

*Первые исследования содержания молекулярного  
водорода в антарктическом леднике над  
озером Восток*

Четвериков Ю. О.<sup>1</sup>

*Ежов В.Ф.<sup>1</sup>, Липенков В.Я.<sup>2</sup>, Клямкин С.Н.<sup>3</sup>, Елисеев А.А.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> ПИЯФ ФГБУ НЦКИ

<sup>2</sup> ААНИИ

<sup>3</sup> МГУ

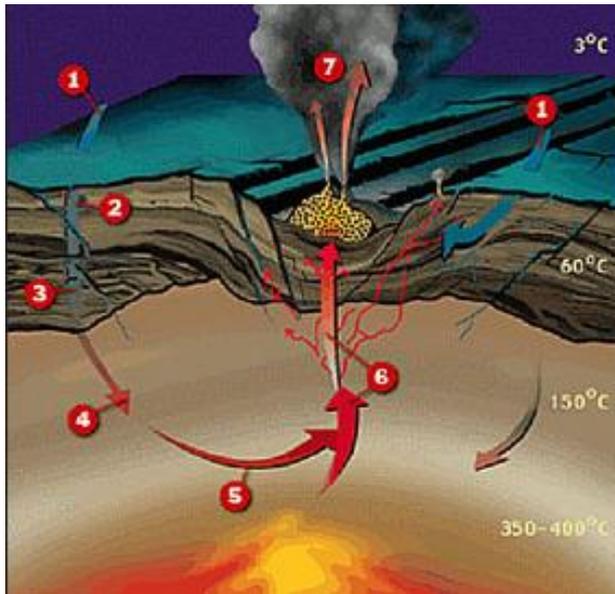
*Актуальность исследований содержания  
водорода во льду скважины Восток*

*Исследования диффузии, растворимости и  
избытка водорода во льду скважины*

*Происхождение подледникового водорода*

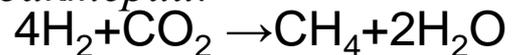
*Фотографии пингвинов и айсбергов ☺*

# Тектоническая активность дна озера Восток и легкие газы в озере



Хемосинтез вблизи геотермальных источников- основа жизни на дне глубоководных водоёмов

*Синтез водородофильных бактерий:*



Газы, выбрасываемые в процессе тектонической деятельности:

Газы радиоактивного распада

**He** – до 0.04% объема подземных вод  
**Ar; Rn**

Газы термического разложения

**CO<sub>2</sub>(CO); SO<sub>2</sub>(SO<sub>3</sub>); H<sub>2</sub>S; HCl; HF**  
**H<sub>2</sub>**

Водород во льду

\* Обнаружение термофильных водородоокисляющих бактерий- с глубин ледника **3561** и **3608** метров [1]. Известно, что такие бактерии живут при содержании водорода в 25 раз превышающем значения, равновесные с атмосферой [2]

\*\* Высокие значения концентрации водорода у подошвы гренландского ледника [3]

[1] S.A.Bulat et.al, International Journal of Astrobiology, **3**, 1, p 1-12 (2004)

[2] H. Francis et. al, Letters to nature, **415**, 312-315 (2002)

[3] B.C.Christner et. al, Polar biol., **35**, 11, 1735(2012)

# Проникновение легких газов в ледник

## Диффузия газа во льду

$$L_{pen} = \sqrt{6D t_{LAKE}}$$

$L_{PEN}$  - глубина проникновения газа;

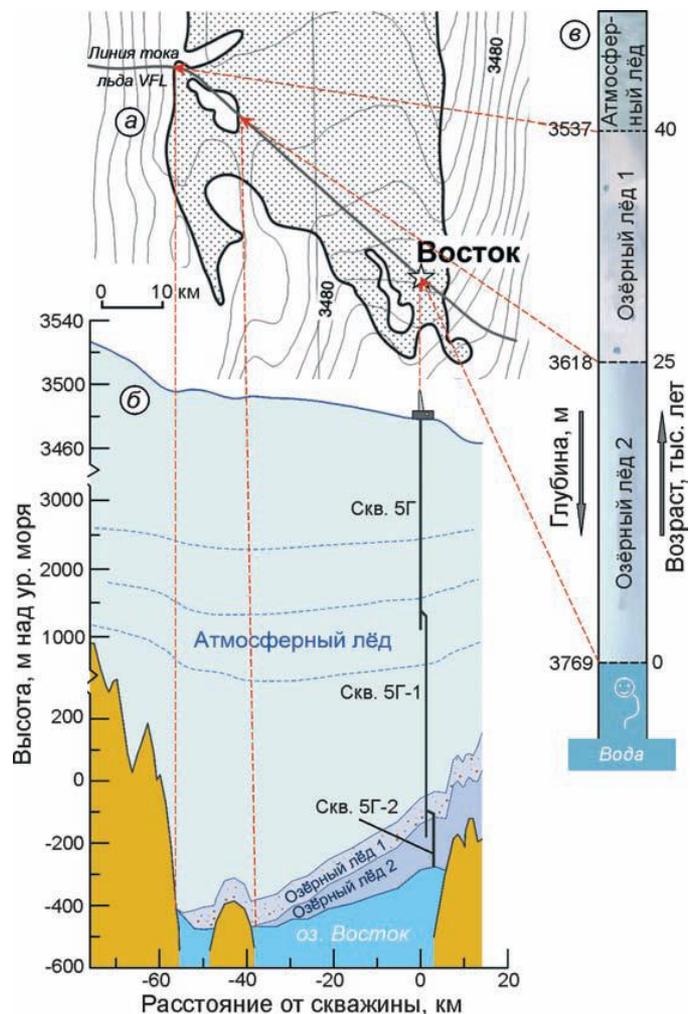
$D$  - коэффициент диффузии газа;

$t_{LAKE}$  - время нахождения ледника над озером

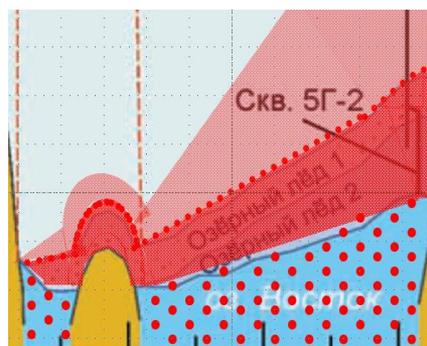
$$D_{H_2} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{сек} [1] \quad L_{PEN}(D_{H_2}; t=40 \text{ тыс. лет}) = 400 \text{ м}$$

$$D_{He} = 10^{-9} \text{ м}^2/\text{сек} [2] \quad L_{PEN}(D_{He}; t=40 \text{ тыс. лет}) = 93 \text{ м}$$

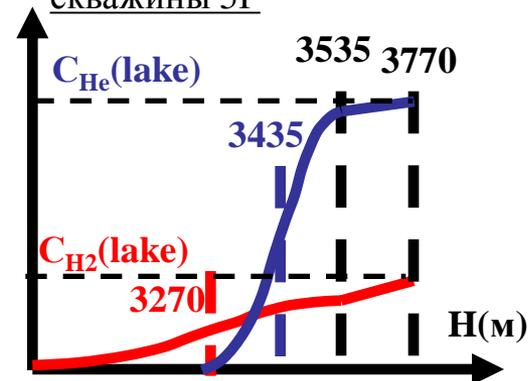
## Модель однородного распределения газа в озере под ледником



Течение ледника



Глубинный профиль концентрации в районе скважины 5Г



[1] H.L. Strauss, Z. Chen, C.K. Loong, J. Chem. Phys. **101**, 7177 (1994)

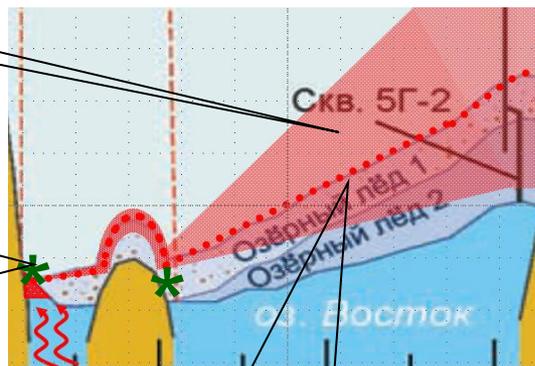
[2] K.Satoh, T. Uchida, T. Hondoh, S. Mae, Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol. **10**, 73-81 (1996)

# Предполагаемые места залегания и глубинный профиль содержания легких газов

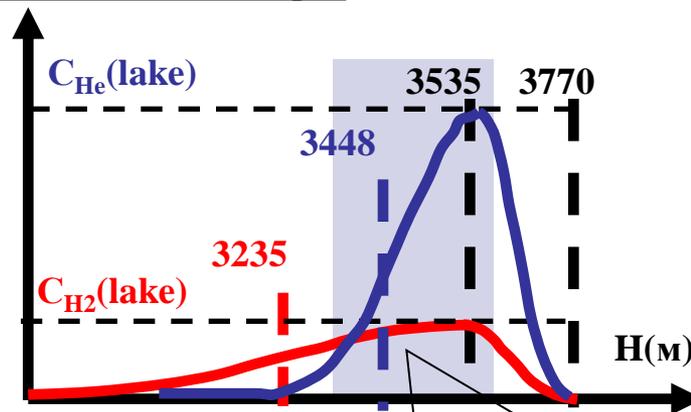
## Источник газа у границы раздела лед-вода-берег

Газовый шлейф

Предполагаемые  
места вмержания  
водородофильных  
бактерий

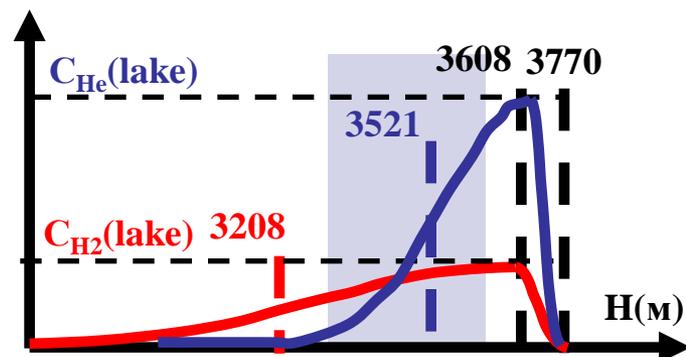


Центр газового шельфа



Глубины бурения в этом году

## Источник газа у купола подледникового острова



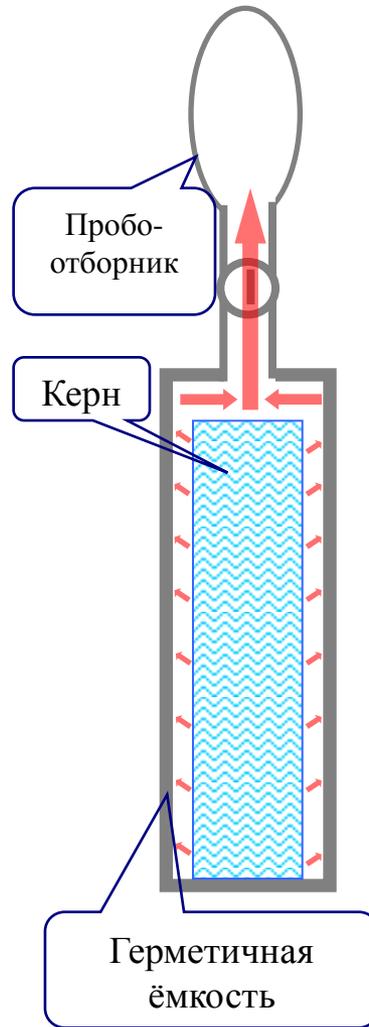
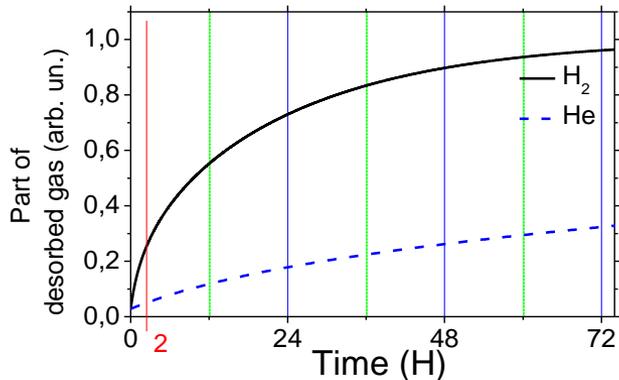
# Динамика дегазации и методика пробоотбора

**Модель адсорбции цилиндра [1,2]:**

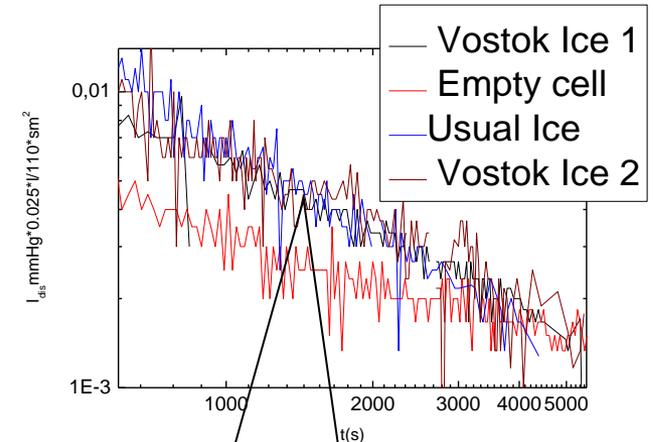
$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4\alpha(1+\alpha)}{4+4\alpha+\alpha^2 q_n^2} \exp(-Dq_n^2 t/a^2),$$

$M$ - растворимость;  
 $D$ - коэффициент диффузии;  
 $t$ - время с начала поглощения;  
 $a$ - радиус цилиндра;  
 $\alpha = h/(\pi a^2)$ ,  $h$ - высота цилиндра  
 $q_n$ - положительные ненулевые решения уравнения  $\alpha q_n J_0(q_n) + 2J_1(q_n) = 0$

**Модель дегазации ледяного цилиндра с  $d=100$  мм и  $h=1000$  мм, предварительно насыщенного газом**



**Дегазация ледяных цилиндров ( $d=9$ мм;  $h=50$  мм), насыщенных водородом под давлением 300 бар**

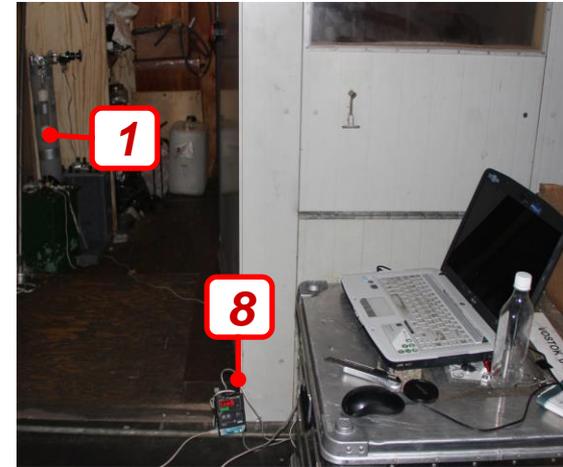
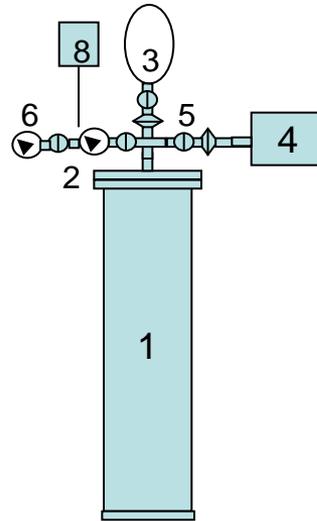
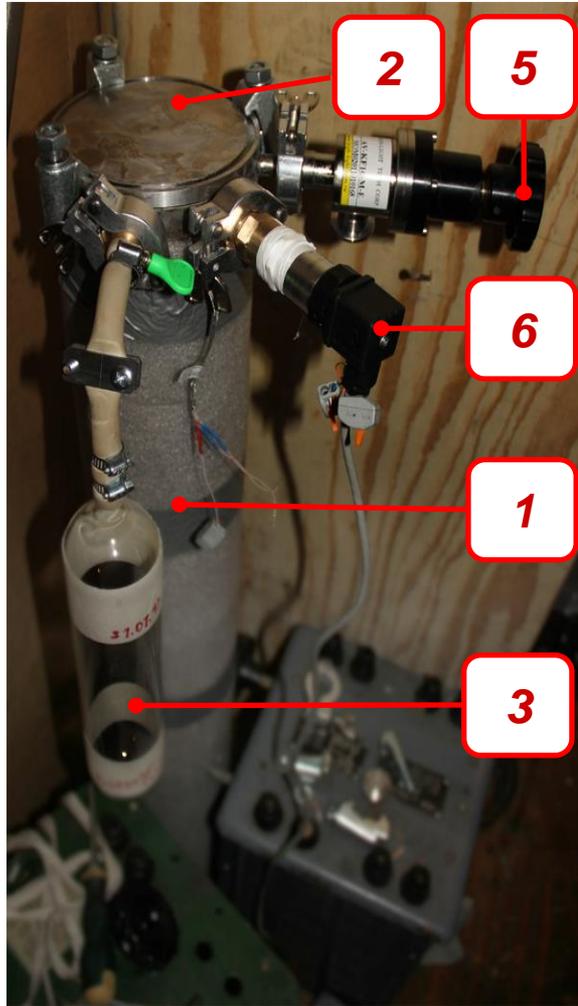


Динамика дегазации льда озера такая же, как у льда водопроводной воды

[1] J. Crank, The mathematics of diffusion, Oxford University press, 69-89 (1975)

[2] K.Satoh, T. Uchida, T. Hondoh, S. Mae, Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol. **10**, 73-81 (1996)

## Экспериментальное оборудование



- 1) ёмкость для льда;
- 2) крышка ёмкости;
- 3) сосуд пробоотборника;
- 4) вакуумный насос;
- 5) вакуумный вентиль;
- 6) датчик давления;
- 7) температурный датчик;
- 8) измеритель с модулем сбора данных;
- 9) вакуумная арматура

# Технические проблемы

## Парообразование в герметичной ёмкости

Поверхность керна загрязнена буровой жидкостью (70-80% керосина 20-30% фреона)!!!

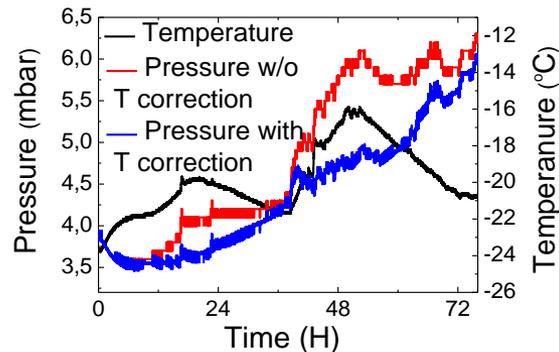
Источник газа	Давление паров насыщения (мбар) при T=-20 °C		Время выхода давления на насыщение* (ч.)	Испаряемость банки с 10 мл вещества после 15 мин. откачки*
	литер.	измер.		
Лёд	<b>1.025</b>	-	-	почти не испарился
Керосин	<b>~10</b>	9.5±1	<b>2</b>	почти не испарился
Фреон	<b>~500</b>	-	<b>1.5**</b>	испарился полностью

\*- Использовался малопроизводительный насос с Pmin=2-3 мБар

\*\* - интерполяция динамики дегазации с полным высыханием фреона

## Натекание и температурная зависимость показаний датчика давления

Газонасыщение в герметичной ёмкости с керном из хранилища



Натекание происходит из за потери эластичности витонных уплотнений при температуре меньше -10 °C

Температурная коррекция показаний датчика давления:

$$P_{COR} = P_{MEAS} + (T_{MEAS} - T_{AVER}) * C_{TEMP}$$

$P_{MEAS}$  и  $T_{MEAS}$  - измеренные значения давления и температуры;

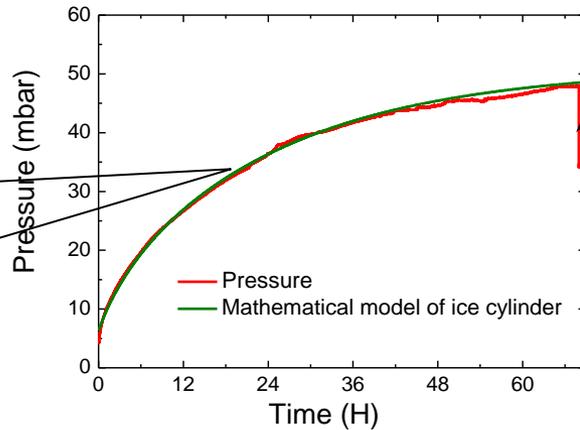
$T_{AVER}$  - средняя температура в измерительном цикле;

$C_{TEMP}$  - коэффициент, подбираемый минимизацией провалов и бугров в кривой давления, коррелирующих с экстремумами температурной кривой

# Пробоотбор: динамика дегазации

## Дегазация керна скважины 5Г-3 извлеченного с глубины 3457 м.

Рост давления в свободном объёме герметичной ёмкости



Падение давления из за открытия пробоотборника

Данные аппроксимировались моделью десорбции ледяного цилиндра с  $D=110$  мм  $H=1000$  мм. Коэффициент диффузии, используемый в модели  $D=2 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/сек (из [ ]). Подгоняемый параметр-давление насыщения  $P_S$ .

Давление водорода во льду  $P_{H2ICE}$  из нормировки найденного значения  $P_S$ :

$$P_{H2ICE} = P_S \cdot V_{FS} / V_{ICE}$$

$V_{FS}$ - свободный объём,  $V_{ICE}$ - объём льда

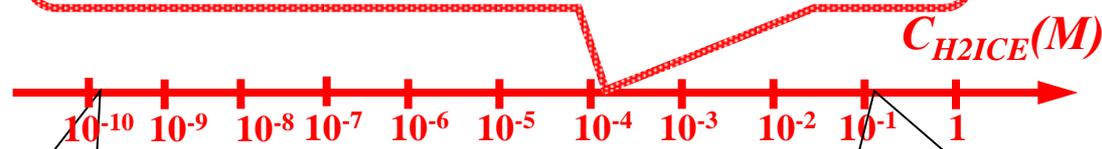
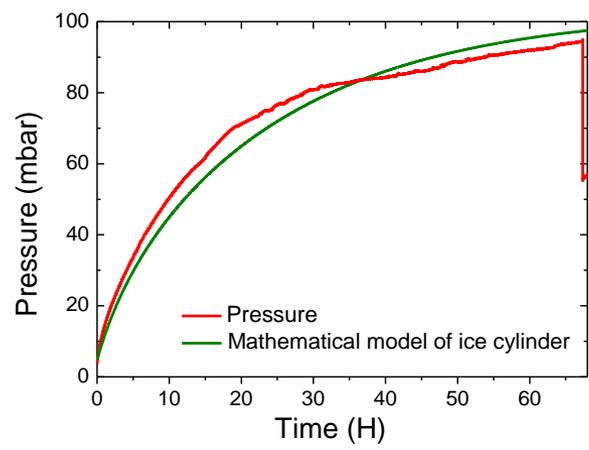
Найденные значения:

???

$P_{H2ICE}(3457) = 6$  мбар;  $C_{H2ICE}(3457) = 271$  мкМ

$P_{H2ICE}(3484) = 6.2$  мбар;  $C_{H2ICE}(3484) = 280$  мкМ

## Дегазация керна скважины 5Г-3 извлеченного с глубины 3484 м.



давление водорода в атмосферном льду

давление водорода во льду, помещенном в газовую среду с  $P_{H2} = 350$  бар

**Анализ состава проб:  
содержание водорода**

---

Анализ состава проб был проведен **6.03.2013** в ЦФТИ Аналитик на времяпролётном масс-спектрометре.

Предварительные результаты:

Основное содержание- воздух;

Заметное содержание- вода, лёгкие углеводороды;

**Водород- менее 0.2% ???**

**(линия заметна, но связанна с ионизацией воды и углеводородов);**

Гелий- не заметен

***Утечка водорода???***

*Спектры находятся в обработке...*

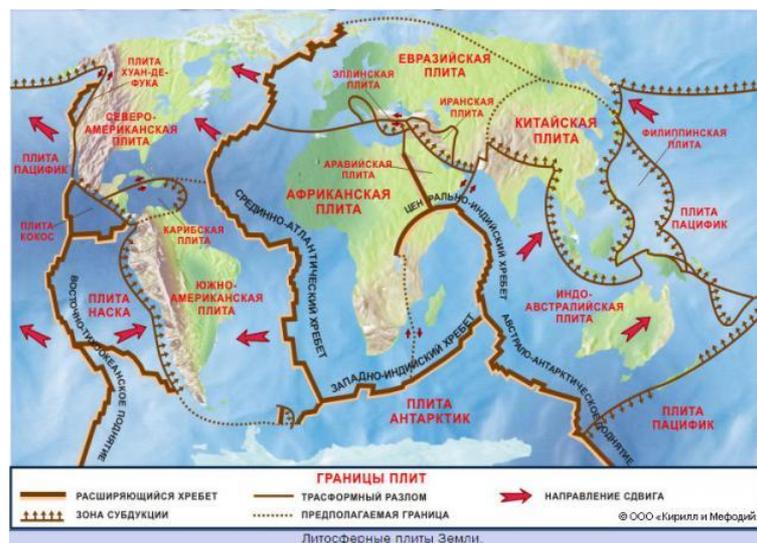
# Озеро Восток

## тектоническая активность и зарядовые токи

**Сейсмо-тектоническая  
активность- откуда?**

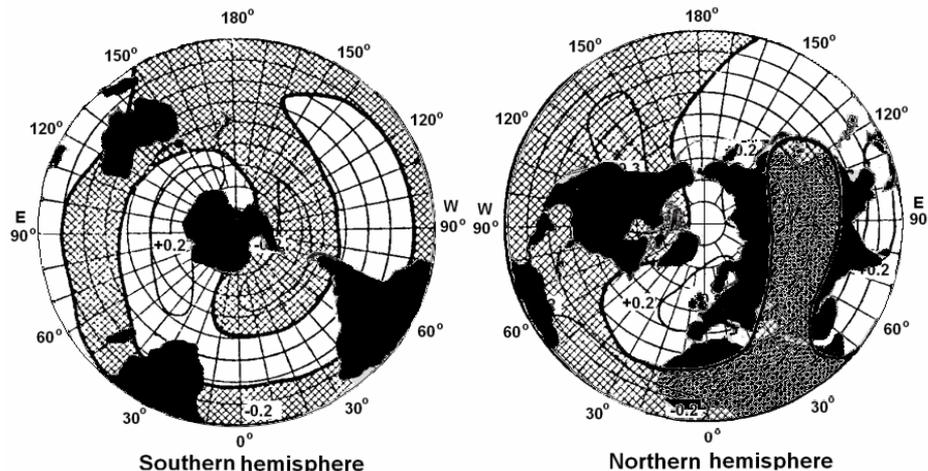
**До ближайшего разлома  
более 1000 км...**

*Есть ли Другие источники энергии  
подледниковой жизни?*



## Токи Шмидта-Бауэра

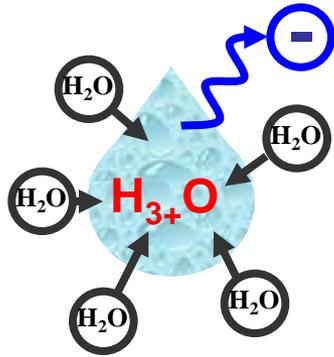
А.Schmidt в 1895 показал, что потенциальное магнитное поле Земли включает не потенциальную часть. В потенциальном поле линейный интеграл вдоль замкнутой кривой должен равняться нулю. Это означает наличие вертикальных токов, достигающих земной поверхности.



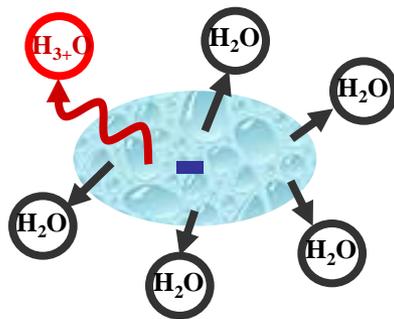
# Нисходящие токи $H_3^+O$ в атмосфере и леднике Центральной Антарктиды

## Зарядовое разделение при фазовых переходах вода(лёд)- пар

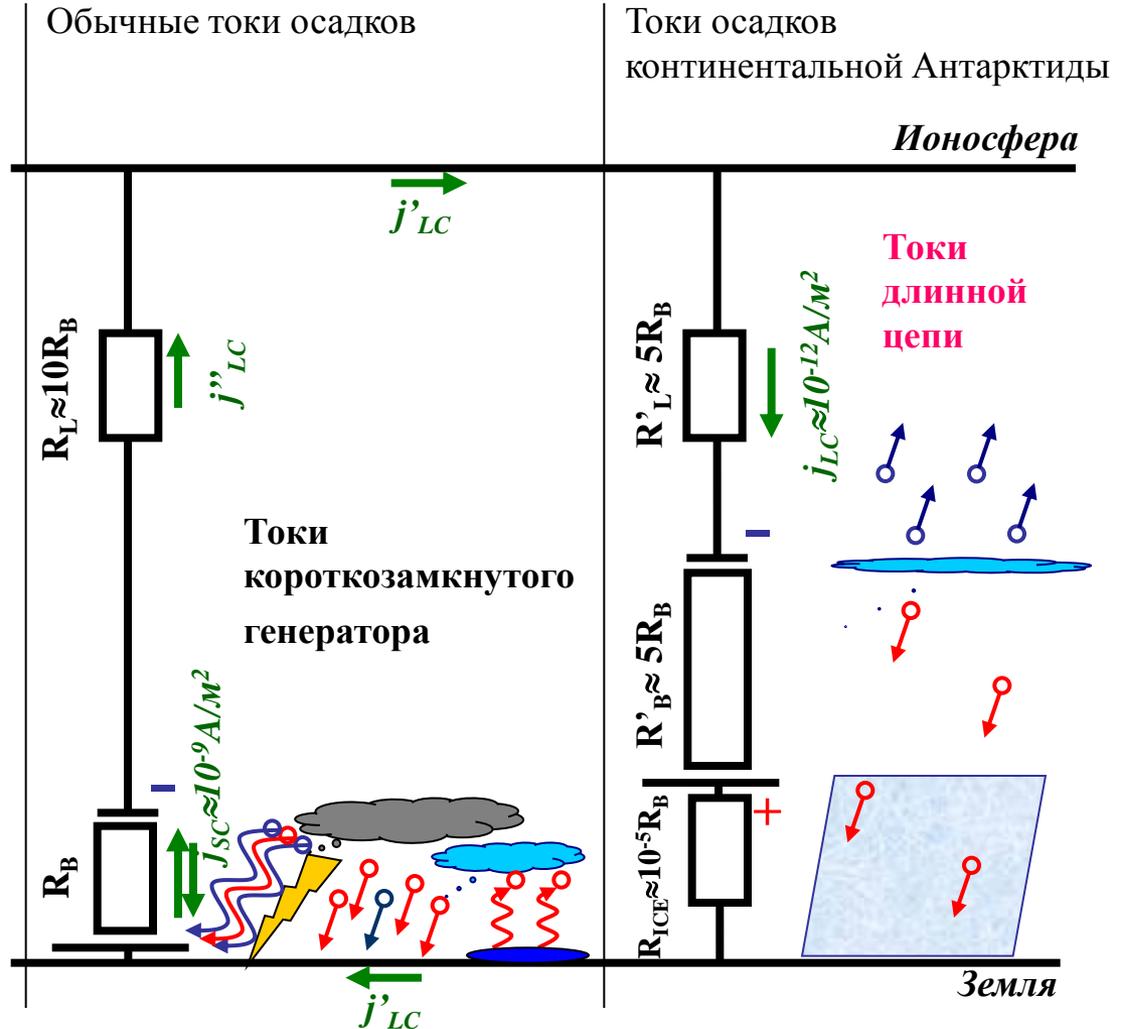
Конденсация влаги



Испарение

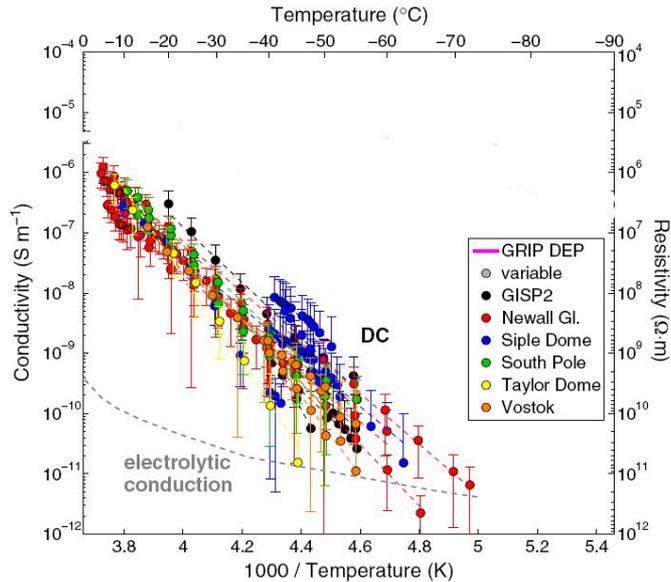


## Токи конденсации и выпадения осадков

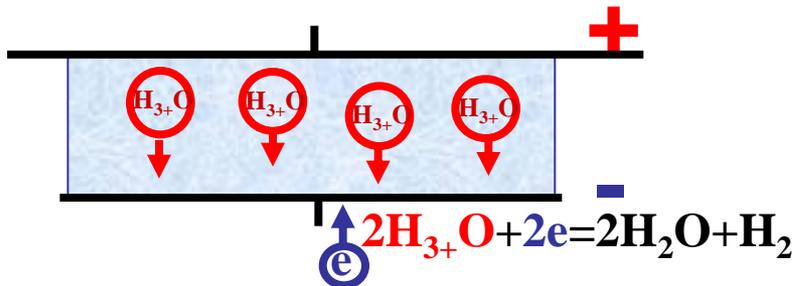


# Натекание водорода под ледник под действием электрического поля

## Лёд: протонный полупроводник



Проводимость во льду осуществляется за счёт дрейфа  $H_3O^+$  дефектов



## Перенос ионов водорода под ледник

Подвижность заряда:

$$\mu = Dq/kT$$

Концентрация носителей:

$$n = \sigma/q\mu$$

Скорость дрейфа:

$$v = j/nq$$

Удельная интенсивность натекания носителей:

$$dI_{H^+}/dS = vn$$

$$D_{H^+} = 2.6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{сек}$$

$$q = +e$$

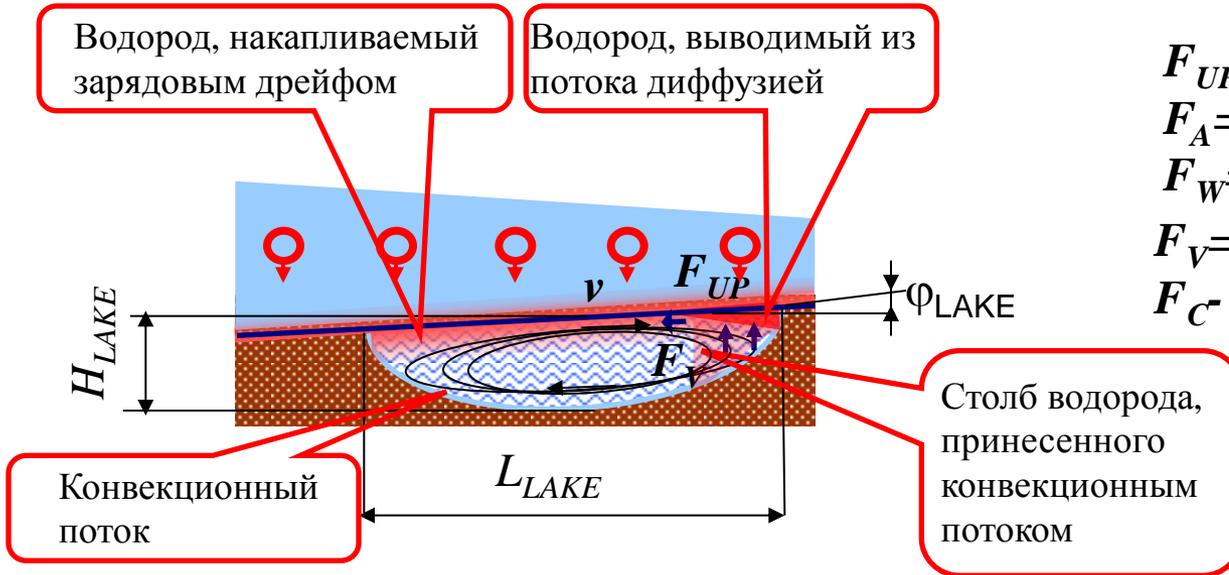
$$\sigma = 10^{-9} \text{ 1}/\Omega\text{м}$$

$$T = 243 \text{ К}$$

$$j = 2.5 \cdot 10^{-12} \text{ А}/\text{м}^2$$

$$dI_{H^+}/dS = 10^{-9} \text{ моль}/\text{м}^2\text{год}$$

## Накопление в озере водорода, перенесенного электрическим током



$$F_{UP} = F_A - F_W - \text{сила всплытия}$$

$$F_A = g\rho V$$

$$F_W = gm$$

$$F_V = \eta v S / h - \text{сила вязкого трения}$$

$$F_C - \text{сила конвекционного потока}$$

### Установившийся поток

$$F_{UP} + F_V + F_C = 0$$

$$F_{UP} + F_V = -F_C$$

$$dF_{UP}/dS dt = g\rho C_{M-v}(dI_{H^+}/dS dt) - gC_{M-m}(dI_{H^+}/dS dt)$$

$$dF_V/dS = 2\eta v/L_{PEN}(t)$$

$$t_{CYCLE} = 2L_{LAKE}/v = 2(\eta L_{LAKE}/(3D_{H_2-H_2O}(dF_{UP}/dV dt)))^{1/3} = 50 \text{ тыс лет}$$

$$v_{UP} = 2L_{LAKE}/t_{CYCLE} = 10^{-6} \text{ м/сек}$$

Водород будет накапливаться над теми местами озера, под которыми скорости нисходящих водных потоков будут порядка  $10^{-6}$  м/сек

# Глубинный профиль водорода, перенесенного током ионов $H_3^+O$

Лёд с атмосферными значениями концентрации водорода

$$C_{H_2AIR} = 0.5 \text{ nM}$$

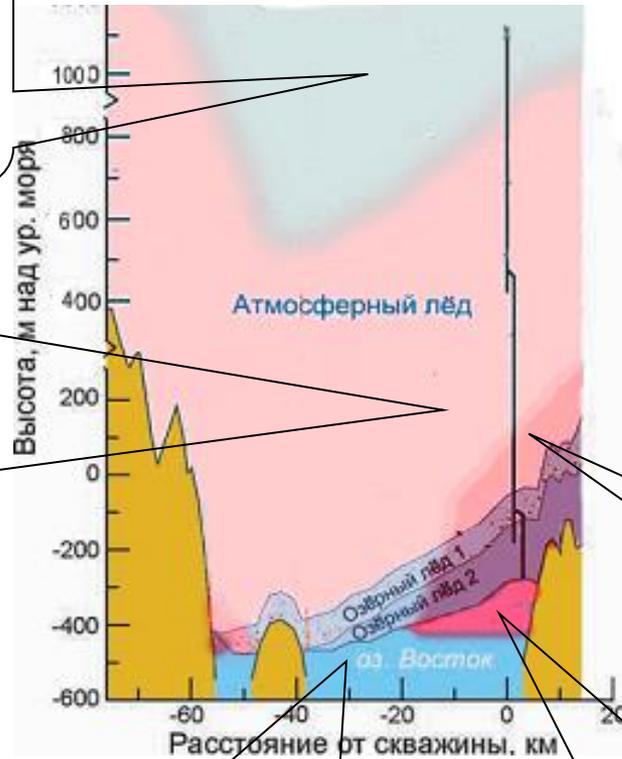
Лёд, насыщаемый дрейфовым водородом от момента образования. Концентрация водорода:

$$C_{H_2B} = 0.5 I_{H^+} t_{ICE} / L_{PEN}(t_{ICE}) = 0.17 \text{ nM}$$

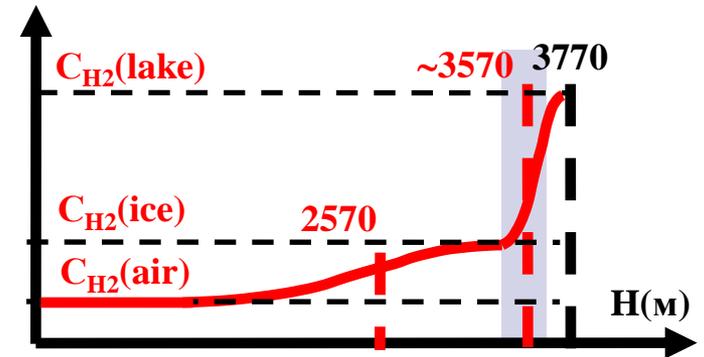
$t_{ICE} = 400000$  лет- время образования льда;

$L_{PEN}(400000 \text{ лет}) = 1200 \text{ м}$

$$C_{H_2} = C_{H_2} + C_{H_2AIR}$$



Глубинный профиль содержания водорода  
в скважине



Лёд перенасыщенный водородом из купольных образований

Вода под нижней частью ледника, обедненная водородом, стекающим вверх вдоль границы вода- ледник

Вода под верхней частью ледника, обогащенная натекающим водородом

## Результаты

---

\* В измерениях дегазации льда, предварительно насыщенного водородом выявлено, что диффузия водорода в конжеляционном льду озера «Восток» происходит с такой же динамикой, что и диффузия во льду водопроводной воды

\*\* Разработана методика и создано оборудование неразрушающего пробоотбора лёгких газов

\*\*\* Отобраны пробы лёгких газов из ледяных кернов с глубин **3557** и **3584** м

\*\*\*\* Произведен предварительный анализ состава газовой смеси отобранных проб

\*\*\*\*\* Выдвинута гипотеза проникновения водорода сквозь ледник благодаря направленному дрейфу ионов  $\text{H}_3^+\text{O}$ . Согласно гипотезе интенсивность накопления водорода под ледником порядка  $10^{-9}$  моль/(год\* $\text{м}^2$ )

\*\*\*\*\* Показано, что в условиях слабых конвекционных потоков воды озера, со скоростями порядка  $10^{-6}$  м/с возможна конденсация водорода в заводях у верхней кромки границы озера лёд-вода

\*\*\*\*\* Разработана модель глубинного профиля содержания водорода в леднике, отвечающая гипотезе зарядового дрейфа и конденсации

Водород в воде озера «Восток»:



*Глубинный профиль содержания водорода во льду скважины 5Г покажет...*

## Благодарности

---

Липенков В.Я.

Ежов В.Ф.

Дмитриев Р.П.

Клямкин С.Н.

Елисеев А.А.

Ефимченко В.С.

Антонов А.С.

Екайкин А.

Аруев Н.Н.

Дубинский Б.М.