

Исследование роли морского ледяного покрова в газообмене океана и атмосферы

*В.Н.ГОЛУБЕВ, П.Б.ГРЕБЕННИКОВ, Г.А.РЖАНИЦЫН
(МГУ имени М.В.Ломоносова)*

Сотрудники географического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова в ходе работ экспедиции «Арктика-2007» провели комплекс исследований по программе проекта «Роль морских льдов в вариациях содержания углекислого газа в атмосфере» («Effect of Sea Ice on Atmospheric Carbon Dioxide Content», ESIAC), входящего в кластер «OASIS» МПГ 2007/08. Программа экспедиционных работ включала в себя:

- 1) отбор проб воздуха, льда, морской воды в акватории Северного Ледовитого океана и исследование их газового состава;
- 2) изучение строения, в частности пористости, морских льдов для оценки их газопроницаемости;
- 3) изучение морфологии кристаллов твердых атмосферных осадков и последующее исследование их изотопного состава;
- 4) во время вертолетных маршрутов на острова документация процессов криогенного разрушения горных пород в зонах отступления ледников.



Измерение потоков CO₂ газоанализатором LI 8100

При проведении океанографических станций в акватории Северного Ледовитого океана одновременно были отобраны пробы морской воды с разной глубины и воздуха для изучения их газового состава и измерения потоков CO₂ в системе атмосферный воздух-морская вода. Отбор проб воды объемом 1,0-1,5 л с разной глубины производили из батометра сразу по завершении океанографической станции. Газы, извлекаемые из воды для последующего исследования на газовом хроматографе, поступали в специальные стеклянные газоотборники. Входное и выходное отверстия в газоотборнике были соединены силиконовой трубкой, заполненной крепким рассолом. Объем работ по установлению соотношения содержания CO₂ в атмосфере и в морской воде был существенно увеличен по сравнению с первоначальной программой, так как оказалось возможным использовать приобретенный ААНИИ газоанализатор LI 8100, исходно

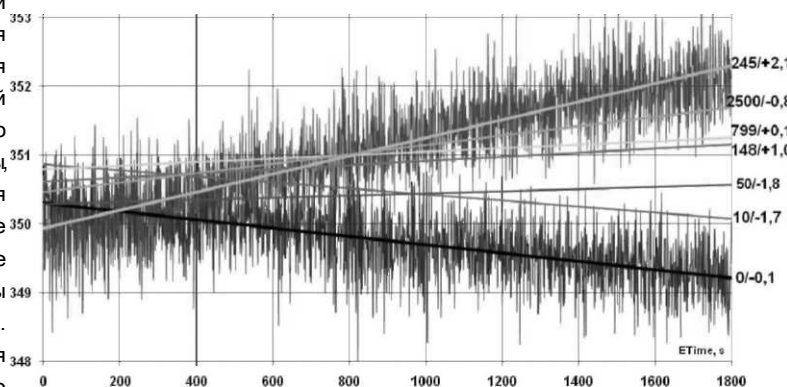
предназначенный для определения интенсивности потоков газа в атмосферу из подстилающего грунта. На каждой станции отбирали пять-шесть проб воды с разных глубин и с поверхности, а также из-под льда при наличии ледяного покрова. Более часто пробы отбирали из верхнего 100-метрового горизонта. Для упрощения сравнительного анализа измерения проводили на пеленгаторной палубе, где изменения содержания CO₂ в атмосфере в течение всего периода работ не превышали 3 ppm. Время измерения во всех случаях составляло 30 мин. Концентрация CO₂, давление и температура воздуха, относительная влажность и содержание водяного пара измерялись ежесекундно. Погрешность термометрии 0,1 °C. Погрешность измерения остальных показателей - 1,5 % измеряемой величины. Автоматически производился пересчет концентрации на сухой CO₂. Информация сохранялась в виде таблиц в текстовом формате. Изменения содержания CO₂ в воздухе камеры газоанализатора характеризуют степень неравновесности содержания газа в атмосфере с содержанием его в пробе воды из батометра. Зарегистрированные значения потока CO₂ при проведении измерений составляли от -0,1 до 0,1 мкмоль/(м²-с).

Исследования показали, что в летний период содержание CO₂ в полярной атмосфере понижено на 20-30 ppm по сравнению со средним годовым значением, что в подледной воде содержание CO₂ не равносильно даже пониженному летнему содержанию его в атмосфере, причем неравновесность возрастает при повышении сплоченности льдов, и что интенсивность газообмена атмосферы и морской воды зависит от сплоченности льдов. Установлена также значительная изменчивость содержания CO₂ в глубинных слоях морской воды. На графике показаны изменения содержания CO₂ в воздухе камеры газоанализатора, контактирующей с пробой морской воды, отобранной на океанографической станции № 67 с разных глубин. Приведены также данные о температуре и солёности воды на указанной глубине.

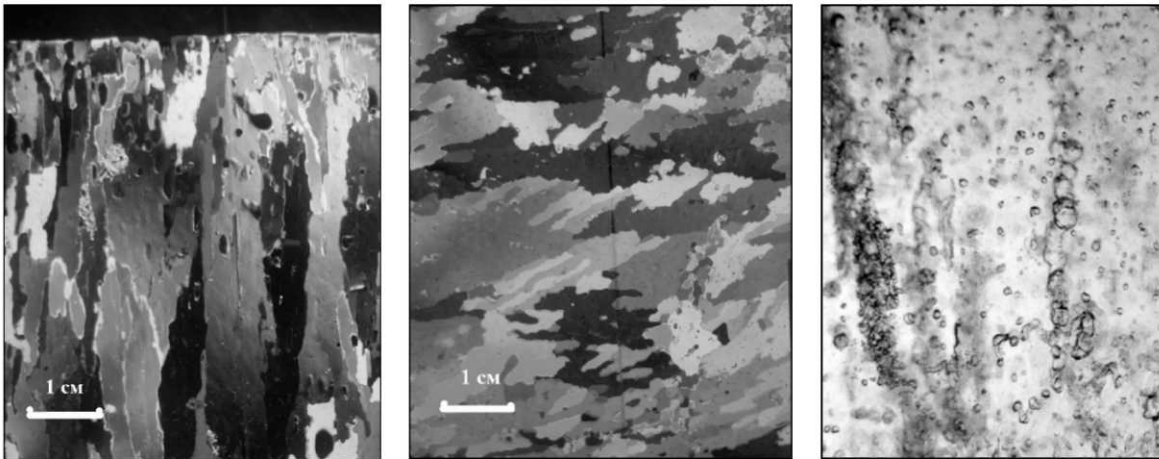
CO₂, ppm

Станция 67, 19 августа 2007 г., 8044' с.ш., 113W в.д.

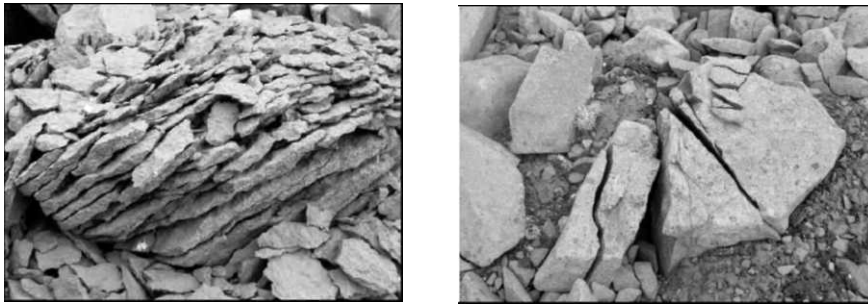
г, м/гс



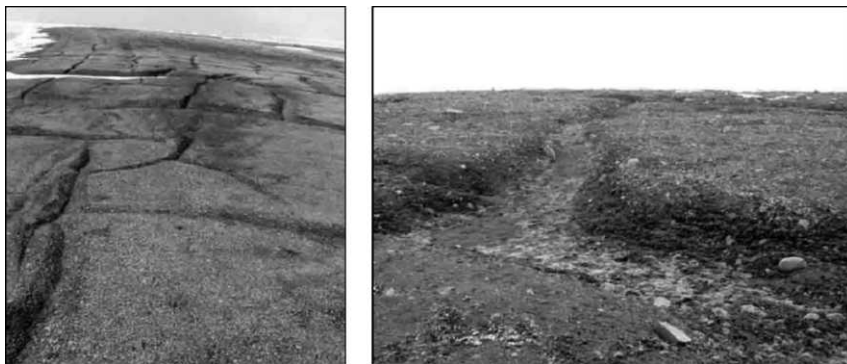
Изменения содержания CO₂ в процессе газообмена воздуха камеры газоанализатора с пробой морской воды (с правой стороны графика - данные о глубине отбора пробы воды и ее температуре)



Строение морского льда и цепочки газовых включений в нем



Криогенное разрушение каменного материала до фракции мелких глыб (слева) и дресвы (справа)



Полигональный рельеф (слева) протаявшие глубокие борозды между полигонами (справа)



Криогенная сортировка материала



Сезонное оттаивание грунта

Изучено строение керна морского льда в акватории Северного Ледовитого океана в зимний сезон 2006/07 г., и сделано микрофотографирование тонких срезов. Морской лед сложен сравнительно крупными (до 2 см), разделенными на блоки кристаллами, имеющими близкую (параллельную поверхности замерзания) ориентацию оптических осей. По субграницам между блоками обычно располагаются тонкие, менее 0,1 мм, прерывистые пленки рассола. К границам кристаллов приурочены протяженные каналы толщиной до 0,5 мм, заполненные рассолом. Эти каналы могут формировать сложно построенную систему пор, по которой при небольшой толщине льда (до 15 см) возможен ограниченный газообмен подледной воды с атмосферой. Однако при моделировании этого процесса в лабораторных условиях установлено, что в случае формирования сквозной поры тяжелый рассол вытекает, а поровое пространство заполняется водой меньшей солености, после замерзания которой миграция газов через поры практически невозможна. В морском льду помимо скоплений рассола содержатся также газовые включения, суммарный объем которых в верхних слоях ледяного покрова может превышать 6 %. Результаты предварительных исследований показывают, что при периодическом становлении ледяного покрова условия газообмена гидросферы и атмосферы резко изменяются, поскольку в этот период фактором, определяющим интенсивность газообмена, становится газопроницаемость ледяного покрова, а не растворимость газов в воде. При отсутствии (или при закрытии) сквозных пор и макронарушений ледяной покров становится для газов непроницаемой мембраной. Над перекрытой льдом акваторией происходит накопление газов, прежде всего тех, растворимость которых в воде выше, чем других основных газов атмосферы, и которые после растворения в воде входят в число интенсивно потребляемых в химических и биологических процессах. Поэтому одним из основных факторов, определяющих вариации содержания CO_2 в атмосфере и формирование парникового эффекта, служит морской ледяной покров, периодические изменения площади которого ведут к соответствующим изменениям интенсивности газообмена океана и атмосферы в полярных и умеренных широтах.

Существующие представления о механизмах возникновения солевых и газовых скоплений перед фронтом кристаллизации при замерзании воды и вхождения их в лед не учитывают особенности строения воды и роста льда и, ограничиваясь рамками исследуемых процессов, не всегда согласуются между собой. Проведенные и планируемые экспедиционные исследования, а также физическое и математическое моделирование позволят разработать единый, непротиворечивый механизм развития этих процессов, базирующийся на недавних теоретических разработках и кристаллооптическом изучении морского льда.

Во время кратковременных вертолетных высадок на островах архипелагов Земля Франца-Иосифа и Северная Земля обследована территория вблизи мест посадки с целью документирования криогенных процессов в

зонах отступления ледников. Поверхностные отложения в основном представлены каменным материалом, состоящим из неокатанных глыб, щебня и песка магматических (диоритовых) пород и редко встречающейся мелкой и средней гальки кварцевого или кварц-полевошпатового состава.

Слабое криогенное (морозное) выветривание на этих участках свидетельствует о сравнительно недавнем освобождении этой территории от ледника. Образующиеся в настоящее время продукты криогенного выветривания служат источником эолового материала. На фотографиях показано криогенное разрушение крупноглыбового материала до фракций глыб и дресвы.

Одним из характерных признаков развития мерзлотных процессов, наличия подземных льдов и криогенной трансформации поверхности служит полигональный рельеф. Полигоны прямоугольной формы, вытянутые вдоль береговой линии, имеют размеры сторон до 20-30 м. Межполигональные борозды имеют ширину до 3 м при глубине до 1,0-1,5 м.

На отдельных участках присутствует глинистый материал и наблюдается криогенная сортировка материала. Грунты на этих участках влагонасыщены, на горизонтальных поверхностях отмечены явные признаки кри-отурбации и пучения, на склонах, обращенных в сторону моря, наблюдаются признаки солифлюкции. Толщина сезонного про-таивания составляет не менее 50-60 см.

Во время выпадения твердых осадков отобраны пробы на изотопный анализ и для исследования морфологии выпадающих кристаллов.

Все исследования были проведены в содружестве и при поддержке сотрудников ААНИИ и специалистов других организаций, участвовавших в работе экспедиции «Арктика-2007».

Предварительный анализ результатов проведенного комплекса исследований позволяет сделать следующие выводы:

1) в Арктическом бассейне слой подледной воды толщиной до 50 м при сплоченности льдов более 8 баллов не насыщен CO_2 даже относительно летнего пониженного содержания CO_2 в атмосфере арктического и субарктического регионов;

2) в части акватории с открытой водой и при малой сплоченности льдов содержание CO_2 в воде слоя перемешивания находится в равновесии с содержанием CO_2 в атмосфере;

3) содержание CO_2 в большей части глубинных слоев воды выше, чем равновесное с содержанием CO_2 в атмосфере в период проведения измерений;

4) наиболее активное развитие криогенных процессов наблюдается в непосредственной близости от фронта ледника, на участках, недавно освобожденных ото льда при деградации ледникового покрова; здесь наблюдаются криогенные разрушения и сортировка каменного материала, формируются полигональные формы поверхности, происходит пучение грунтов;

5) на удаленных от ледника участках присутствуют аналогичные проявления мерзлотных процессов, однако формы рельефа находятся на более глубокой стадии развития.

Планируемые на 2008 г. исследования строения и газопроницаемости морского льда, отбор проб морской воды, в том числе подледной и с разных глубин, для определения вариаций содержания CO_2 в зависимости от сплоченности льдов и от глубины отбора позволят получить необходимую информацию для выявления роли морских льдов в сезонных и многолетних вариациях содержания углекислого газа в атмосфере и парникового эффекта.

Существенным для оценки интенсивности криоэрозии каменного материала и образования пылеватых частиц в зонах отступления ледников станет и изучение развития криогенных процессов на островах Северного Ледовитого океана