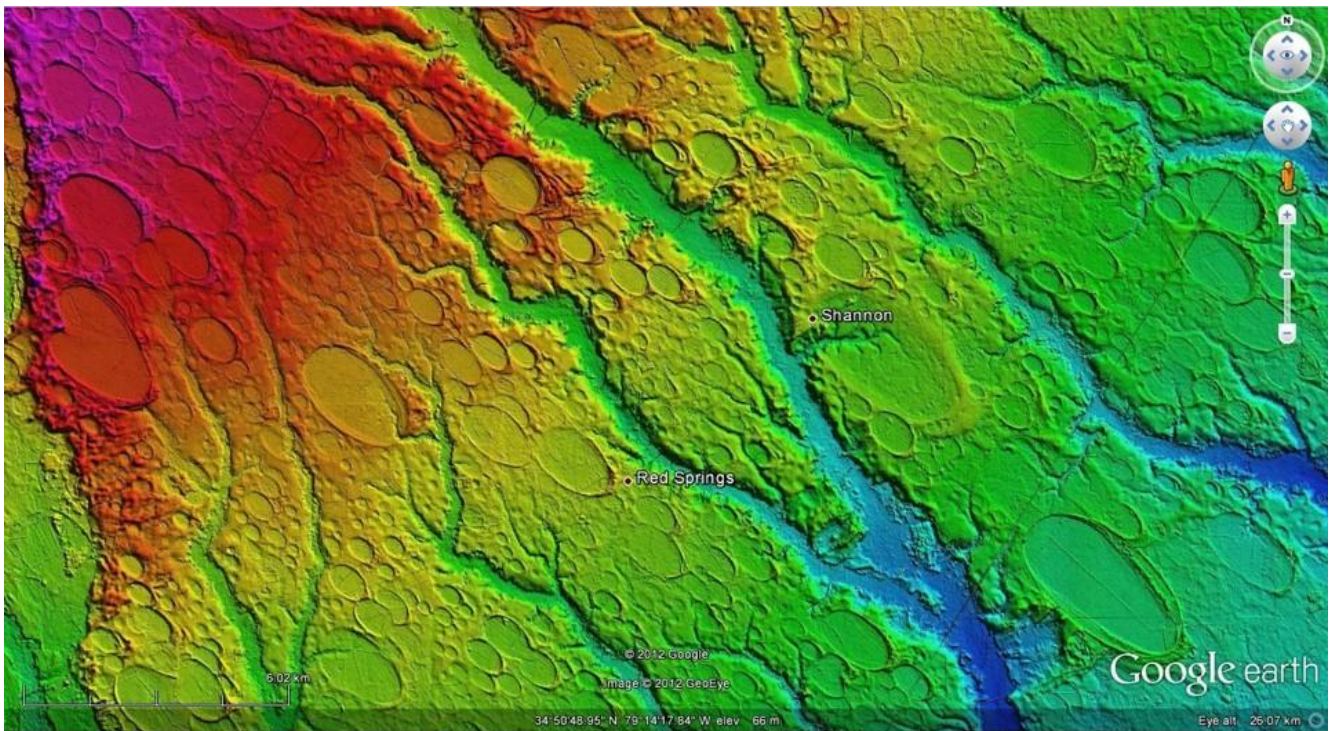


Рис. 72. Иллюстрация широкого распространения Carolina Bays на восточном побережье США в штате Северная Каролина. Цветовое изображение рельефа получено при обработке данных LiDAR, источник: <http://cbaysurvey.cintos.org/>



Рис. 73. Кольцевые структуры проседания в центральной части Флориды, США. Космический снимок из Google Earth.

Для исследования были выбраны участки, характеризующиеся высокой плотностью Carolina Bays (Рис. 74) с различными размерами, которые были легко доступны и имели, судя по геоморфологии, различный возраст. Впадины Carolina Bays были идентифицированы по спутниковым снимкам Google Earth и изображениям LiDAR. В процессе исследований целесообразно размечать профили так, чтобы полностью пересечь структуру и выйти за пределы на расстояние, примерно равное половине диаметра впадины. Такие параметры профиля позволяют определить точку на профиле, в которой концентрация водорода стала повышаться. К сожалению, так удастся сделать не всегда, особенно это актуально для обжитых районов США, где хозяева участков земли не всегда дают разрешение на проведение полевых работ.



Рис. 74. Расположение исследуемого участка показано на врезке. Штат Северная Каролина (NC). Carolina Bays обведены оранжевыми эллипсами [Zgonnik et al., 2015].

Для непосредственных полевых измерений было выбрано несколько объектов: Arthur Road Bay, Smith Bay, Jones Lake Bay и песчаный карьер вблизи Arthur Road Bay. Для пробоотбора применялся комплект кувалда–штырь–домкрат, а для измерений – газоанализатор GA2000 или ВГ-2 со схемой подключения, указанной на Рис. 5.

- Arthur Road Bay

Исследуемый объект (координаты центра $N34,79248^{\circ}$ $W79,22737^{\circ}$) представляет собой впадину овальной формы (длина 580 м, ширина 360 м, средняя глубина около 2 м) с песчаным валом, обрамляющим впадину с Ю, ЮВ, В и СВ (Рис. 75). Впадина была изменена осушением и расчисткой. Профили проходили вдоль двух дренажных канав перпендикулярных друг другу и пересекающих впадину вдоль и поперёк её простираения (Рис. 75). Замеры проводились с шагом 50 м по обоим профилям. Максимальная обнаруженная концентрация составила $>0,12\%$, при этом произошло насыщение детектора, что не позволяет определить насколько был превышен верхний

предел измеряемой концентрации водорода. Среднее содержание составило 233 ppm по 23 измерениям.

В местах, где полевой водородометрией были зафиксированы высокие значения водорода, был произведен отбор проб в вакуумные пробирки Vacutainer®. Результаты приведены в Табл. 24. Обращает на себя внимание, что помимо метана (CH_4) были обнаружены следовые концентрации этана (C_2H_6) и пропана (C_3H_8).

Кроме изучения характера распределения водорода в КСП Arthur Road Bay были проведены исследования в небольшом песчаном карьере (Arthur Road Sandpit), расположенным в 500 м южнее центра Arthur Road Bay и находящемся в месте слияния четырёх КСП (Рис. 75). В карьере было проведено 5 измерений, среднее значение составило 313 ppm H_2 , а максимальное $> 0,12\%$. Были отобраны две пробы газа, одна из скважины и одна из пузырей, которые поднимались со дна небольшой мелкой лужи. В первом случае было обнаружено 735 ppm метана и следовые количества углеводородов C_2^+ , а во втором случае метана было гораздо больше (почти 54%), и более тяжелые углеводороды обнаружены не были (Табл. 20). Наличие столь высоких концентраций метана, при отсутствии этана и пропана, может свидетельствовать о высокой биологической активности метаногенов.

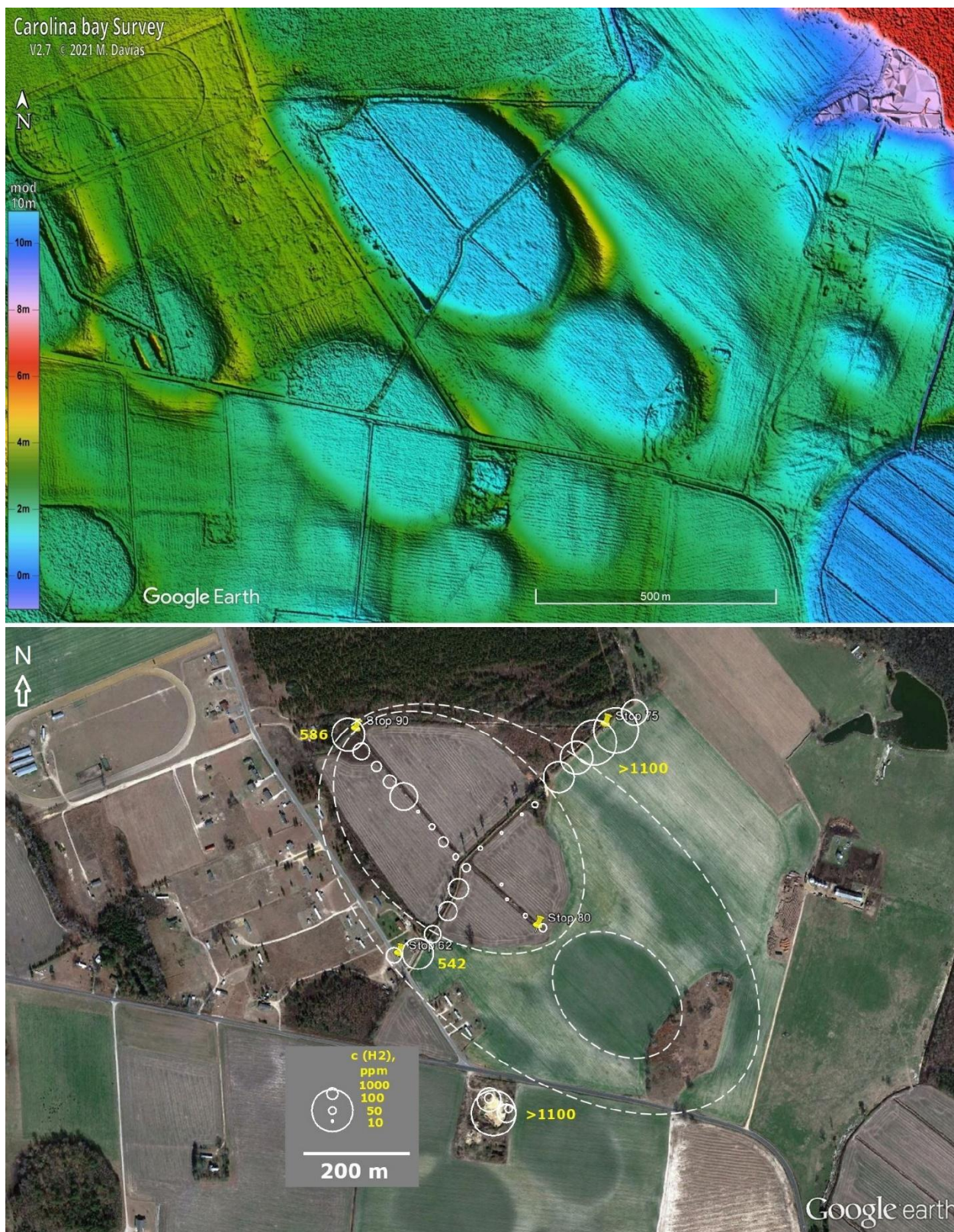


Рис. 75. На нижнем рисунке отражены результаты измерений скважинных концентраций водорода в Arthur Road Bay и Arthur Road Sandpit (данные приведены в Табл. 20). Линии профиля следуют вдоль канав (темные линии на нижней фотографии). Дата измерений 14 марта 2012 г. Пунктирной линией обозначены границы депрессий рельефа [Zgonnik et al., 2015]. На верхнем рисунке изображение LiDAR (источник: cintos.org), на котором отражен рельеф нижнего рисунка.

Табл. 20. Результаты полевых измерений на структуре Arthur Road Bay (пикеты ST 62 – ST 90) и в карьере Arthur Road Sandpit (пикеты ST 91a – ST 91e).

Пикет	Координаты пикета		Глубина скважины (см)	Показания детектора GA2000		
	Широта (°N)	Долгота (°W)		H ₂ (ppm)	CO ₂ (%)	CH ₄ (%)
ST 62	34,78986	-79,22872	120	134	0,7	0
ST 63	34,78988	-79,22822	120	542	0,2	0,1
ST 64	34,79025	-79,22791	120	171	1,5	0
ST 65	34,79066	-79,22761	120	210	0,9	0
ST 66	34,79108	-79,22738	120	258	1,3	0
ST 67	34,79147	-79,22722	120	43	0,5	0
ST 68	34,79183	-79,22694	120	22	0,2	0
ST 69	34,79211	-79,22650	120	10	0	0
ST 70	34,79244	-79,22608	120	10	1	0
ST 71	34,79263	-79,22580	120	40	0,5	0
ST 72	34,79313	-79,22530	120	540	0,6	0
ST 73	34,79350	-79,22494	120	584	1,2	0
ST 74	34,79377	-79,22458	120	>1200	1	0
ST 75	34,79400	-79,22413	120	>1200	0	0
ST 76	34,79433	-79,22375	120	405	0,8	0,1
ST 77	34,79116	-79,22650	120	11	0,4	0
ST 78	34,79088	-79,22638	120	8	0,1	0
ST 79	34,79058	-79,22600	120	20	0,2	0
ST 80	34,79036	-79,22563	120	44	0,2	0
ST 81	34,79022	-79,22547	120	1	0,1	0
ST 82	34,79166	-79,22744	120	34	1,1	0
ST 83	34,79194	-79,22769	120	63	1,2	0
ST 84	34,79222	-79,22794	120	28	0,2	0
ST 85	34,79250	-79,22822	120	10	0,1	0
ST 86	34,79277	-79,22852	120	428	0,1	0,1
ST 87	34,79305	-79,22880	120	112	0,3	0
ST 88	34,79333	-79,22908	120	65	0,6	0
ST 89	34,79361	-79,22938	120	165	0,6	0
ST 90	34,79391	-79,22966	120	586	0,6	0
ST 91a	34,78719	-79,22675	120	333	0	0
ST 91b	34,78722	-79,22675	120	60	0	0
ST 91c	34,78702	-79,22636	120	44	0	0
ST 91d	34,78694	-79,22638	120	200	0	0
ST 91e	34,78694	-79,22666	120	>1200	1,2	0

- Smith Bay

Объект (координаты центра N 34,67843° W 78,58213°) представляет собой овальную впадину 800×550 м глубиной 1 м и окруженную с СЗ, ЮЗ, Ю и ЮВ песчаным валом высотой до 3–4 метров (Рис. 76 вверху).

КСП Smith Bay образовалась, предположительно, на ландшафте среднелейстоценового возраста. Внутренние части впадины покрыты слоем торфа голоценового возраста мощностью 1–2 м. Заболоченный участок, присущая ему растительность и окружающий вал резко ограничивают очертания впадины. Вода стекает из впадины по двум дренажным канавам, которые пересекаются недалеко от её центра [Zgonnik et al., 2015].

Исследования были сосредоточены на двух профилях, которые были проложены вдоль дренажных канав (Рис. 76 внизу). Максимальная концентрация водорода, превышающая 1200 ppm (насыщение детектора GA2000), была обнаружена за пределами северо-западной границы залива (см. Рис. 76), недалеко от пересечения Smith Bay и меньшей по размеру, безымянной впадины, расположенной северо-западнее. Три других максимума концентрации водорода располагались там, где разрезы совпадали с песчаными валами, окаймляющими заливы. Повышенные концентрации водорода также были обнаружены в центре впадины Smith Bay. За пределами песчаного вала концентрация водорода снизилась до почти нулевых значений [Zgonnik et al., 2015]. Результаты полевых измерений приведены в Табл. 21.

В местах, где полевой водородометрией были зафиксированы высокие значения водорода, был произведен отбор проб в вакуумные пробирки Vacutainer®. Результаты приведены в Табл. 24. Надо отметить, что помимо метана (CH₄), который может иметь биологическое происхождение, были обнаружены следовые концентрации этана (C₂H₆) и пропана (C₃H₈).

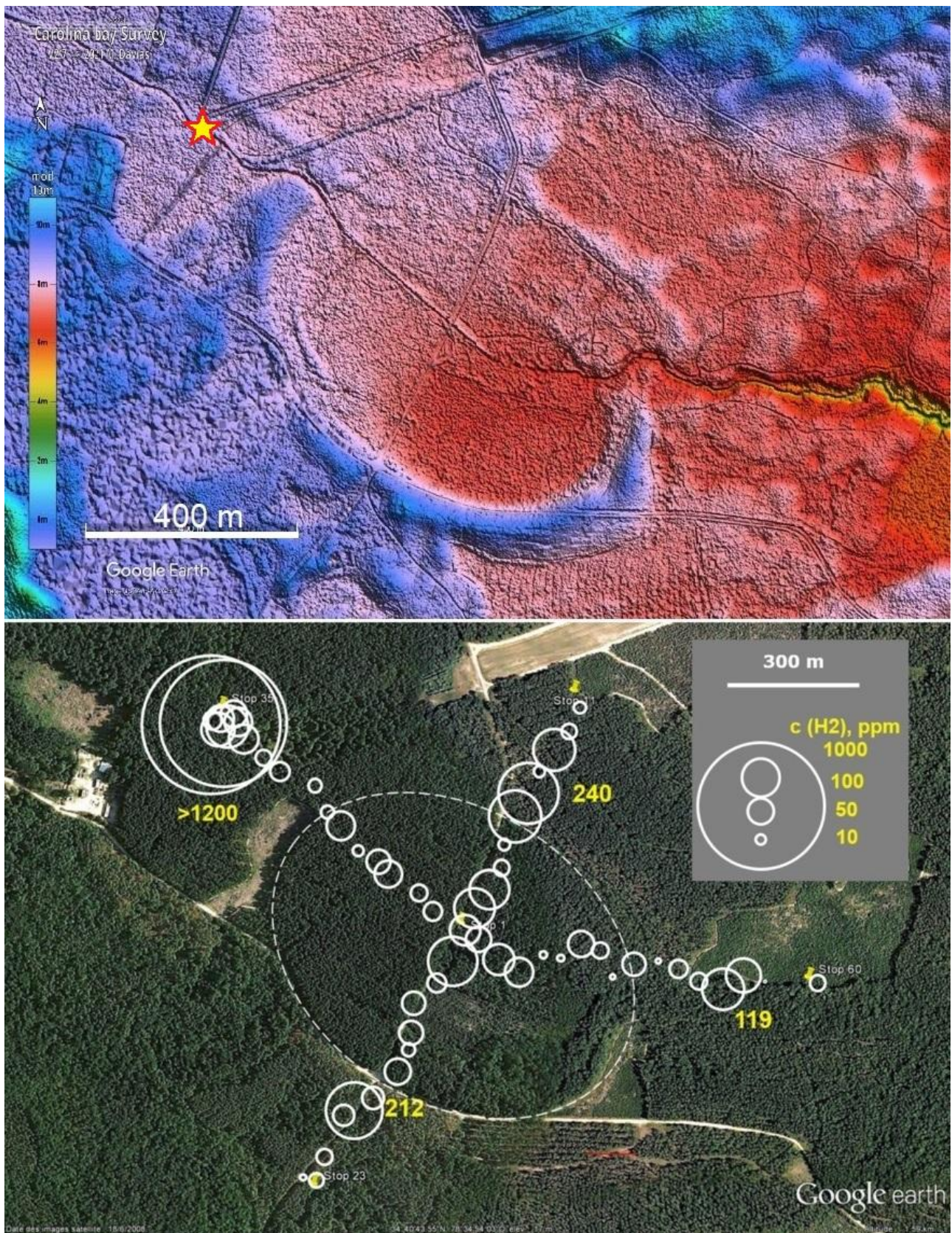


Рис. 76. Результаты измерений концентрации водорода, сделанных в КСР Smith Bay (нижнее изображение). На верхнем рисунке изображен рельеф LiDAR (с сайта cintos.org). Звездочкой показано положение места с максимальной концентрацией водорода. Пунктирными линиями обозначен Smith Bay. Замеры были произведены 09 Марта 2012 г [Zgonnik et al., 2015].

Табл. 21. Результаты полевых измерений на структуре Smith Bay.

Пикет	Координаты пикета		Глубина скважины (см)	Показания детектора GA2000		
	Широта (°N)	Долгота (°W)		H ₂ (ppm)	CO ₂ (%)	CH ₄ (%)
ST 2	34,67916	-78,58188	120	110	1,7	0
ST 3	34,67950	-78,58158	120	107	3,6	0
ST 4	34,67988	-78,58133	120	20	0,7	0
ST 5	34,68030	-78,58127	100	13	1,2	0
ST 6	34,68080	-78,58105	70	180	1,2	0
ST 7	34,68122	-78,58077	100	240	1,1	0
ST 8	34,68161	-78,58055	120	12	0,7	0
ST 9	34,68200	-78,58025	120	122	2,1	0
ST 10	34,68233	-78,57994	120	20	0,8	0
ST 11	34,68275	-78,57972	120	13	1,3	0
ST 12	34,67822	-78,58233	120	161	1,6	0
ST 13	34,67783	-78,58266	40	28	0,3	0
ST 14	34,67747	-78,58313	120	40	0,4	0
ST 15	34,67694	-78,58319	120	42	0,7	0
ST 16	34,67663	-78,58325	120	15	0,9	0
ST 17	34,67625	-78,58347	120	49	0,9	0
ST 18	34,67577	-78,58397	120	37	2,3	0
ST 19	34,67555	-78,58436	50	212	0,6	0
ST 20	34,67547	-78,58458	120	34	0,7	0
ST 21	34,67472	-78,58497	120	21	0,3	0
ST 22	34,67436	-78,58541	120	5	0,3	0
ST 23	34,67430	-78,58513	120	18	0,8	0
ST 24	34,67911	-78,58275	120	27	0,9	0
ST 25	34,67944	-78,58302	120	24	0,5	0
ST 26	34,67977	-78,58366	120	54	0,7	0
ST 27	34,68000	-78,58386	120	43	1	0
ST 28	34,68019	-78,58427	120	11	0,8	0
ST 29	34,68063	-78,58463	120	60	0,7	0
ST 30	34,68088	-78,58491	120	15	0,5	0
ST 31	34,68136	-78,58516	120	16	0,7	0
ST 32	34,68161	-78,58588	120	29	0,7	0
ST 33	34,68186	-78,58622	120	21	0,7	0
ST 34	34,68219	-78,58663	120	62	0,8	0
ST 35	34,68247	-78,58705	120	>1200	0,7	0
ST 36	34,68252	-78,58727	120	27	0,5	0
ST 38	34,68255	-78,58711	120	51	0,7	0
ST 39	34,68244	-78,58730	120	>1200	0,7	0
ST 40	34,68241	-78,58697	120	122	0,7	0
ST 41	34,68236	-78,58716	120	77	0,7	0
ST 42	34,68263	-78,58683	120	51	0,7	0

ST 43	34,68250	-78,58675	30	56	0,8	0
ST 44	34,67861	-78,58180	120	48	0,6	0
ST 45	34,67825	-78,58138	120	70	0,9	0
ST 46	34,67802	-78,58097	120	60	0,3	0
ST 47	34,67833	-78,58047	120	6	0,9	0
ST 48	34,67827	-78,58011	120	6	1	0,1
ST 49	34,67852	-78,57969	120	50	0,8	0
ST 50	34,67841	-78,57930	120	22	0,7	0
ST 51	34,67794	-78,57905	120	4	0,8	0
ST 52	34,67816	-78,57861	120	40	0,5	0
ST 53	34,67822	-78,57811	120	4	0,9	0
ST 54	34,67808	-78,57769	120	27	0,8	0
ST 55	34,67786	-78,57727	120	22	0,9	0
ST 56	34,67772	-78,57677	120	119	0,7	0
ST 57	34,67797	-78,57636	120	82	0,8	0
ST 58	34,67786	-78,57591	120	1	0,7	0
ST 59	34,67777	-78,57538	120	0	1,9	0
ST 60	34,67783	-78,57483	120	21	1,4	0
ST 35 e3	34,68247	-78,58706	120	123	0,7	0
ST 35 e4	34,68247	-78,58706	120	555	0,6	0
ST 35 e5	34,68247	-78,58706	120	659	0,6	0
ST 35 e6	34,68247	-78,58706	120	1092	0,2	0
ST 35 e7	34,68247	-78,58706	120	101	0,6	0
ST 35 e8	34,68247	-78,58706	120	87	0,6	0
ST 35 e9	34,68247	-78,58706	120	715	0,3	0
ST 35 e10	34,68247	-78,58706	120	574	0,5	0
ST 35 e11	34,68247	-78,58706	120	305	0,6	0
ST 35 e12	34,68247	-78,58706	120	312	0,3	0
ST 35 e13	34,68247	-78,58706	120	404	0,7	0

- Небольшая свежая структура внутри Jones Lake Bay.

Этот участок выбран исходя из результатов детального изучения космических снимков Google Earth, сделанных в разное время. При сравнении снимков 2008 и 2009 годов было обнаружено круглое пятно, отличающееся от окружающей зелёного фона лесной растительности бурым цветом. (Рис. 78).

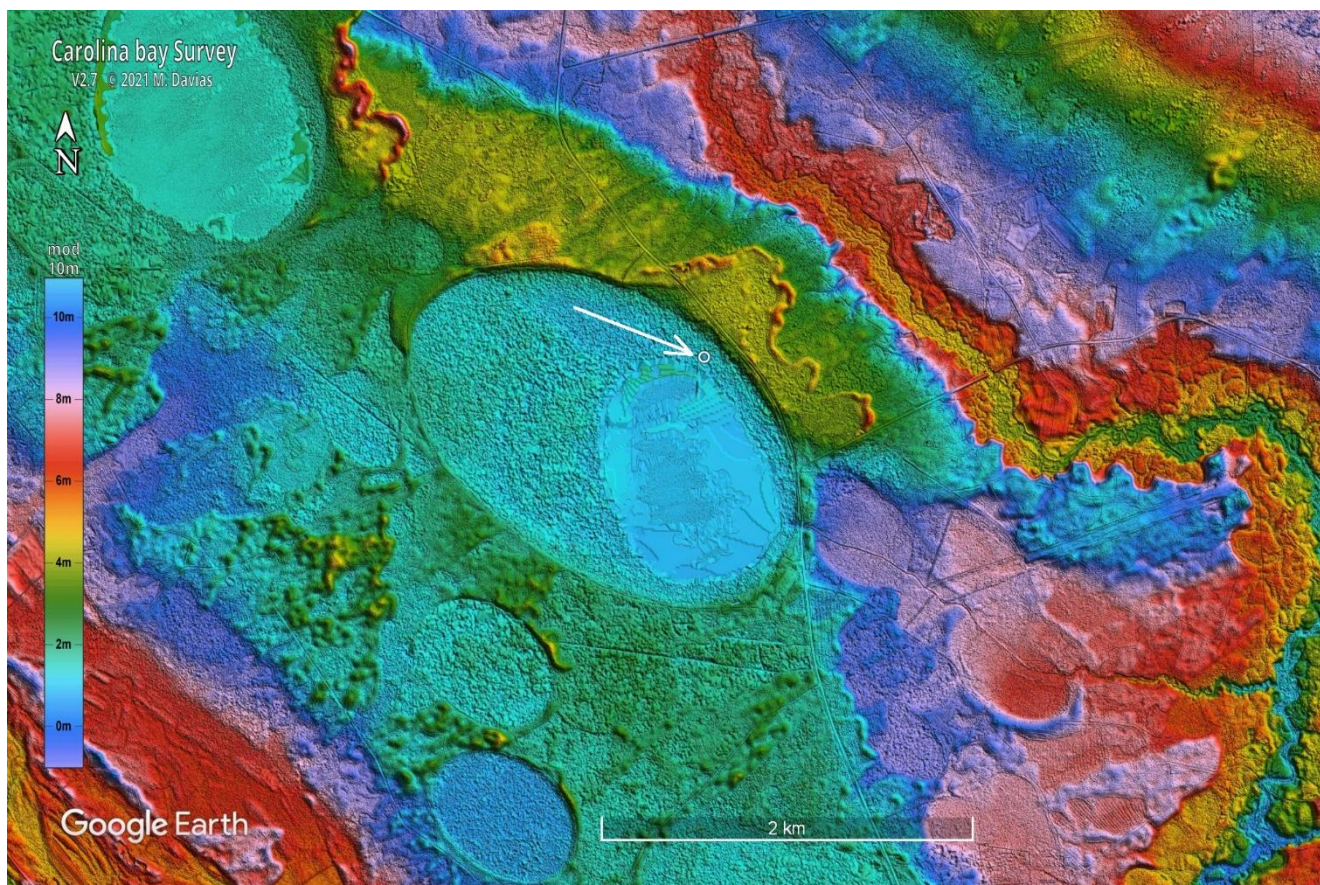


Рис. 77. Небольшая новая структура дегазации водорода (обозначена кружком и стрелкой) внутри Jones Lake Bay.

Объект исследования (с координатами N 34,693104° W 78,600435°) представлял собой небольшую, диаметром около 60 м, круглую поляну в лесу, где в интервале 2008–2009 годов высокие деревья внезапно засохли по неизвестной причине. Эту информацию подтвердили сопровождавшие нас смотрители парка, управляющие заповедником. Было выдвинуто предположение, что деревья погибли в ответ на увеличение водонасыщенности почвы (глубина зеркала грунтовых вод всего 10–15 см) или в результате негативного воздействия другого неизвестного процесса, влияющего на растительность. Возникло предположение, что подобные изменения были вызваны природным водородом, т. к. ранее наблюдали схожую картину во многих местах в чернозёмной зоне Центральной России. Причины этого явления более подробно будут рассмотрены в главе «Обсуждение результатов». Детальные исследования проводились на небольшом участке на берегу озера внутри впадины Jones Lake Bay (Рис. 77), где были обнаружены высокие концентрации водорода (до 815 ppm). В

центре формирующейся депрессии рельефа, глубина которой составляет менее 1 метра, была обнаружена концентрация водорода равная 210 ppm.

На Рис. 79 приведены два графика концентрации водорода, сделанные по профилям с шагом 1-2 м. В обоих профилях самые высокие концентрации водорода были обнаружены на границах молодой впадины. Лабораторные измерения химического состава газа (Табл. 24) показали, что повышенные концентрации метана связаны с водородом. При этом более тяжелые углеводороды обнаружены не были [Zgonnik et al., 2015].



Рис. 78. Появление новой структуры внутри Jones Lake Bay. Верхняя панель: спутниковый снимок в 2008 г. Нижняя панель: спутниковый снимок 2009 г. Расположение изученного объекта показано на Рис. 77. Обратите внимание на появление круга диаметром около 60 м в месте повреждения леса [Zgonnik et al., 2015].

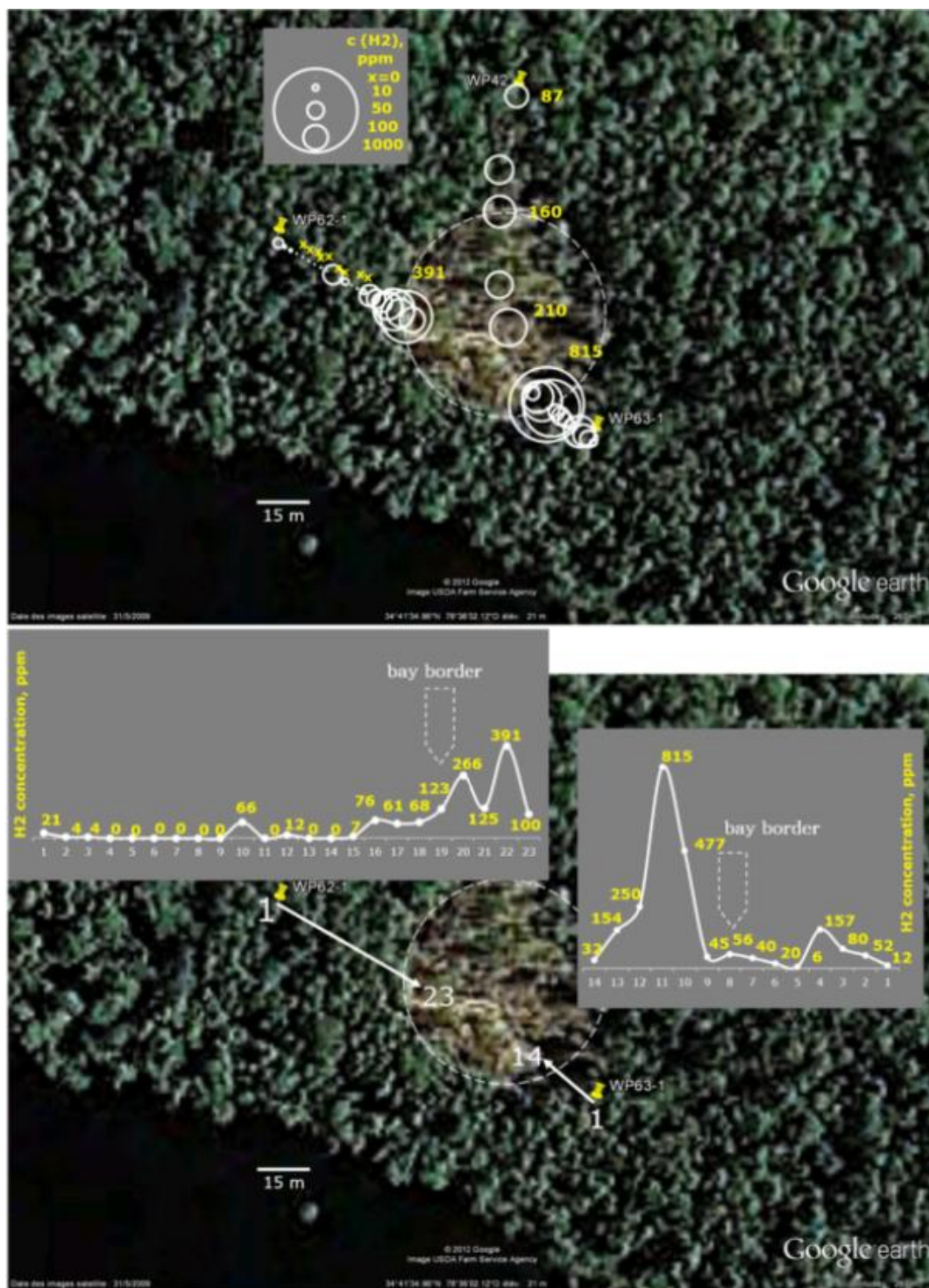


Рис. 79. Концентрация водорода в почве в структуре Jones Lake. Геохимия и геоморфология прекрасно коррелируют, определяя границы структуры. Дата измерений 13 марта 2012 г [Zgonnik et al., 2015].

Табл. 22. Результаты полевых измерений на молодой структуре внутри Jones Lake Bay

Пикет	Координаты пикета	Глубина скважины (см)	Показания детектора GA2000
-------	-------------------	-----------------------	----------------------------

	Широта (°N)	Долгота (°W)		H ₂ (ppm)	CO ₂ (%)	CH ₄ (%)
WP42	34,69363	-78,60044	120	87	0,6	0
WP43a	34,69344	-78,60050	120	90	ND	0
WP43b	34,69344	-78,60050	120	162	ND	0
WP44	34,69333	-78,60050	120	160	0,7	0,7
WP45	34,69313	-78,60050	120	118	0,8	0
WP46	34,69302	-78,60047	120	210	0,2	0,1
WP621	34,69325	-78,60122	10	21	0	0
WP622	34,69325	-78,60122	10	4	0	0
WP623	34,69325	-78,60122	10	4	0	0
WP624	34,69325	-78,60122	10	0	0	0
WP625	34,69325	-78,60122	10	0	0	0
WP626	34,69325	-78,60122	10	0	0	0
WP627	34,69325	-78,60122	10	0	0	0
WP628	34,69325	-78,60122	10	0	0	0
WP629	34,69325	-78,60122	10	0	0	0
WP6210	34,69325	-78,60122	10	66	0	0
WP6211	34,69325	-78,60122	10	0	0	0
WP6212	34,69325	-78,60122	10	12	0	0
WP6213	34,69325	-78,60122	10	0	0	0
WP6214	34,69325	-78,60122	10	0	0	0
WP6215	34,69325	-78,60122	10	7	0	0
WP6216	34,69325	-78,60122	10	76	0	0
WP6217	34,69325	-78,60122	10	61	0	0
WP6218	34,69325	-78,60122	10	68	0	0
WP6219	34,69325	-78,60122	10	123	0	0
WP6220	34,69325	-78,60122	10	266	0	0
WP6221	34,69325	-78,60122	10	125	0	0
WP6222	34,69305	-78,60080	10	391	0	0
WP6223	34,69305	-78,60080	10	100	0	0
WP631	34,69272	-78,60019	10	12	0	0
WP632	34,69272	-78,60019	10	52	0	0
WP633	34,69272	-78,60019	10	80	0	0
WP634	34,69272	-78,60019	10	157	0	0
WP635	34,69272	-78,60019	10	6	0	0
WP636	34,69272	-78,60019	10	20	0	0
WP637	34,69272	-78,60019	10	40	0	0
WP638	34,69272	-78,60019	10	56	0	0
WP639	34,69272	-78,60019	10	45	0	0
WP6310	34,69272	-78,60019	10	477	0	0
WP6311	34,69272	-78,60019	10	815	0	0
WP6312	34,69283	-78,60036	10	250	0	0
WP6313	34,69283	-78,60036	10	154	0	0
WP6314	34,69283	-78,60036	10	32	0	0
WP42	34,69363	-78,60044	120	87	0,6	0

WP43a	34,69344	-78,60050	120	90	ND	0
WP43b	34,69344	-78,60050	120	162	ND	0
WP44	34,69333	-78,60050	120	160	0,7	0,7
WP45	34,69313	-78,60050	120	118	0,8	0
WP46	34,69302	-78,60047	120	210	0,2	0,1
WP621	34,69325	-78,60122	10	21	0	0
WP622	34,69325	-78,60122	10	4	0	0
WP623	34,69325	-78,60122	10	4	0	0
WP624	34,69325	-78,60122	10	0	0	0
WP625	34,69325	-78,60122	10	0	0	0
WP626	34,69325	-78,60122	10	0	0	0
WP627	34,69325	-78,60122	10	0	0	0
WP628	34,69325	-78,60122	10	0	0	0
WP629	34,69325	-78,60122	10	0	0	0
WP6210	34,69325	-78,60122	10	66	0	0
WP6211	34,69325	-78,60122	10	0	0	0
WP6212	34,69325	-78,60122	10	12	0	0
WP6213	34,69325	-78,60122	10	0	0	0
WP6214	34,69325	-78,60122	10	0	0	0
WP6215	34,69325	-78,60122	10	7	0	0
WP6216	34,69325	-78,60122	10	76	0	0
WP6217	34,69325	-78,60122	10	61	0	0
WP6218	34,69325	-78,60122	10	68	0	0
WP6219	34,69325	-78,60122	10	123	0	0
WP6220	34,69325	-78,60122	10	266	0	0

Для оценки потоков водорода вблизи зарегистрированной максимальной его концентрации использовался зонд длиной 2 метра, который позволял отбирать газ с различной глубины (каждые 50 см) с помощью системы выдвижных наконечников (Gas Vapor Probe Kit). В качестве примера приведены результаты измерений, сделанные в месте пересечения Smith Bay и безымянной впадины (Рис. 80). Оценив коэффициент диффузии, эффективную пористость, градиент концентрации и применив закон Фика, можно рассчитать поток газа. Были получены следующие результаты (Табл. 23):

Табл. 23. Результаты расчётов потоков водорода.

Название места	Рассчитанный поток (м ³ /сутки)	Площадь структуры (км ²)	Суточный поток с единицы площади (м ³ /сут/км ²)
----------------	--	--	--

Smith Bay	750–1000	1,14	660–880
Arthur Road Bay	1000–1370	0,48	2240–3060
Jones Lake Bay	1120–2740	6,25	180–440
Свежая КСП внутри Jones Lake Bay	21–31	0,007	3000–4400

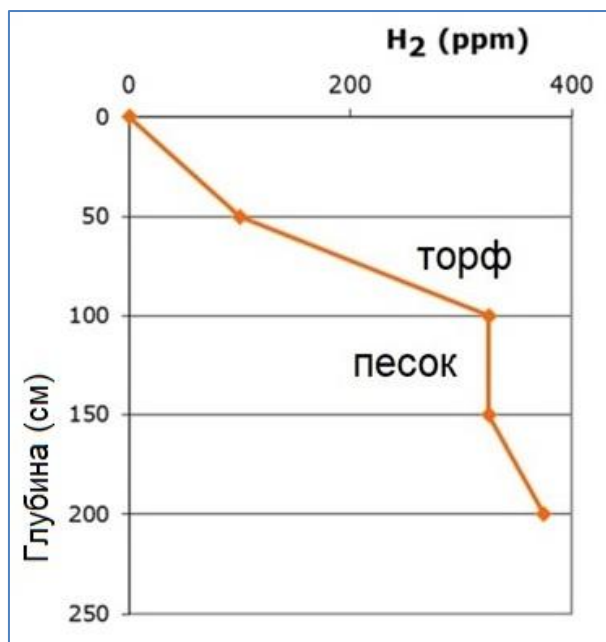


Рис. 80. Увеличение концентрации водорода с глубиной в месте обнаружения максимальных концентраций водорода к СЗ от Smith Bay [Zgonnik et al., 2015].

Табл. 24. Результаты газовой хроматографии образцов газа, отобранных в ходе экспедиции в Северную Каролину (США). Результаты полевых измерений были получены с помощью детектора GA2000 Plus, за исключением поля, отмеченного *, которые были измерены с помощью детекторов серии ВГ-2 (МИФИ). Расхождения между полевыми измерениями и лабораторными измерениями связаны с методом отбора проб. Полевые измерения обычно примерно в два раза превышали лабораторные [Zgonnik et al., 2015].

Место взятия проб	Координаты		Полев. изм. H_2 , ppm	Результаты газовой хроматографии						
	Широта (°N)	Долгота (°W)		H_2 ppm	O_2+Ar %	N_2 %	CH_4 ppm	CO_2 %	C_2H_6 ppm	C_3H_8 ppm
Arthur Road bay	34,79391	-79,22966	586	275	20,05	79,30	11	0,62	1	2
Arthur Road песчаный карьер	34,78694	-79,22666	>1200	605	19,37	79,28	735	1,21	1	1
Arthur Road песчаный карьер, пузыри	34,78705	-79,22691	-	0	2,84	35,04	53,57	8,56	0	0

Smith bay	34,68247	-78,58706	659	179	20,23	79,26	15	0,50	2	2
			715	146	20,32	79,15	11	0,51	0	0
			574	296	20,38	79,40	17	0,20	2	2
Небольшая молодая структура внутри Jones Lake bay	34,69302	-78,60047	210	107	20,12	79,61	194	0,23	0	0
	34,69305	-78,60080	391	167	16,51	79,35	27468	1,38	0	0
	34,69281	-78,60033	477	202	20,00	78,11	5875	1,28	0	0
	34,69282	-78,60034	815	463	18,67	78,66	13783	1,24	0	0

Великие равнины. Штат Небраска

Небраска привлекает внимание наличием большого количества КСП, которые, за редким исключением, имеют сухое дно, не покрыты лесом и поэтому, в большинстве своём, доступны для полевого изучения. На космических снимках КСП различимы плохо, тогда как на изображениях, полученных с помощью технологии LiDAR, они хорошо видны (Рис. 81).

При выборе объектов исследования целесообразно руководствоваться несколькими критериями: во-первых, это «фотогеничность» - структура должна представлять собой блюдцеподобное понижение и не должна внутри быть осложнена рельефом (валами, реками, оврагами и пр.); во-вторых, структура должна быть сухой; в-третьих, земля должна быть доступна для исследований и последующей разработки с точки зрения законодательства и в-четвертых, близость к потенциальному потребителю водорода (Напр. структура #3 и аммиачный завод в Geneva). Проведение полевой водородометрии на нескольких КСП показало, что они являются структурами дегазации водорода. Для более детальных исследований была выбрана структура (Рис. 82), координаты центра КСП N40,56527° W97,74468°, размером 2,65×3,34 км и расположенная между небольшими городами Sutton и Geneva. Для проведения полевой водородометрии на структуре был размечен профиль длиной 3800м, с шагом между точками 100м. Профиль проходил вдоль дороги, что позволило избежать согласований с владельцами участков, пересекал структуру с севера на юг и выходил

за её пределы. Полевая водородометрия показала перспективность данного участка (Рис. 82), и было принято решение о продолжении его изучения.

После нескольких полевых сезонов была получена исчерпывающая, в рамках выделенного бюджета, информация, которая позволила задать координаты исследовательской скважины.

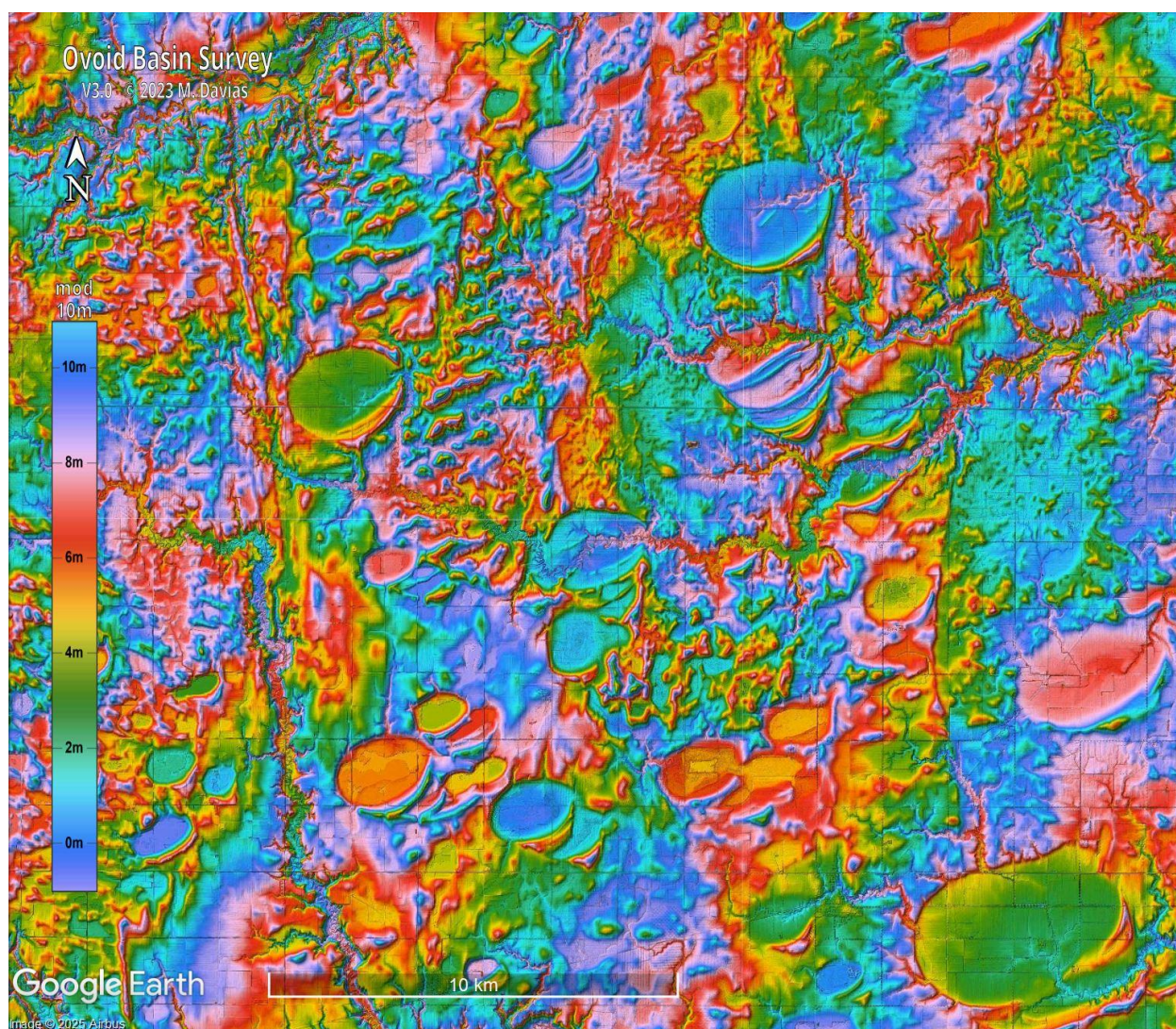


Рис. 81. Пример КСП на территории Clay County и Fillmore County в ЮВ части Штата Небраска. Изображение LiDAR (Слой Ovoid-basin-surveyLink V3-0 для Google Earth, источник: cintos.org)

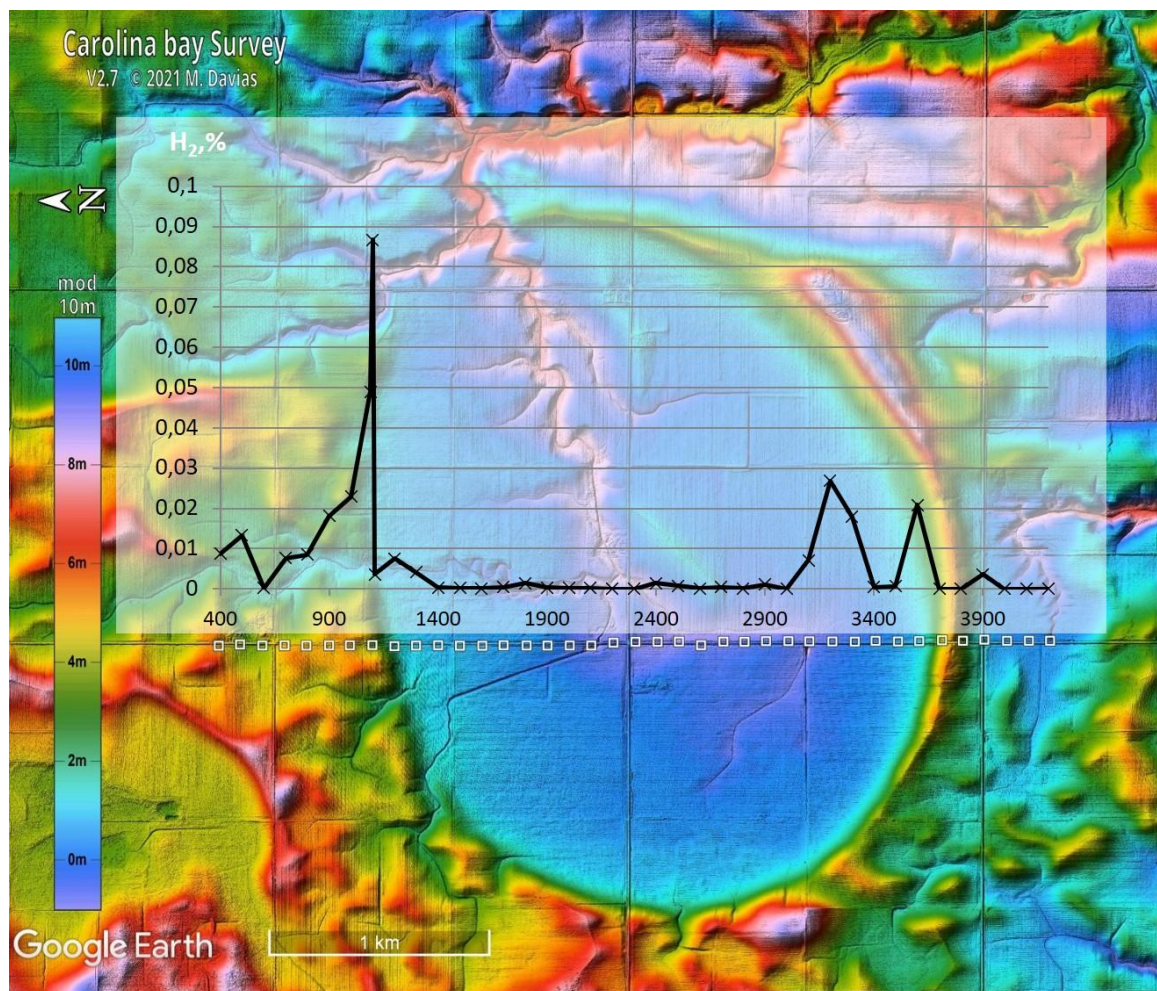


Рис. 82. Результаты полевой водородометрии на структуре NE#3

Табл. 25. Результаты полевой водородометрии на структуре NE#3 (Апр. 2016)

№ пикета	Широта N°	Долгота W°	H ₂ , ppm	№ пикета	Широта N°	Долгота W°	H ₂ , ppm
400	40,58468	-97,74816	87,5	2400	40,56672	-97,74806	14,2
500	40,58381	-97,74809	132,7	2500	40,56943	-97,74810	7,7
600	40,58289	-97,74814	2,6	2600	40,56493	-97,74806	0,9
700	40,58198	-97,74813	76,1	2700	40,56402	-97,74786	4,1
800	40,58109	-97,74814	84,9	2800	40,56316	-97,74787	0,8
900	40,58016	-97,74812	180,6	2900	40,56227	-97,74783	11,2
1000	40,57931	-97,74812	229,5	3000	40,56136	-97,74783	0,1
1100	40,57839	-97,74810	866,5	3100	40,56050	-97,74783	71,0
1200	40,57749	-97,74816	75,2	3200	40,55956	-97,74784	268,3
1300	40,57661	-97,74812	42,0	3300	40,55864	-97,74784	179,4
1400	40,57571	-97,74810	3,0	3400	40,55779	-97,74780	4,3
1500	40,57481	-97,74813	2,0	3500	40,55687	-97,74783	6,8
1600	40,57389	-97,74813	0,7	3600	40,55600	-97,74781	208,8
1700	40,57302	-97,74809	4,9	3700	40,55506	-97,74775	0,1
1800	40,57208	-97,74810	13,7	3800	40,55421	-97,74778	0,6
1900	40,57122	-97,74810	2,9	3900	40,55333	-97,74772	36,3
2000	40,57031	-97,74809	2,0	4000	40,55240	-97,74778	0,2
2100	40,56943	-97,74809	2,3	4100	40,55150	-97,74777	0,3

2200	40,56852	-97,74809	0,1	4200	40,55064	-97,74777	0,1
2300	40,56763	-97,74807	0,3				

3.11. Монголия

Структуры дегазации водорода в Монголии

В результате тектонических движений различных эпох, на территории Монголии сформировалась сложная мозаично-блоковая структура. Исходя из предположения, что границы тектонических блоков имеют повышенную проницаемость, был проведен анализ материалов ДЗЗ и выработаны критерии поиска структур дегазации водорода. Было выделено несколько перспективных полигонов, на которых дешифрированием обнаружены кольцевые структуры проседания, предположительно являющиеся структурами дегазации водорода.

Для проверки прогнозов, сделанных автором, были предприняты две полевых экспедиции в 2018 и 2019 годах, в ходе которых проведены полевые работы на четырёх полигонах в разных частях Монголии. Ниже приведена краткая информация о двух исследованных объектах в пределах двух полигонов в восточной части Монголии:

Структура #25 (Рис. 83) представляет собой эллиптическую депрессию размером $5,2 \times 4,0$ км, глубиной около 10 м. Через структуру расположенную были размечены два профиля перпендикулярных друг другу с шагом между точками отбора проб равным 100 м. Профиль 25–4 имел длину 6 км и состоял из 61 точки отбора проб. Грунтовые условия внутри западин и вне их существенно различны. Внутренняя часть западин (дно высохших озер) состоит из бело-голубой глины, по крайней мере до глубины 4,5 метра. Внешняя (берег высохшего озера), включая обрамляющий вал, представлена пылеватыми гравийными (кварц, кислые эффузивы и туфы) суглинками с большим количеством обломков агата и халцедона. Результаты исследований показали, что кольцевая структура проседания является структурой дегазации водорода, с аномально высоким (до 70%) содержанием водорода, приуроченным к борту депрессии.

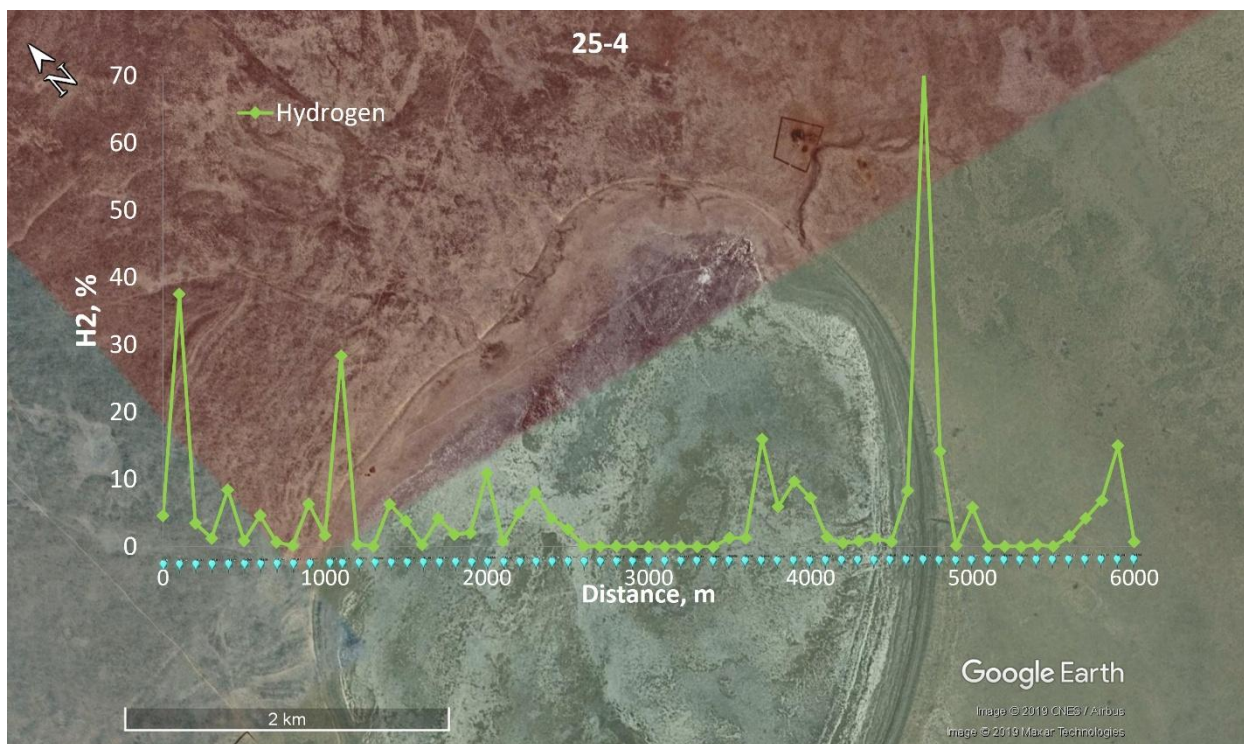


Рис. 83. Положение точек опробования на профиле 25–4 и график содержания водорода.

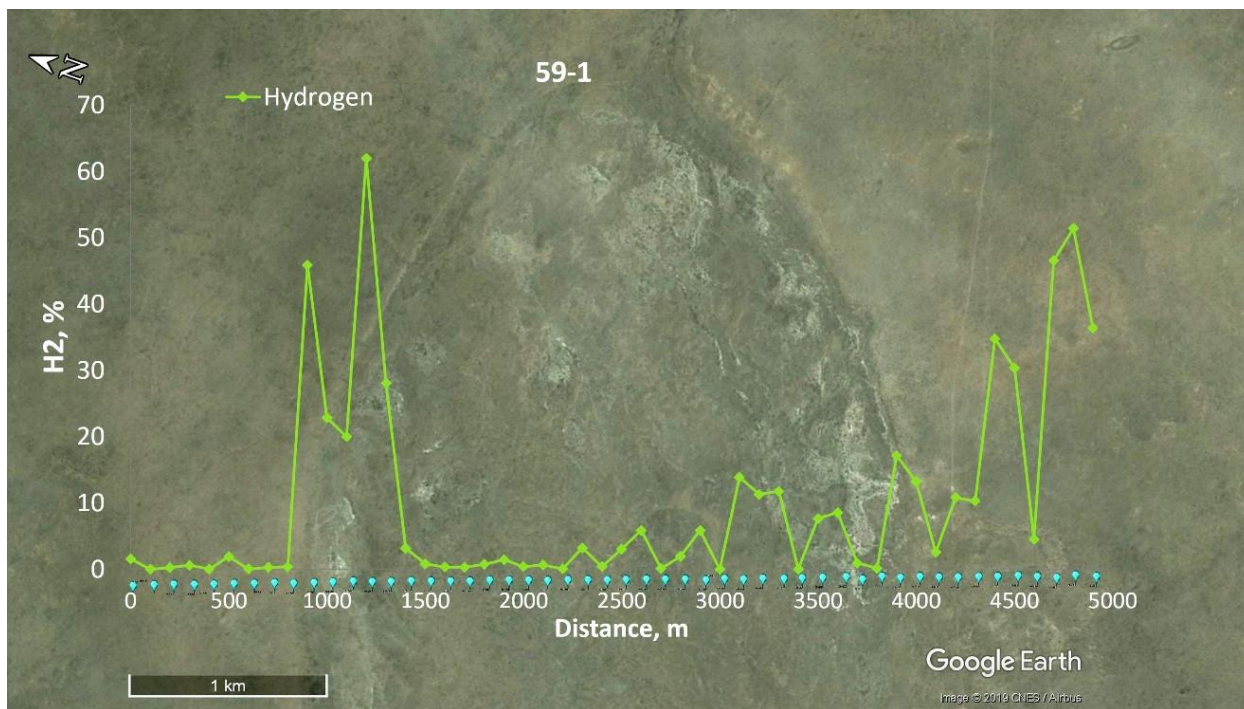


Рис. 84. Положение точек опробования на профиле 59–1 и график содержания водорода.

Структура #59 (Рис. 84) представляет собой эллиптическую депрессию рельефа размером 3×4 км и глубиной около 6 метров. Через структуру был проложен профиль длиной 4900 м состоящий из 50 точек опробования, сделанных с шагом 100 м. В качестве метода исследования было выбрано литогазогеохимическое опробование

приповерхностных отложений, включающее отбор проб грунта, их дегазацию и хроматографический анализ. Результаты показали, что кольцевая структура проседания является структурой дегазации водорода, с аномально высоким (более 60%) содержанием водорода, приуроченным к бортам депрессии.

Глава 4. Обсуждение результатов

Как было сказано выше, в 2006 году было обнаружено новое явление: водород способен подниматься к поверхности в форме компактных струй, а не в виде рассеянного потока, равномерно распределённого по площади. Этот момент можно считать отправным в проведенных исследованиях, которые были посвящены поискам и разведке структур дегазации водорода.

В 2007 году, благодаря открытию широкого доступа к космическим снимкам, предоставленному Google Earth, были дешифрованы первые кольцевые структуры проседания, которые, как показали дальнейшие полевые исследования, оказались структурами дегазации, к которым приурочены аномалии водорода, превышающие атмосферный фон (0,5 ppm) в тысячи раз.

Дальнейшие исследования этого феномена привели расширению географии полевых работ. В последующие годы изучение структур дегазации природного водорода проводилось в России: в Московской, Калужской, Тульской, Тверской, Ленинградской, Смоленской, Липецкой, Тамбовской, Воронежской, Волгоградской, Тамбовской, Рязанской, Оренбургской области, Северной Осетии, Иркутской обл., Бурятии, Читинской обл., на Сахалине; за рубежом: в Беларуси, Турции, Израиле, Омане, Индии, Монголии, Марокко, Западной Сахаре, США (в штатах Северная Каролина, Южная Каролина, Канзас, Небраска, Колорадо, Юта, Невада) и в Западной Австралии. Важно отметить, что все выделенные путём дешифрирования кольцевые структуры при полевом изучении были подтверждены как структуры проседания, с которыми были связаны аномальные содержания водорода. Надо заметить, что существенная часть полученных результатов не вошла в диссертацию по причинам,

связанным с нежеланием правообладателей раскрывать информацию или авторскими правами.

Ниже приводится обсуждение особенностей присущих различным типам структур дегазации водорода, их строение, сходство и различия, динамика развития, а также следствия из этого явления.

4.1. Различные типы структур дегазации водорода

4.1.1. Кольцевые структуры проседания.

Структуры дегазации этого типа более всего подходят для полевого изучения. Они фотогеничны, что позволяет успешно проводить их дешифрирование. КСП, в зависимости от региона, могут быть сухими, что облегчает их полевое изучение. КСП бывают различных размеров, автором изучались структуры с параметрами от 100 м в диаметре до 12х18 км. Структуры дегазации эволюционируют во времени, они могут появляться (Электросталь и Северная Каролина), разрастаться (напр. в р-не Армавира, Краснокаменска и др.), накладываться друг на друга (Северная и Южная Каролина). Таким образом, они являются динамичным явлением, которое происходит в настоящее время.

Измерения концентрации водорода различными методами показало его потоковую и сорбированную составляющую, а существование градиента концентраций свободного (несорбированного) водорода, измеренного на различной глубине, демонстрирует наличие потока водорода из глубины в направлении поверхности. Поток может меняться во времени и, судя по всему, в пространстве, что подтверждается измерением вариаций концентраций водорода и замерами на параметрической точке Д-14 в Дмитровском р-не.

4.1.2. Грядово-мочажинные болота.

Ещё один тип структур дегазации был открыт в сентябре 2017 года на полигоне Выдрино – Мурино, который расположен вдоль южного берега оз. Байкал, где были изучены торфяные грядово-мочажинные болота (см. Глава 3, Рис. 41). При этом появилась возможность объяснить их генезис с позиций истечения водорода из недр,

поставив под сомнение традиционные представления о причинах солифлюкции как пластическом течении по склону насыщенных водой почв и тонкодисперсных грунтов по водоупорному, обычно мерзлотному слою.

Наблюдения показали, что, во-первых, грядово-мочажинные болота являются структурами дегазации водорода и, во-вторых, они развиты на валунных отложениях, которые переработаны водородным метасоматозом в голубые глины. Иными словами, появление грядово-мочажинного болота, по крайней мере в ЮЗ обрамлении оз. Байкал, не связано с экзогенными процессами промерзания-оттаивания, а оно возникает на выходе водородной струи, которая перерабатывает валунные конгломераты докембрийских гранитоидов во вторичные глинистые минералы.

4.1.3. Торфяные болота.

Нам приходилось изучать торфяные болота и в других местах. Так, на Сахалине отрядом в составе Ларин Н.В. и Сысолин И.Г. было обследовано осушенное болото и подтвержден его статус как структуры дегазации водорода (Рис. 68). Объект исследования находился в южной части Сусунайской межгорной впадины, являющейся морфологическим выражением грабена – активной структуры, судя по наличию болот изометричной формы, являющимися структурами дегазации водорода. Все болота Московской и Ленинградской областей, на бортах и в пределах которых проводилась водородометрия или литогазогеохимическое опробование, как показали газогеохимические исследования, являются структурами дегазации водорода. Таким образом, наблюдения подтвердили первоначальный прогноз относительно природы торфяных болот, и тут уместно привести мнение Сывороткина В. Л. о том, что торфяные болота возникают и развиваются на водородных струях (устное сообщение).

4.1.4. Гари.

На упомянутом выше полигоне Выдрино – Мурино обнаружен еще один тип молодых структур дегазации, в которых процессы обусловленного водородом метасоматического изменения субстрата еще не успели проявиться, но периодическое самопроизвольное возникновение лесных пожаров имело место быть (см. Глава 3, Рис. 43). Если из недр поступает водород, то он может загораться по разным причинам – от

молнии, искры от пьезоэлектрического эффекта (напр. кварц в гранитных валунах) во время тектонических подвижек и других событий. Данное явление можно использовать в качестве поискового признака на водород при производстве полевых работ. О пожарах как о негативном факторе проявления водородной дегазации будет сказано ниже.

4.1.5. Разломы.

На участке Култук–Быстрая (ЮЗ продолжение оз. Байкал)и была проведена полевая водородометрия вкрест Главного Саянского разлома (см. Гл. 3, Рис. 50).

Было обнаружено, что максимум водорода приурочен к висячему (ЮЗ) боку разлома (см. Рис. 50). Объяснение этого факта заключается в том, что, во-первых, поднимающийся по разлому водород стремится использовать несплошности среды, двигаясь параллельно плоскости сместителя вдоль направления, например кливажа. Во-вторых, градиенты давления указывают водороду путь вертикально вверх. Сочетание этих двух факторов приводит к тому, что максимальный поток водорода и, как следствие, максимальные его концентрации вблизи поверхности, нужно ожидать под висячим боком разлома. Это предположение было успешно подтверждено в поле и может служить руководством при поиске природного водорода. Нужно только учитывать, что далеко не все разломы газят водородом. Так, исследования на южном Урале показали, что листрические разломы, которые выполаживаются на небольшой глубине, в деле поиска природного водорода оказались бесперспективны.

Приведенный перечень, по-видимому, будет дополнен при дальнейших исследованиях.

4.2. Положение водородного максимума на профиле через КСП.

Как было обнаружено, поднимающийся к поверхности водород формирует геохимические аномалии. Геохимические аномалии подвижных компонентов приурочены к зонам повышенной проницаемости. Выше была описана колонна поднимающегося сквозь литосферу водородного газа – водородопровода, который на всём своём протяжении вызывает изменение вмещающих пород и появление не только

пористости, но и минерализованных вод. Возможен вариант развития, когда при подъеме к поверхности минерализованный водо-водородный флюид будет сбрасывать свою минерализацию (в первую очередь из-за снижения температуры и давления), которая будет заполнять наведенную ранее пористость. Запечатывание пор приведет к формированию плохо проницаемой покрышки или пробки в верхней части водородопровода.

Возможен и другой вариант развития водородопровода. Поднимающийся к поверхности водород преобразовывает безводные силикаты в водные, при этом проницаемость преобразованной колонны падает до нуля, и водород начинает распространяться по внешней границе водородопровода и вмещающих толщ. При этом происходит дальнейшая переработка силикатов и увеличение диаметра водородопровода, что на поверхности выражается в разрастании КСП.

Оба приведенных варианта развития не исключают друг друга и, скорее всего, существуют совместно.

Поднимающийся водород при обтекании непроницаемой пробки по периметру закономерно вызовет появление повышенных содержаний водорода в узкой полосе на границе и за пределами КСП. Это предположение было многократно проверено при проведении полевой водородометрии и литогазогеохимического опробования. Форма пробки-покрышки пока не ясна, но она может быть достаточно протяженной в глубину, что и показала скважина, пробуренная до глубины 11287 футов (3440 м).

В том случае, когда аномалии водорода приурочены к центральной части КСП, можно предположить, что структура дегазации образовалась недавно (Рис. 38) или, возможно, это зрелая структура, в которой покрышка была нарушена или по каким-то причинам не сформировалась (Рис. 37). В любом случае ответ на этот вопрос еще предстоит выяснить.

4.3.Источник природного водорода

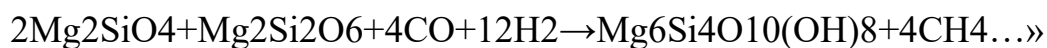
Было предложено множество различных гипотез для объяснения происхождения природного водорода, встречающегося в различных геологических условиях [Smith et

al., 2005]. Среди них реакции минералов с водой, дегазация ядра и мантии, биогенные, радиолиз и др. Большинство авторов в качестве основного механизма генерации водорода рассматривается серпентинизация, тогда как другие механизмы, такие как радиолиз или биогенез, привлекаются реже. В последнее время широко обсуждается источник водорода связанный с процессами окисления двухвалентного железа в формациях железистых кварцитов [Geymond et al., 2022, 2023].

Происхождение водорода в офиолитовых комплексах, в том числе и в офиолитах Омана, обсуждалось в недавней статье [Vacquand и др., 2018]. Некоторые авторы предполагают, что водород может образовываться в результате реакции воды с недавно обнажившимися поверхностями свежих минералов [Sugisaki et al., 1983; Wakita et al., 1980] или что он может выделяться из закрытых пор или флюидных включений в горных породах [Fong-liang, Gui-ru, 1981; Giardini, Subbarayudu, Melton, 1976], которые разрушаются при бурении.

Наши исследования в Омани показали, что водород обнаруживается только в проницаемом субстрате (пористом, трещиноватом и пр.). Просачивание H₂ в этих породах классически интерпретируется как результат восстановления грунтовых вод в процессе серпентинизации перидотитов, хотя по результатам полевых работ, наибольший поток водорода был зафиксирован не в серпентинизированных перидотитах, а в структурно расположенных ниже докембрийских гранитах [Zgonnik et al., 2019]

Р.М. Юркова с коллегами [Юркова, Воронин, 2008], на основании термодинамических и экспериментальных данных, а также расчётов баланса вещества, пришли к выводу, что «... в процессе ранней петельчатой безмагнетитовой серпентинизации за счёт оливина образовались антигорит с параметром элементарной ячейки $a=35,5\text{\AA}$ и природный сплав железо-никель состава тэнита в виде мельчайших (2–5 мкм) включений в антигорите. Формирование структурносвязанной воды в антигорите могло быть обусловлено участием в процессе серпентинизации восстановительных флюидов последовательно по схеме:



Автор настоящей работы придерживается концепции о существовании первичного водорода, запасенного в ядре Земли в процессе её аккреции [Larin, 1993; Ларин, 2005].

4.4. Эволюция структур дегазации водорода.

Структуры дегазации водорода являются, судя по скорости развития некоторых из них, современным и достаточно динамичным явлением. Выявлены случаи их возникновения, разрастания и затухания. Отдельно нужно отметить взаимодействие разновозрастных структур. Эти процессы могут иметь достаточно разнообразные проявления, такие как наложение более молодой структуры на старую (Рис. 85 **Ошибка! Источник ссылки не найден.**), или возникновение оторочки молодых сателлитов вокруг. Этапы их развития можно оценить количественно, изучив распределение кольцевых структур по размерам, при этом устанавливаются некоторые закономерности: мелких структур больше, чем крупных, мелкие газят интенсивнее, и их возраст моложе.

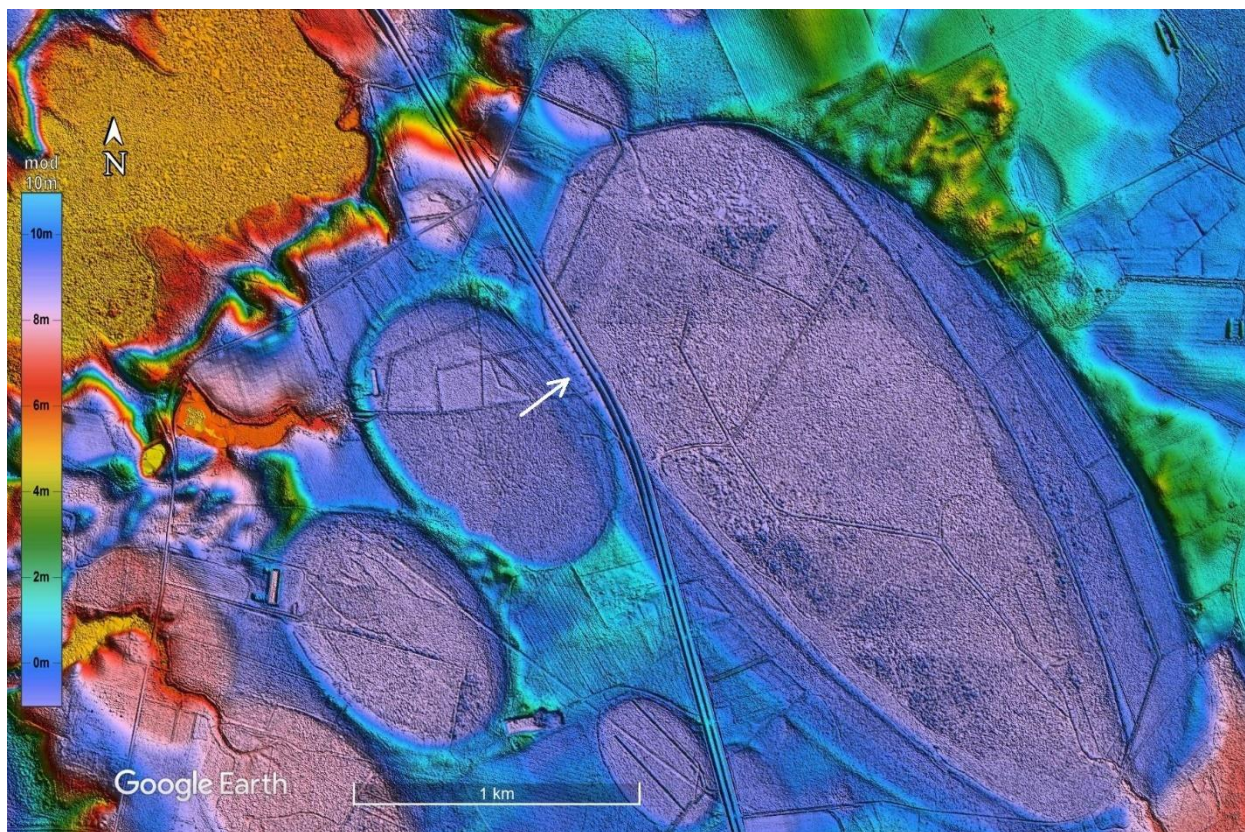


Рис. 85. Наложение структур дегазации (показано стрелкой). Меньшая по размеру – моложе. Южная Каролина, США. Изображение получено с помощью технологии LiDAR.

Кольцевые структуры проседания достаточно уверенно дешифрируются современными методами на всех, за исключением Антарктиды, континентах. Но ими список структур дегазации не исчерпывается – на предмет водородной дегазации недр были изучены торфяные болота, в том числе грядово-мочажинные, разломы и места регулярных возникновений природных пожаров. Все вышеперечисленные объекты были подтверждены как структуры, через которые водород выходит из недр.

4.5.О необходимости проведения опытно-методических работ

Любое новое дело, будь то изучение нового объекта или новый метод исследования, должно предваряться опытно-методическими работами, по результатам которых выбирается оптимальная методика опосредования. Но в деле поиска природного водорода есть свои особенности, которые изложены ниже:

Во-первых, это сложность самого объекта исследования. В настоящий момент никто доподлинно не знает, и нет единого мнения, в том как устроены различные типы каналов дегазации природного водорода в глубине, где расположены, и что является источниками водорода, а также глубины различных зон, их вторичные изменения, сопутствующие компоненты и т.д. и т.д. Всё вышеперечисленное приводит к тому, что для природного водорода пока еще не выработаны надежные поисковые критерии.

Во-вторых, пока не наработаны достоверные представления о том, как искать природный водород. Специалистами накоплено слишком мало опыта, а тех знаний, которые накоплены в части поиска месторождений УВ, может оказаться недостаточно. Поэтому отдельные группы энтузиастов пока еще работают в этом направлении вслепую и часто совершают методические ошибки. Также не существует общепринятых методик поиска природного водорода, и для различных объектов они тоже могут различаться. Полевой опыт показал, что, в частности, применимость тех или иных методов пробоотбора связана в первую очередь со свойствами грунтов, их пористостью, проницаемостью, минеральным и гранулометрическим составом.

В-третьих, необходимо соблюдать стадийность разведочных работ, начиная с предварительного камерального изучения, постановки задач, разметки профилей или

сети наблюдений, обработки материала и т. д.

Например, было обнаружено, что при поисковых работах на сухих песчаных, супесчаных и суглинистых грунтах стандартная методика экспресс-замеров потокового водорода как правило не работает, поэтому провести измерения удастся далеко не всегда. В этом случае целесообразно применять более затратное, трудоёмкое и ресурсоёмкое литогазогеохимическое опробование, которое позволяет измерить сорбированный водород, а также другие газы. Поисковые работы в Монголии показали, что результаты газогеохимических исследований, в зависимости от методики пробоотбора, могут различаться на 4 порядка (13 ppm против 67%).

То же самое касается существенно глинистых грунтов, в которых есть открытые трещины (Рис. 56), через которые происходит газообмен между субстратом и атмосферой. В таких условиях, как показали измерения на дне оз. Эксенд (Еравнинские озера в Бурятии), водород улетучивается в атмосферу, и зафиксировать значимые его концентрации не представляется возможным.

Как было сказано выше, в ряде случаев верхняя часть разреза структур дегазации водорода представлена глинами. Эта особенность строения структур дегазации наблюдалось на Байкале (участок Выдрино–Мурино), на Сахалине (синие глины подстилали торф), в Марокко, в Монголии (было пробурено около 8 метров белоголубых глин, глубже не позволила неисправность бурового станка) и в Небраске (США), где бурение до глубины 11000 футов (3353м) показало, что все породы вторично изменены и представляют собой агрегат состава глина + кварц (по гранитам) или глина + хлорит (по габбро). Так как проницаемость глин близка к нулю, поэтому глиняная «пробка», участвующая в строении водородопровода, не пропускает водород. Всё вышесказанное накладывает определенные требования к постановке поисковых работ.

В-четвертых, все существующие геофизические методы разработаны для поисков известных типов месторождений. Так, например, широко используемые для поисков углеводородов сейсмические методы пока не применялись для поисков природного водорода. Геофизические методы являются достаточно затратным,

поэтому, в связи с новизной объекта, потребуются определенные ресурсы и продолжительное время для адаптации существующих приложений к делу поиска природного водорода.

Заключение

В результате многолетней работы было выяснено как проявляется канал дегазации водорода на поверхности, какие бывают типы структур дегазации, к каким геологическим и тектоническим структурам они бывают привязаны. Были сделаны наблюдения за развитием структур дегазации (кольцевых структур проседания) во времени, их взаимодействие между собой и с окружающими геологическими структурами.

При грамотном использовании этих наработок возможно осуществлять планирование дальнейших детальных площадных геохимических исследований, постановку задач для применения геофизических методов разведки, поискового бурения и дальнейший успешный поиск месторождений природного водорода. Можно считать, что поставленные цели были достигнуты.

Были успешно решены следующие задачи:

1. Обнаружены структуры дегазации природного водорода. Показано, что водород выходит на поверхность не в рассеянном состоянии, а в виде достаточно компактных струй. Можно считать этот факт основополагающим для всего исследования, без него данная работа не имела бы практического применения.

2. Разработаны методики полевой водородометрии, позволяющие оперативно (на месте) измерять содержание водорода, проведена адаптация водородных газоанализаторов для полевых измерений.

3. Усовершенствована методика литогазогеохимического опробования приповерхностных отложений с последующей термовакуумной дегазацией отобранных проб. Создана мобильная лаборатория, позволяющая проводить пробоподготовку и газовую хроматографию на месте проведения полевых работ.

4. Применены различные методы (дистанционные, прямые и косвенные) изучения структур дегазации водорода. Из всех доступных и известных автору методов исследования была проведена выборка, отвечающая задачам геохимического поиска ПВ.

5. Обнаружено, что природный водород не демонстрирует какой-либо привязки к определенным типам пород. Определяющим фактором является, по всей видимости, тектоническое строение территории – наличие разломов и проницаемых зон, связанных с ними. Полученные данные могут явиться хорошим подспорьем при картировании разломов на любой изучаемой территории.

6. Изучение автором структур дегазации водорода в Евразии, Северной Америке, Африке и Австралии показало их общие черты, что свидетельствует о планетарных масштабах этого явления.

Список литературы

1. Войтов, Г. И. Газопроявления в рудниках // Рудничная аэрология. Изд-во АН СССР, 1962. С. 127–144
2. Войтов Г. И. О химическом составе газов Кривого Рога //Геохимия. – 1971. – №. 11. – С. 1324-1331.
3. Войтов Г. И. Химизм и масштабы современного потока природных газов в различных геоструктурных зонах Земли //Журнал Всесоюзного химического общества. – 1986. – Т. 31. – №. 5. – С. 533-540.
4. Войтов Г. И. О холодной дегазации метана в тропосферу Земли //Теоретические и региональные проблемы геодинамики. Труды Геологического Ин-та РАН. – 1999. – №. 515. – С. 242-251.
5. Жаров А. Э., Гальверсен В. Г. (2001). Государственная геологическая карта РФ масштаба 1:200000. Лист L-54-X,XI.
6. Заварицкий А.Н. Коренные месторождения платины на Урале // Материалы по общей и прикладной геологии. Вып. 108. СПб, 1928. С. 1-51.
7. Зингер А. С. Молекулярный водород в составе газа, растворенного в водах месторождений Нижнего Поволжья //Геохимия. – 1962. – Т. 10. – С. 890-898.
8. Кравцов А. И., Войтов Г.И., Фридман А.И. О содержании водорода в свободных струях в Хибинах //Докл. АН СССР. – 1967. – Т. 178. – №. 5. – С. 1190.
9. Ларин В. Н. Наша Земля //М.: Агар. – 2005.
10. Леин А. Ю., Гричук Д. В., Гурвич Е. Г., Богданов Ю. А. Новый тип гидротермальных растворов, обогащенных водородом и метаном, в рифтовой зоне Срединно-Атлантического хребта //Доклады академии наук. – Федеральное государственное бюджетное учреждение "Российская академия наук", 2000. – Т. 375. – №. 3. – С. 380-383.
11. Летников Ф. А., Дорогокупец П. И. К вопросу о роли суперглубинных флюидных систем земного ядра в эндогенных геологических процессах //Доклады

академии наук. – Федеральное государственное бюджетное учреждение"
Российская академия наук", 2001. – Т. 378. – №. 4. – С. 535-537.

12. Летников Ф. А. Глубинные флюиды Земли //Российская наука: грани творчества на грани веков. М., Научный мир. – 2000. – С. 333-340.

13. Лидин Г. Д., Матвиенко Н. Г., Зимаков Б. М., Гагауз Ф. Г., Вардоиани Э. Ю., Переверзов В. В. Новые данные о выделениях водородных природных газов из ультраосновных пород //Докл. АН СССР. – 1982. – Т. 264. – №. 5. – С. 1224-1228.

14. Маракушев А. А., Маракушев С. А. Водородное дыхание Земли-его происхождение, геологические и биологические следствия //Альтернативная энергетика и экология. – 2008. – №. 1. – С. 152-170.

15. Менделеев Д. И. Выписка из протокола заседания химического отделения Русского физико-химического общества // Журнал Русского физико-химического общества. – 1888. – Т. 20. – Нет. 5. – С. 536.

16. Морачевский Ю. В., Самарцева А. Г., Черепенников А. А. Газоносность толщи калийных солей Верхнекамского месторождения //Калий. – 1937. – Т. 7. – С. 24-31.

17. Несмелова З. Н., Рогозина Е. А. (1963). К вопросу о водороде в природных газах. Геохимический Сборник, Вып.8, 1963, С. 27–35.

18. Нечаева, О. Л. К вопросу о водороде в газах, растворенных в водах Западно-Сибирской низменности. // Доклады АН СССР, 179(4), С. 961–962

19. Нивин В. А. Газовые компоненты в магматических породах: геохимические, минерогенические и экологические аспекты и следствия (на примере интрузивных комплексов Кольской провинции) //Автореф. докт. геол. мин. наук. Москва: ГЕОХИ РАН. – 2013.

20. Павлова В. В., Грознова Т. Н., Лейкум М. С., Платонов Е. Г., Афанасов, М. Н. (2001). Государственная геологическая карта РФ масштаба 1:200000. Лист М-50-XXII.

21. Перчук Л. Л. Флюиды в нижней коре и верхней мантии Земли //Вестник МГУ, Сер. Геология. – 2000. – №. 4. – С. 25-36.

22. Пиковский Ю. И. Некоторые особенности состава природных газов из нижнекембрийских отложений Иркутского амфитеатра //Геология и геофизика. – 1963. – №. 5. – С. 59-67.
23. Пуха В. В., Нивин В. А., Мокрушина О. Д. Вариации концентраций молекулярного водорода в рыхлых отложениях Хибинского и Ловозерского массивов и их экзоконтактных зон. Труды Ферсмановской Научной Сессии ГИ КНЦ РАН. 2022. 19. С. 312–317.
24. Суханова Н. И., Ларин Н. В., Кирюшин А. С. Влияние эндогенного потока водорода на химические свойства почв //Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2014. – Т. 10. – №. 1. – С. 214-220.
25. Суханова Н. И., Трофимов С. Я., Полянская Л. М., Ларин Н. В., Ларин, В. Н. Изменение гумусного состояния и структуры микробной биомассы в местах водородной эксгаляции //Почвоведение. – 2013. – №. 2. – С. 152-152.
26. Сывороткин В. Л. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы. ООО «Геоинформцентр» //Москва. – 2002.
27. Сывороткин В. Л. Дегазация Земли и разрушение озонового слоя //Природа. – 1993. – №9. – С. 35-45.
28. Сывороткин В. Л. Экспериментальное подтверждение водородной концепции разрушения озонового слоя Земли //Система планета Земля. Материалы XIII научного семинара, М. – 2005. – С. 265-267.
29. Уханов А. В., Девирц А. Л., Иванов Н. Д. Изотопно-легкий водород на Кемпирсае (Южный Урал) //Доклады. АН СССР. – 1987. – Т. 293. – №. 3. – С. 700-704.
30. Фридман А. И. Природные газы рудных месторождений. – Недра, 1970.
31. Черепенников А. А. Водород в природных газах и, в частности, в эффузивных породах в Ириклинском ущелье на Южном Урале //Сб. посвященный 50летию научной и педагогической деятельности ВИ Вернадского, АН СССР, М. – 1936

32. Шишов С. И. География и почвенно-геохимические особенности урочищ западин в пределах Рязанской области //Вестник Рязанского государственного университета им. С.А. Есенина. – 2010. – №. 28. – С. 116-129.
33. Юркова Р. М., Воронин, Б. И. (2006). Термодинамические условия формирования ранних серпентинитов в ассоциации с углеводородными флюидами. Вестник Отделения Наук о Земле РАН. – 2006. – №1(24). – С. 1–2.
34. Юркова Р. М., Воронин Б. И. Включения водорода и метана в серпентинах офиолитовой ассоциации //Материалы XIII Межд. Конф. по термобарогеохимии и IV симпозиума APIFIS. – 2008. – Т. 1. – С. 237-240.
35. Юркова Р. М., Воронин Б. И. Значение мантийной серпентинизации ультрабазитов для интерпретации геофизических данных //Вестник Отделения наук о Земле РАН. – 2008. – №. 1. – С. 26.
36. Юркова Р. М., Воронин, Б. И. Формирование и миграция мантийных углеводородных флюидов в связи с подъёмом офиолитового диапира. //Материалы 1-й Всероссийской конференции по глубинному генезису нефти «Кудрявцевские Чтения». – 2012. – С. 203-207
37. Юркова Р. М., Слонимская, М. В., Дайняк, Б. А., Дриц, В. А. Водород и метан в серпентинах различных генетических типов (на примере Сахалина и Корягского нагорья) //Докл. АН СССР. – 1982. – №. 2. – С. 420-425.
38. Angino E. E., Coveney R. M. J., Goebel E. D., Zeller E. J., Dreschhoff G. A. Hydrogen and nitrogen—Origin, distribution, and abundance, a followup //Oil & Gas Journal. – 1984. – Т. 82. – №. 49. – С. 142-146.
39. Angino E. E., Zeller E. J., Dreschhoff G. A. M., Goebel E. D., Coveney R. M. J. Anomalous hydrogen soil gas concentrations: relations to Kansas gravity, magnetic and structural anomalies //Geological Society of America Abstracts, c. – 1988. – Т. 4636.
40. Angino E. E., Zeller E. J., Dreschhoff G. A. M., Goebel E. D., Coveney, R. M. J. Spatial distribution of hydrogen in soil gas in central Kansas, USA //Geochemistry of gaseous elements and compounds. – 1990. – С. 485-493.

41. Beaumont V., Vacquand C., Deville E., Prinzhofer A. Hydrogen generation during serpentinisation in ophiolite complexes: a comparison of H₂-rich gases from Oman, Philippines and Turkey //Geophys. Res. Abstr. – 2013. – T. 15.
42. Bohdanowicz C. Natural gas occurrences in Russia (USSR) //AAPG Bulletin. – 1934. – T. 18. – №. 6. – C. 746-759.
43. Cha J., Lee J.-Y. (2023). A review on occurrence, mechanism and distribution of natural hydrogen as a promising energy source. // Journal of the Geological Society of Korea. – 2023. – T. 59. – №. 3. – C. 513-526.
44. Charlou J.-L., Konn C., Donval J. P., Guyader V., Perez F., Mugler C., Jean-Baptiste P., Fourre E. Hydrogen and methane fluxes from the ultramafic-hosted hydrothermal systems on the Mid-Atlantic Ridge. // Goldschmidt Conference. – 2012. – p. 1565.
45. Combaudon V., Moretti I., Kleine B., Stefansson A. Hydrogen emissions from hydrothermal fields in Iceland and comparison with the Mid-Atlantic Ridge //International Journal of Hydrogen Energy. – 2022. – T. 47. – №. 18. – C. 10217-10227.
46. Coveney R. M. J., Goebel E. D., Zeller E. J., Dreschhoff G. A. M., Angino E. E. Serpentinization and the origin of hydrogen gas in Kansas //AAPG Bulletin. – 1987. – T. 71. – №. 1. – C. 39-48.
47. Cruikshank D. P., Morrison D., Lennon K. Volcanic gases: hydrogen burning at Kilauea Volcano, Hawaii //Science. – 1973. – T. 182. – №. 4109. – C. 277-279.
48. Deville E., Hassan K. M., Ahmed K. M., Prinzhofer, A., Pelissier N., Guélard, J., Noirez S., Magareh H.M. , Said I. O. H₂ generation versus H₂ consumption in volcanic gas systems: A case study in the Afar hot spot in Djibouti //Applied Geochemistry. – 2023. – T. 156. – C. 105761. DOI: 10,1016/j.apgeochem,2023,105761
49. Etiope G. Massive release of natural hydrogen from a geological seep (Chimaera, Turkey): Gas advection as a proxy of subsurface gas migration and pressurised accumulations //International Journal of Hydrogen Energy. – 2023. – T. 48. – №. 25. – C. 9172-9184. DOI: 10,1016/j.ijhydene,2022,12,025

50. Evans C. S. Playas in Kansas and the high plains. – Kansas Geological Survey, Geology Extension, University of Kansas, 2010. – T. 30.
<http://www.kgs.ku.edu/Publications/PIC/pic30.html>
51. Evans W. C., Banks N. G., White L. D. Analyses of gas samples from the summit crater //US Geol Surv Prof Paper. – 1981. – T. 1250. – C. 227-231.
52. Farrell K. M., Harris W. B., Mallinson D. J., Culver S. J., Riggs S. R., Wehmiller J. F., Moore J. P., Self-Trail J. M., Lautier J. C. Graphic Logging For Interpreting Process-Generated Stratigraphic Sequences and Aquifer/Reservoir Potential: With Analog Shelf To Shoreface Examples From the Atlantic Coastal Plain Province, U.S.A//Journal of Sedimentary Research. – 2013. – T. 83. – №. 8. – C. 723-745.
53. Fong-liang J., Gui-ru L. Experimental studies of the mechanisms of seismo-geochemical precursors //Geophysical Research Letters. – 1981. – T. 8. – №. 5. – C. 473-476. DOI: 10,1029/GL008i005p00473
54. Frery E., Langhi L., Mainson M., Moretti I. Natural hydrogen seeps identified in the North Perth Basin, Western Australia. //International Journal of Hydrogen Energy. – 2021. – T. 46. – №. 61. – C. 31158-31173. DOI: 10,1016/j.ijhydene,2021,07,023
55. Geymond U. et al. Reassessing the role of magnetite during natural hydrogen generation //Frontiers in Earth Science. – 2023. – T. 11. – C. 1169356. DOI: 10,3389/feart,2023,1169356
56. Geymond U., Ramanaidou E., Lévy D., Ouaya A., Moretti I. Can Weathering of Banded Iron Formations Generate Natural Hydrogen? Evidence from Australia, Brazil and South Africa //Minerals. – 2022. – T. 12. – №. 2. – C. 163. DOI: 10,3390/min12020163
57. Giardini A. A., Subbarayudu G. V., Melton C. E. The emission of occluded gas from rocks as a function of stress: Its possible use as a tool for predicting earthquakes //Geophysical Research Letters. – 1976. – T. 3. – №. 6. – C. 355-358. DOI: 10,1029/GL003i006p00355

58. Glenn L. C. Some Notes on Darlington (SC), 'Bays.' //Science. – 1895. – T. 2. – №. 41. – C. 472-475. DOI: 10,1126/science,2,41,472
59. Goebel E. D., Coveney R. M. J., Angino E. E., Zeller E. J. Naturally occurring hydrogen gas from a borehole on the western flank of Nemaha anticline in Kansas //AAPG Bulletin. – 1983. – T. 67. – №. 8. – C. 1324-1324.
60. Halas P., Dupuy A., Franceschi M., Bordmann V., Fleury J.-M., Duclerc D. Hydrogen gas in circular depressions in South Gironde, France: Flux, stock, or artefact? //Applied Geochemistry. – 2021. – T. 127. – C. 104928. DOI: 10,1016/j.apgeochem,2021,104928
61. Harrington D., Denny E. H. Gases that Occur in Metal Mines. – US Government Printing Office, 1931. – T. 347.
62. Hawkes H. E. Geothermal hydrogen //Mining Engineering. – 1980. – T. 1. – №. 6. – C. 671-675.
63. Hunt C. W. The Primordially Hydridic Character of our Planet and Proving it by Deep Drilling //Frontiers of Fundamental Physics. – Boston, MA : Springer US, 1984. – C. 315-319.
64. Jacquemet N., Prinzhofer A. The association of natural hydrogen and nitrogen: The ammonium clue? //International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – T. 50. – C. 161-174. DOI: 10,1016/j.ijhydene,2023,07,265
65. Johnson D. The origin of the Carolina Bays. – Columbia University Press, 1942. DOI: doi:10,7312/john93900
66. Karsten C. J. B. Handbuch der Eisenhüttenkunde / Von den Eisenerzen, von den Brennmaterialien und von den Gebläsen. Reimer, 1835.
67. Kusky T., Robinson C., El-Baz F. Tertiary–Quaternary faulting and uplift in the northern Oman Hajar Mountains //Journal of the Geological Society. – 2005. – T. 162. – №. 5. – C. 871-888.
68. Larin N., Zgonnik V., Rodina S., Deville E., Prinzhofer A., Larin V. N. Natural Molecular Hydrogen Seepage Associated with Surficial, Rounded Depressions on the European Craton in Russia //Natural Resources Research. – 2015. – T. 24. – №. 3. – C. 369-383. DOI: 10,1007/s11053-014-9257-5

69. Larin V. N. Hydridic Earth: The New Geology of Our Primordially Hydrogen-Rich Planet (C.W. Hunt (ed.)). – Calgary: Polar Publishing, 1993.
70. Larin V. N. Rift Zones as an Inexhaustible Source of Hydrogen on Earth (New Perspectives of Ecologically Clean Energetics) //Journal of New Energy. – 1996. – T. 1. – C. 106-107. <http://www.padrak.com/ine/JNEV1N2.html>
71. Lefeuvre N., Truche L., Donzé F. V., Gal F., Tremosa J., Fakoury R. A., Calassou S., Gaucher E. C. Natural hydrogen migration along thrust faults in foothill basins: The North Pyrenean Frontal Thrust case study //Applied Geochemistry. – 2022. – T. 145. – C. 105396. DOI: 10,1016/j.apgeochem,2022,105396
72. Liu J., Liu Q., Xu H., Zhu D., Meng Q. Genesis and energy significance of natural hydrogen //Unconventional Resources. – 2023. – T. 3. – C. 176-182.
73. Lukin A., Koliabina I., Shestopalov V., Rud A. Native aluminum as indicator of hydrogen degassing in the formation of hydrocarbon fields //Geofizicheskiy Zhurnal. – 2023. – T. 45. – №. 1. DOI: 10,24028/gj.v45i1,275130
74. Maiga O., Deville E., Laval J., Prinzhofer A., Diallo A. Characterization of the spontaneously recharging natural hydrogen reservoirs of Bourakebougou in Mali //Scientific Reports. – 2023. – T. 13. – №. 1. – C. 11876. DOI: 10,1038/s41598-023-38977-y
75. Malvoisin B., Brunet F. Barren ground depressions, natural H₂ and orogenic gold deposits: Spatial link and geochemical model //Science of the Total Environment. – 2023. – T. 856. – C. 158969. DOI: 10,1016/j.scitotenv,2022,158969
76. Mathur Y., Awosiji V., Mukerji T., Scheirer A., Peters K. Soil geochemistry of hydrogen and other gases along the San Andreas Fault//International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – T. 50. – C. 411-419. DOI: 10,31223/X5D67V
77. Moretti I., Geymond U., Pasquet G., Aimar L., Rabaute A. Natural hydrogen emanations in Namibia: Field acquisition and vegetation indexes from multispectral satellite image analysis //International Journal of Hydrogen Energy. – 2022. – T. 47. – №. 84. – C. 35588-35607. DOI: 10,1016/j.ijhydene,2022,08,135
78. Moretti I., Prinzhofer A., Françolin J., Pacheco C., Rosanne M., Rupin F., Mertens J. Long-term monitoring of natural hydrogen superficial emissions in a

brazilian cratonic environment. Sporadic large pulses versus daily periodic emissions //International Journal of Hydrogen Energy. – 2021. – T. 46. – №. 5. – C. 3615-3628. DOI: 10,1016/j.ijhydene,2020,11,026

79. Neal C., Stanger G. Hydrogen generation from mantle source rocks in Oman //Earth and Planetary Science Letters. – 1983. – T. 66. – C. 315-320.. DOI: 10,1016/0012-821X(83)90144-9

80. Newell K. D., Doveton J. H., Merriam D. F., Sherwood-Lollar B., Waggoner W. M., Magnuson L. M. H₂-rich and hydrocarbon gas recovered in a deep Precambrian well in northeastern Kansas //Natural Resources Research. – 2007. – T. 16. – №. 3. – C. 277-292. DOI: 10,1007/s11053-007-9052-7

81. Pasquet G., Idriss A., Ronjon-Magand L., Ranchou-Peyruse M., Guignard M., Duttine, M., Ranchou-Peyruse, A., Moretti, I. Natural hydrogen potential and basaltic alteration in the Asal–Ghoubbet rift, Republic of Djibouti //BSGF-Earth Sciences Bulletin. – 2023. – T. 194. – №. 1. – C. 9.. DOI: 10,1051/bsgf/2023004

82. Patterson J. D., Aydin M., Crotwell A. M., Pétron G., Severinghaus J. P., Krummel P. B., Langenfelds R. L., Saltzman, E. S. H₂ in Antarctic firn air: Atmospheric reconstructions and implications for anthropogenic emissions //Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2021. – T. 118. – №. 36. – C. e2103335118. DOI: 10,1073/pnas,2103335118

83. Petrenko V. V., Martinerie P., Novelli P., Etheridge D. M., Levin I., Wang Z., Blunier T., Chappellaz J., Kaiser J., Lang P., Steele L. P., Hammer S., Mak J., Langenfelds R. L., Schwander J., Severinghaus J. P., Witrant E., Petron G., Battle M. O., White J. W. C. A 60 yr record of atmospheric carbon monoxide reconstructed from Greenland firn air //Atmospheric Chemistry and Physics. – 2013. – T. 13. – №. 15. – C. 7567-7585. DOI: 10,5194/acp-13-7567-2013

84. Prinzhofer A., Moretti I., Francolin J., Pacheco C., D'Agostino A., Werly J., Rupin F. Natural hydrogen continuous emission from sedimentary basins: The example of a Brazilian H₂-emitting structure //International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – T. 44. – №. 12. – C. 5676-5685. DOI: 10,1016/j.ijhydene,2019,01,119

85. Prinzhofen A., Deville E. Natural hydrogen-The next energy revolution?' An inexhaustible and non-polluting energy, it exists'. – 2015.
86. Rezaee R. Natural hydrogen system in Western Australia?. – 2020. DOI: 10.20944/preprints202010.0589.v1
87. Rezaee R. Assessment of natural hydrogen systems in Western Australia //International Journal of Hydrogen Energy. – 2021. – T. 46. – №. 66. – C. 33068-33077. DOI: 10.1016/J.IJHYDENE,2021,07,149
88. Rogers G. S. Helium-bearing natural gas. – US Government Printing Office, 1921. – T. 121. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/pp121>
89. Ross T. E. A comprehensive bibliography of the Carolina bays literature //Journal of the Elisha Mitchell Scientific Society. – 1987. – C. 28-42.. <http://www.jstor.org/stable/24333340>
90. Sano Y., Urabe A., Wakita H., Wushiki H. Origin of hydrogen-nitrogen gas seeps, Oman //Applied Geochemistry. – 1993. – T. 8. – №. 1. – C. 1-8. DOI: 10.1016/0883-2927(93)90053-J
91. Sato M., Huntingdon A. T. The Collection and Analysis of Volcanic Gases from Mount Etna: Discussion //Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A. – 1973. – T. 274. – №. 1238. – C. 127-128.
92. Sato M., McGee K. A. Continious monitoring of hydrogen on the south flank of Mount St. Helens. In P. W. Lipman, D. R. Mullineaux (Eds.), The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington (pp. 209–219). U.S. Dept. of the Interior, U.S. Geological Survey, 1981. [https://books.google.ru/books?id=9og-r71PymgC&ots=-SZLb0lzzz&dq=Sato%2C%20M.%2C%20McGee%2C%20K.%20A.%20\(1981\).%20C](https://books.google.ru/books?id=9og-r71PymgC&ots=-SZLb0lzzz&dq=Sato%2C%20M.%2C%20McGee%2C%20K.%20A.%20(1981).%20Continuous%20monitoring%20of%20hydrogen%20on%20the%20south%20flank%20&lr&hl=ru&pg=PA218#v=onepage&q&f=false)
ontinuous%20monitoring%20of%20hydrogen%20on%20the%20south%20flank%20&lr
&hl=ru&pg=PA218#v=onepage&q&f=false
93. Semlitsch R. D. (2000). Size does matter: The value of small isolated wetlands //National Wetlands Newsletter. – 2000. – 22, 5–6. http://www.biosci.missouri.edu/semlitsch/Lab_Activities/articles/PDFSEMLITSCH.PDF

94. Semlitsch R. D., Bodie, J. R. Are small, isolated wetlands expendable? // *Conservation Biology*. – 1998. – 12(5), 1129–1133.
<http://www.jstor.org/stable/2387586>
95. Smith N. J. P., Shepherd T. J., Styles M. T., Williams G. M. Hydrogen exploration: a review of global hydrogen accumulations and implications for prospective areas in NW Europe // *Petroleum Geology: North-West Europe and Global Perspectives - Proceedings of the 6th Petroleum Geology Conference*. – 2005. – 6, 349–358. DOI: 10,1144/0060349
96. Sugisaki R., Ido M., Takeda H., Isobe Y., Hayashi Y., Nakamura N., Satake H., Mizutani Y. Origin of hydrogen and carbon dioxide in fault gases and its relation to fault activity // *The Journal of Geology*. – 1983. – 91(3), 239–258.
<http://www.jstor.org/stable/10,2307/30062111>
97. Sukhanova N. I., Kiryushin A. V. Humus status of chernozem soils formed under deep hydrogen release and different humidification conditions // *Почвы И Окружающая Среда*. – 2022. – 5(3), 1–15. DOI: 10,31251/pos.v5i3,184
98. Sukhanova N. I., Lysak L. V., Kiryushin A. V. Influence of Hydrogen Fluid on Plants in Natural Conditions and a Model Experiment // *Moscow University Soil Science Bulletin*. – 2019. – 74(5), 208–213. DOI: 10,3103/S0147687419050053
99. Sukhanova N. I., Trofimov S. Y., Polyanskaya L. M., Larin N. V., Larin V. N. (2013). Changes in the humus status and the structure of the microbial biomass in hydrogen exhalation places // *Eurasian Soil Science*. – 2013. – 46(2), 135–144. DOI: 10,1134/S1064229313020142
100. Sukhanova N., Zubkova T. State of Organic Matter and Particularities of Physicochemical Properties of Soils in the Endogenous Hydrogen Seepage Zones // *Open Journal of Soil Science*. – 2018. – 08, 186–196. DOI: 10,4236/ojss,2018,88015
101. Swezey C. S. Quaternary eolian dunes and sand sheets in inland locations of the Atlantic Coastal Plain province, USA // *Inland Dunes of North America*. – Cham : Springer International Publishing, 2020. – C. 11-63. DOI: 10,1007/978-3-030-40498-7_2

102. Takehana Y. Emission of hydrogen along the Negoro fault, Median Tectonic Line // *Zisin J. Seism. Soc. Jpn. 2nd Ser.* – 1982. – T. 35. – C. 103-115.
103. Vacquand C., Deville E., Beaumont V., Guyot F., Sissmann O., Pillot D., Arcilla C., Prinzhofer A. Reduced gas seepages in ophiolitic complexes: Evidences for multiple origins of the H₂-CH₄-N₂ gas mixtures // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 2018. – T. 223. – C. 437-461. DOI: 10,1016/j.gca,2017,12,018.
104. Wakita H., Nakamura Y., Kita I., Fujii N., Notsu K. Hydrogen release: New indicator of fault activity // *Science.* – 1980. – T. 210. – №. 4466. – C. 188-190. DOI: 10,1126/science,210,4466,188
105. Ward L. K. Inflammable gasses occluded in the Pre-Paleozoic rocks of South Australia// *Transactions and Proceedings of the Royal Society of South Australia.* – 1933. – 57, 42–47.
<http://ia801702.us.archive.org/11/items/TransactionsRoy57Roya/TransactionsRoy57Roy.pdf>
106. Welhan J. A., Craig H. Methane and hydrogen in East Pacific Rise hydrothermal fluids // *Geophysical Research Letters.* – 1979. – T. 6. – №. 11. – C. 829-831. <http://www.agu.org/pubs/crossref/1979/GL006i011p00829.shtml>
107. Wood B. L. Metamorphosed ultramafites and associated formations near Milford Sound, New Zealand // *New Zealand journal of geology and geophysics.* – 1972. – T. 15. – №. 1. – C. 88-128. DOI: 10,1080/00288306,1972,10423948
108. Zgonnik V. The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review // *Earth-Science Reviews.* – 2020. – T. 203. – C. 103140. DOI: 10,1016/j.earscirev,2020,103140
109. Zgonnik V., Beaumont V., Deville E., Larin N., Pillot D., Farrell K. M. Evidence for natural molecular hydrogen seepage associated with Carolina bays (surficial, ovoid depressions on the Atlantic Coastal Plain, Province of the USA) // *Progress in Earth and Planetary Science.* – 2015. – T. 2. – №. 1. – C. 31. DOI: 10,1186/s40645-015-0062-5
110. Zgonnik V., Beaumont V., Larin N., Pillot D., Deville E. Diffused flow of molecular hydrogen through the Western Hajar mountains, Northern Oman // *Arabian*

Journal of Geosciences. – 2019. – T. 12. – №. 3. – C. 71. DOI: 10,1007/s12517-019-4242-2