

## ДИНАМИКА СОСТАВА ПОЧВЕННЫХ РАСТВОРОВ И ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВ АРКТИЧЕСКИХ ПУСТЫНЬ ЗАКЕНБЕРГА (Северо-Восточная Гренландия)

Б. Элберлинг, Б. Х. Якобсен

*Институт географии при университете Копенгагена, Остер Волагад, 10, 1350, Копенгаген, Дания*

В Северо-Восточной Гренландии изучены почвенные профили, расположенные вдоль трансекты, пересекающей заболоченную территорию и простирающейся от зоны аккумуляции снега в направлении стока воды. Педохимические процессы, соответствующие современным биоклиматическим условиям, оценены путем совместного анализа твердой фазы почвы и почвенного раствора, собранного всасывающими пробоотборниками. Для сравнения, охарактеризован хорошо дренированный профиль под сообществом *Cassiope*. Выявлена пространственная и временная неоднородность состава и свойств почвенных вод и почвенной кислотности. Установлено, что динамика состава и свойств почвенных растворов контролируется процессами ионного обмена, внутрпочвенного выветривания и промерзания-протаивания. Показано, что применению данных о составе почвенных растворов, для интерпретации долговременной реакции на глобальные биоклиматические изменения, должно предшествовать построение динамических почвенно-биогеохимических моделей, объясняющих краткопериодные изменения.

*Многолетняя мерзлота, химия почвы, почвенный раствор, ацидификация*

### VARIATION IN SOIL SOLUTIONS AND CHEMICAL PROPERTIES OF ARCTIC DESERT SOILS AT ZACKENBERG, NORTHEAST GREENLAND

B. Elberling, and B.H. Jakobsen

*Institute of Geography, University of Copenhagen, Oster Volagade, 10, 1350, Copenhagen, Denmark*

Geochemical processes in soils in response to current bio-climatic conditions can be assessed by combining analysis and interpretation of the soil solid phase and soil solutions collected by suction-probes. We have applied this approach in a High Arctic permafrost area in Northeast Greenland where the soil solid profile as well as soil solutions were characterized within a transect from a snowdrift and parallel to the water flow in a swamp area. For comparison, a nearby well-drained *Cassiope*-heath soil profile was evaluated. The results show that ion exchange and *in situ* weathering processes as well as soil freezing and thawing are responsible for the dynamics of the soil solution. The observed spatial and temporal variations in the soil water geochemistry and acidification call for further attention to dynamic soil bio-geochemical models that explain short-term changes, before applying soil solution data for the interpretation of long-term responses to global bio-climatic changes.

*Permafrost, soil chemistry, soil solution, acidification*

## ВВЕДЕНИЕ

Почвообразование включает в себя транспортировку продуктов выветривания, сопряженную со сложным взаимодействием твердой и жидкой фаз. В высокоширотной Арктике циклы промерзания-протаивания почв сопровождаются дифференциацией ионов почвенного раствора. В ходе осеннего промерзания концентрация растворенных веществ в незамерзшей воде увеличивается, так как они не включаются в состав льда [Dubikov et al., 1983]. В многолетней криолитозоне промерзание деятельного слоя обычно происходит сверху и снизу. В результате, концентрация ионов происходит на определенной глубине, зависящей от температурного режима воздуха, гранулометрического состава и влаж-

ности. Например, Кэй и Гронвелт [Kay, Groenevelt, 1983] в ходе промерзания почвы наблюдали увеличение концентрации нитратов на глубине 15—25 см. Протаивание почвенных профилей весной и летом, напротив, сопровождается разбавлением почвенного раствора. Ежегодные возрастания и уменьшения концентрации раствора влияют на такие почвенные процессы как ионный обмен [Graham, Lopez, 1969], растворение и осаждение минеральных веществ [Sletten, 1988].

Одним из наиболее важных педохимических процессов считается продуцирование протонов в верхних горизонтах почвы, вызывающее ацидификацию (подкисление), химическое вы-

ветривание и перемещение веществ внутри почвенного профиля [Ugolini, Sletten, 1991]. В условиях высокоширотной Арктики единственным значимым поставщиком протонов является углекислота. Дождевая вода, находящаяся в равновесии с двуокисью углерода, теоретически должна иметь  $pH=5,7$ . Однако в результате разложения органического вещества в приповерхностных горизонтах и дыхания растений парциальное давление углекислого газа в почвенном воздухе в 5—10 раз выше такового в атмосфере [Sletten, Ugolini, 1990]. Если почва не обладает буферной способностью, возрастание содержания  $CO_2$  приводит к понижению  $pH$  до значений ниже 4,4. Если в профиле присутствуют карбонатные минералы, их растворение поддерживает  $pH$  на уровне 6—7,5 и поставляет обменные основания (Ca, Mg). Для некарбонатных регионов Арктики характерно подкисление почвы и значения  $pH$  ниже 6 [Jakobsen, 1992; Sletten, Ugolini, 1990]. Здесь, в отсутствие карбонатов, уровень кислотности контролируется иными буферными механизмами, такими как выветривание силикатов и катионный обмен. При  $pH$  ниже 7, важным буферным механизмом становится выветривание силикатов [White, Brantly, 1995]. Но поскольку выветривание большинства силикатных минералов — очень медленный процесс, этот механизм не успевает компенсировать поступление кислоты, и уровень кислотности возрастает. При значениях  $pH$  в интервале 5—6, в нейтрализации избыточной кислоты увеличивается роль катионообменных процессов.

Выветривание силикатов и ионный обмен могут происходить одновременно. Тем не менее на силикатных породах в масштабе продолжительных периодов времени химическое выветривание силикатов является единственным процессом, нейтрализующим кислотность почв, тог-

да как катионный обмен обеспечивает нейтрализацию лишь на фоне пополнения запасов оснований за счет выветривания [White, Brantly, 1995]. Помимо буферного эффекта, разрушение силикатов имеет и другие важные функции. Оно поставляет в почвенный раствор катионы и кремний, а также Fe и Al; последние могут затем образовывать Fe/Al-окислы — нерастворимые продукты выветривания. Подобные почвообразовательные процессы традиционно характеризовались при помощи анализа твердой фазы почвы. Позже для характеристики современных почвообразовательных процессов стали использовать данные по почвенным растворам [Ugolini et al., 1990]. Цель нашего исследования — оценка относительной роли процессов, контролирующих состав почвенных растворов в одном из регионов высокоширотной Арктики, где почвообразующий материал преимущественно силикатный.

В течение летних месяцев на экологической станции Закенберг в северо-восточной Гренландии [Elberling, Jakobsen, 1997] через равные промежутки времени на двух площадках с нескольких глубин отбирали пробы почвенных растворов. Исследования велись в рамках программы Геобазис (GeoBasis), рассчитанной на несколько десятилетий с целью оценки потенциальных изменений почвы в результате глобальных биоклиматических изменений. Оценке долговременных изменений почвы, как реакции на изменения среды, должна предшествовать оценка ежегодных флуктуаций в составе почвенных растворов. В настоящей статье рассматриваются предварительные результаты такой оценки на основании данных, полученных в 1996 г.

### РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемая территория ( $74^{\circ}28'12''$  с. ш.,  $20^{\circ}34'23''$  з. д.) расположена в переходной зоне

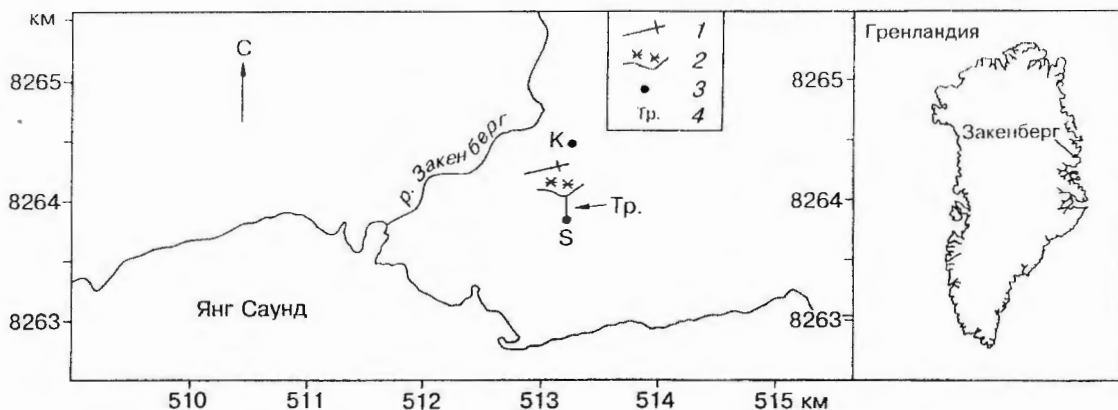


Рис. 1. Расположение объектов исследования в районе Закенберга (Северо-Восточная Гренландия).

1 — взлетная полоса; 2 — граница снежного наноса; 3 — изученные почвенные профили; 4 — трансекта между профилем S и границей снежного наноса.

между субполярными и полярными пустынями (рис. 1). Среднегодовая температура воздуха в 1995/96 гг. составляла  $-9,8^{\circ}\text{C}$  с абсолютным максимумом ( $+16^{\circ}\text{C}$ ) в середине июля и минимумом ( $-35^{\circ}\text{C}$ ) в конце декабря [Humlum, 1997]. Сумма осадков за этот период составила 223 мм, причем большая часть их выпала в виде снега в период с декабря по март. Летом 1996 г. осадки не выпадали. По геологическому строению данный регион характеризуется преобладанием гнейсов и гранитов, тогда как на соседних территориях доминируют осадочные породы [Jakobsen, 1992]. В пределах низменностей распространены некарбонатные песчаные отложения, преимущественно ледниковые, а также флювиальные и морские. Эти отложения перекрыты вторичными эоловыми осадками [Jakobsen, 1992]. Растительность варьирует от сообществ *Eriophorum scheuchzeri* и *Carex atrofusca* на заболоченных территориях до хорошо дренированных пустошей из *Cassiope spp.* и *Dryas spp.*

## МЕТОДЫ

Почвенные растворы отбирали из 2-х ключевых профилей, характеризующих заболоченный участок (профиль S) и хорошо дренированную пустошь (профиль K), а также из 6-ти профилей вдоль трансекты, секущей заболоченный участок. Сбор почвенной влаги осуществляли всасывающими пробоотборниками Plenart Super Quartz, установленными летом 1996 г. в оттаявшие горизонты на разные глубины с интервалом в 10 см. Пробоотборники со смесью кремниевой муки и порошка нержавеющей стали имели радиус пор 2 мкм и водопроницаемость  $3,31 \cdot 10^{-7}$  см  $\text{сек}^{-1}$ . Тefлоновые трубки соединяли с бутылками на поверхности почвы. Для обеспечения большего пространственного и временного разрешения [Grossmann, Udluft, 1991] отбор проб раствора производили небольшими объемами (меньше 100 мл), через короткие временные интервалы (менее 24 час.) и при низком всасывающем давлении в пробоотборниках (примерно 0,1 атм). Электропроводность, рН и щелочность воды определяли сразу после отбора, остаток воды консервировали 10%  $\text{HNO}_3$  или метанолом, а пробы хранили в прохладном темном месте. В лаборатории Fe, Mn, Mg, Ca и K определяли методом атомно-адсорбционной спектроскопии (ААС), а  $\text{Cl}$ ,  $\text{NO}_3$  и  $\text{SO}_4$  методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (HPLC).

Образцы твердой фазы почв отбирали в конце июля 1996 г. из профилей S и K через каждые 5 см с учетом границ горизонтов. В лаборатории измерение рН проводили в водной и 0,01 М  $\text{CaCl}_2$  (1:2,5)-вытяжках; органический углерод определяли путем сжигания в индукционной печи

LECO; Fe, Al и Si — в дитионит-цитратной вытяжке Мера-Джексона [Mehra, Jackson, 1958] с помощью ААС. Обменные основания (Ca, Mg, Na и K) анализировали методом ААС после экстракции  $\text{NaOOCCH}_3$  и  $\text{NH}_4\text{OOCCH}_3$ . Обменные Н и Al определяли титрованием в  $\text{KCl}$ -вытяжке. Емкость катионного обмена при актуальной кислотности почвы (ЕКОа) рассчитывали как сумму всех обменных катионов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Химические свойства почв.** Обе почвы слабокислые, рН верхних горизонтов меняется в пределах 5—6. В профиле S, развитом на эоловых отложениях, содержание органического углерода максимально в верхних 10 см, где составляет 4%; глубже по профилю оно довольно постоянно и равно 2%. Профиль K литологически неоднороден. Верхние 30 см, видимо, представлены слоем переложенных эоловых отложений, поэтому содержание углерода максимально в верхнем горизонте (6,7%) и на глубинах 20—25 см (4,9%), где находится погребенный поверхностный горизонт; на глубинах более 30 см оно не превышает 0,5%. Содержание свободных Fe и Al по Мера-Джексону уменьшается с глубиной, что отражает ослабление внутрисочвенного выветривания. Кроме того, видимо, имеют место слабый вынос этих металлов из верхних 10 см и их аккумуляция на глубине 10—30 см (рис. 2).

В профиле S, на заболоченном участке, рН и ЕКОа возрастают с глубиной в пределах верх-

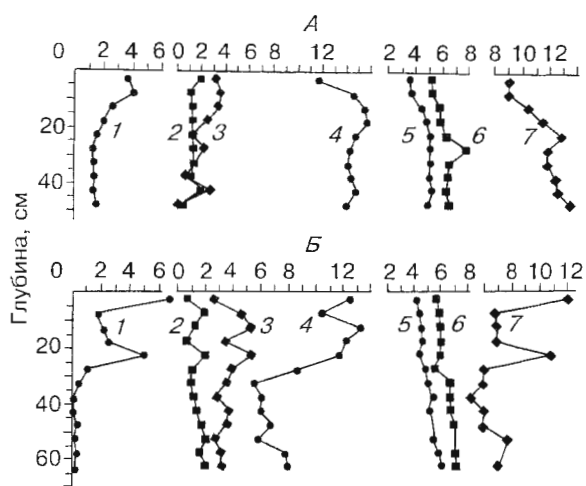


Рис. 2. Химические свойства почв.

A — заболоченный участок (профиль S); B — сухая пустошь (профиль K): 1 — содержание валового углерода (%); 2—4 — содержание: 2 — кремния (%), 3 — алюминия (%), 4 — железа (%), определенных методом Мера-Джексона; 5—6 — рН вытяжек: 5 — 0,01М  $\text{CaCl}_2$ ; 6 — водной; 7 — емкость катионного обмена при актуальной кислотности почвы (смоль/кг).

него 25-сантиметрового слоя: с рН 5,0—5,5 и ЕКОа 9 смоль(+) кг<sup>-1</sup> почвы до рН 6,5 и ЕКОа 12—13 смоль(+) кг<sup>-1</sup> почвы. Катионообменная способность данной почвы обусловлена главным образом органическим веществом и гидроокислами Fe и Al, а ее возрастание на 25% может быть следствием увеличения рН почвы [Scheffer, Schachtschabel, 1989]. Максимум ЕКОа совпадает с максимумом рН, маркируя единственный имеющийся в профиле характерный переход. Глубже 25 см значения рН и ЕКОа остаются практически постоянными. В профиле К возрастание с глубиной рН с 5,5—5,6 до 6,5—7,0 сходно с таковым в профиле S. Однако в противоположность профилю S наибольшие значения ЕКОа — 7—12 смоль(+) кг<sup>-1</sup> — наблюдаются в верхних горизонтах почвы, глубже они составляют около 6 мг-экв·100 г<sup>-1</sup>. Значения ЕКОа в профиле К контролируются главным образом значительными изменениями в содержании Fe и органического вещества по профилю.

Оба рассматриваемые профили на силикатных породах характеризуются слабым развитием почвообразования (брунификации) и положением фронта прогрессирующей ацидификации на глубине 20—30 см от поверхности почвы. Наиболее глубокая и сильная ацидификация наблюдается в профиле К, что, возможно, связано с более высокой продуцируемостью двуокиси углерода в этом лучше дренированном профиле и с более низкими значениями ЕКОа. Различия между S и К по степени перераспределения металлов предположительно связаны со значительно меньшими скоростями инфильтрации в профиле S, с разными глубинами промерзания и разной степенью концентрации веществ в подпочве.

**Химизм почвенных растворов.** Анионно-катионный баланс растворов в профилях S и К сильно различается (рис. 3). Однако в обоих случаях в составе анионной части наибольшая доля приходится на разность между суммарным содержанием катионов и неорганических анионов, вероятно, покрываемую в основном органическими кислотами [Ugolini et al., 1990]. Изменение величины разности с глубиной вероятно отражает мобилизацию органики в корнеобитаемой зоне и ее аккумуляцию у кровли мерзлоты. Существенная доля в составе анионов принадлежит также хлорид- и сульфат-ионам, тогда как бикарбонат-ионы практически отсутствуют.

В профиле S на глубине 10—20 см от поверхности почвы имеет место изменение ионной силы раствора, связанное с поступлением Ca, Na и Mg. Увеличение ионной силы соответствует увеличению ЕКОа и рН, последнее говорит о том, что процессы катионного обмена работают как буферный механизм. Однако главным процессом, поставляющим в почву основания, явля-

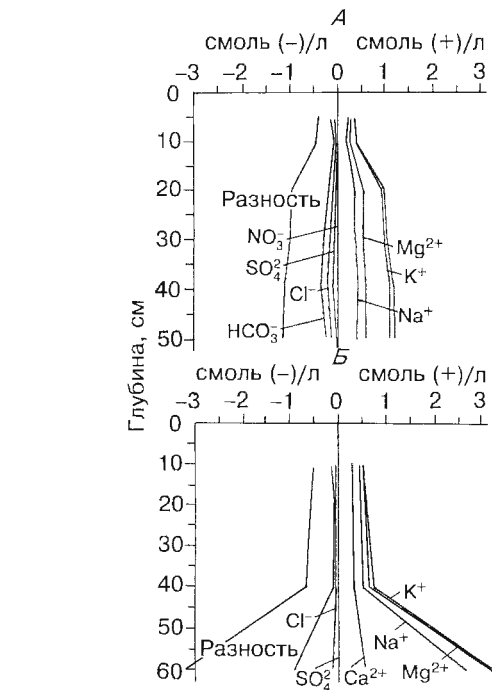


Рис. 3. Ионный состав почвенных растворов.

А — профиль S; Б — профиль К.

ется выветривание силикатов. В профиле К подобного возрастания содержания катионов на фронте ацидификации не наблюдается, что согласуется с более низким значением ЕКОа. Возрастание доли Na<sup>+</sup> и Cl<sup>-</sup> на глубинах 40—60 см, вероятно, связано с растворением солей (NaCl), выщелачиваемых из морских отложений.

Состав почвенных растворов, пробы которых отобраны вдоль трансекты 7 июля, показан на рис. 4. К северу от трансекты находился снежный нанос, тающий со скоростью примерно 1 м в неделю, что обусловило наблюдаемый градиент в глубине залегания мерзлоты. Отмечалось общее возрастание концентраций ионов и величины рН с глубиной. Содержание Na<sup>+</sup> и Cl<sup>-</sup> менялись одинаково, более высокие значения наблюдались вблизи снежного наноса. На расстоянии 10 м от него максимумы в концентрациях HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup> совпадали с высокими и почти нейтральными значениями рН. Талая вода снежного наноса была почти дистиллированной, а ее электропроводность менялась от 2 до 6 мкСм/см<sup>-1</sup>. Поскольку почва, находящаяся по направлению стока ниже снежного наноса, была насыщена водой, инфильтрация талых вод в нее отсутствовала и существенно не влияла на состав почвенного раствора.

**Динамика химического состава растворов во времени.** Пробы почвенных растворов из профилей S и К за период с 27 июня по 31 июля

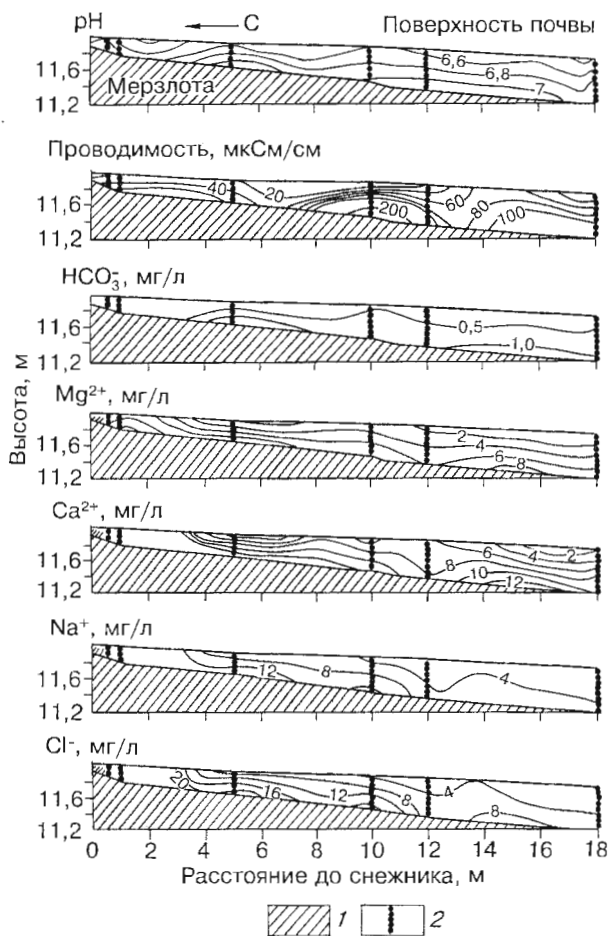


Рис. 4. Свойства и ионный состав почвенных растворов, отобранных в пределах транsekты (7.07.96 г.).

1 — мерзлые породы; 2 — профиль отбора.

отбирали 7 раз. Уменьшение pH на всех глубинах обоих профилей совпадало с общим увеличением содержания  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  (рис. 5). Динамика pH наиболее выражена в корнеобитаемой зоне (10 см) профиля S, где активно продуцировалась двуокись углерода и ЕКОа была низкой, тогда как динамика содержания кальция и магния лучше выражена на больших глубинах, где ЕКОа была высокой и катионы вовлекались в обменные процессы.

Общее возрастание электропроводности и концентрации всех ионов с глубиной в пределах транsekты может быть связано как с химическими процессами, так и с физической транспортировкой ионов сверху вниз в результате промерзания. В условиях отсутствия или крайне малого количества летних осадков, промерзание может быть наиболее важным фактором, контролирующим общее распределение ионов.

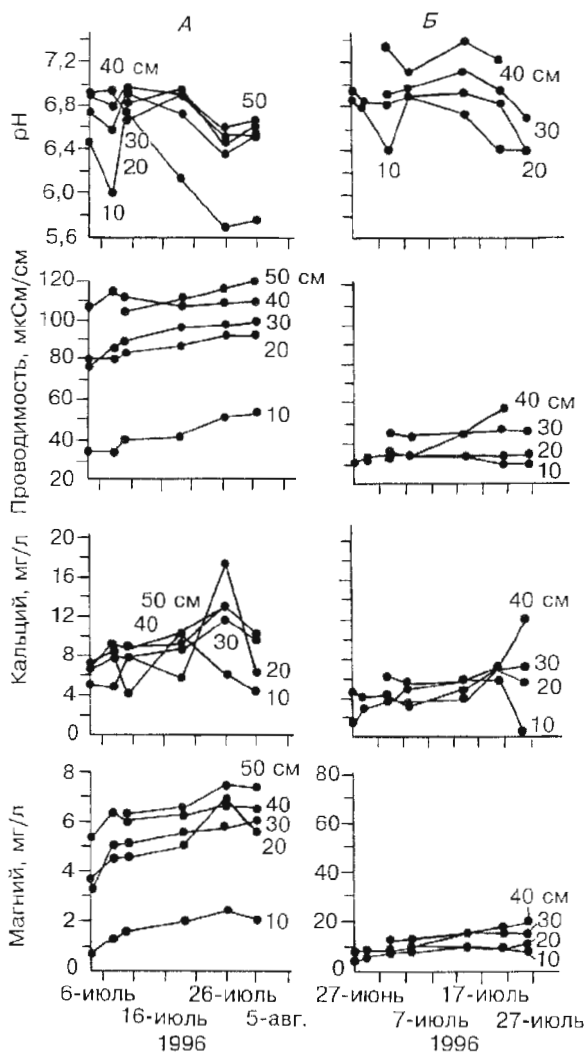


Рис. 5. Динамика свойств почвенных растворов на различных глубинах в период с 4.06 по 31.07.96 г.

А — заболоченный участок; Б — сухая пустошь.

**Модель связи оттаивания и ацидификации.** Несмотря на принципиальное научное и, возможно, практическое значение вопроса о связи поступления кислоты и скорости выветривания, применительно к Арктике, он до сих пор исследован недостаточно. Характер взаимодействия кислых растворов с твердой фазой зависит от типа силикатных отложений, pH, местного климата, мерзлоты и экологических особенностей растений. Приведенные данные говорят о том, что даже в пределах небольшой площади взаимосвязь между поступлением кислоты (продуцированием двуоксида углерода), буферностью, промерзанием и происходящей в результате этих процессов ацидификацией довольно сложна.

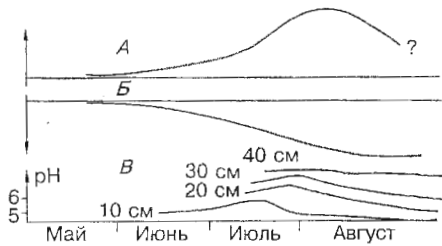


Рис. 6. Предварительная схема acidификации почвы в связи с ее протаиванием и выходом двуокиси углерода.

А — принципиальная динамика эмиссии  $\text{CO}_2$  из почвы; В — принципиальная динамика глубины протаивания почвы; С — динамика величины pH почвы на разных глубинах.

Представленные предварительные результаты не могут служить надежным обоснованием для построения общей модели взаимосвязи между подкислением и промерзанием в почвах Арктики. Однако эти данные не противоречат нашей базовой теоретической модели (рис. 6), согласно которой в мерзлотной области pH почвы тесно связан с изменением в течение лета выхода двуокиси углерода и глубины протаивания. Весной (май-июнь), когда почва тает, буферные процессы активны, а выход двуокиси углерода ограничен. Как следствие, в этот период может возрастать pH. С началом вегетационного периода и повышением температур почвы, разложение органики и дыхание продуцируют больше кислоты, чем может быть компенсировано буферными процессами, и pH вновь понижается. Подобная динамика pH лучше выражена в корнеобитаемой зоне (0-15 см). С определенной глубины ниже этой зоны, pH сохраняет почти постоянные значения в течение лета, поскольку здесь буферная система почвы уже способна противостоять слабой диффузии двуокиси углерода.

### ВЫВОДЫ

Состав почвенного раствора контролируется различными процессами: физическими (промерзание-протаивание), биологическими (продуцирование двуокиси углерода) и геохимическими (выветривание и ионный обмен). Совместное их действие вызывает значительные пространственные и временные изменения состава растворов. В пределах 18-метровой трансекты, вытянутой вдоль геохимического градиента, выявлено несколько типов почвенных растворов, формирующихся под влиянием приповерхностного разбавления почти дистиллированной водой, образующейся при таянии снежного наноса; выщелачиванием солей (Na и Cl) из морских осадков;

выветриванием и концентрацией ионов ниже корнеобитаемой зоны.

Подкисление почвы наблюдается в верхних 20—30 см, где значения pH составляют 5,0—5,5. Ниже этой области значения pH лежат в интервале от 6 до 7. Буферная способность почвы обусловлена выветриванием силикатных минералов и катионным обменом. Ацидификация связана главным образом с продуцированием двуокиси углерода, а уровень кислотности варьирует на протяжении летнего периода.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим сотрудников Института географии за выполнение химических анализов и Датский центр полярных исследований за материально-техническое обеспечение работ. Работа выполнена в рамках междисциплинарного исследовательского проекта «Арктический ландшафт: взаимодействия и обратные связи физических и биологических процессов». Проект финансируется Датским советом по естественным наукам и Институтом географии Копенгагенского Университета.

### Литература

- Dubikov G. I., Ivanova N. V., Aksenov V. I. Pore solution of freezing ground and its properties // The Fourth International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska, National Academy Press, Washington, D. C., 1983, p. 333—338.
- Elberling B., Jakobsen B. H. Water chemistry during snow melt and soil thawing in a permafrost area // ZERO-Zackenberг Ecological Research Operation. 2-nd Annual Report, 1997, p. 52.
- Graham E. R., Lopez P. L. Freezing and thawing as a factor in the release and fixation of soil potassium as demonstrated by isotopic exchange and calcium exchange equilibrium // Soil Science, 1969, 108, p. 143—147.
- Grossmann J., Udluft P. The extraction of soil water by the suction-cup method: a review // J. of Soil Sci., 1991, 42, p. 83—93.
- Humlum O. Zackenberg Basic — The GeoBasis programme // ZERO, Zackenberg Ecological Research Operation. 2-nd Annual Report, 1997, p. 11-23.
- Jakobsen B. H. Preliminary studies of soils in North-East Greenland between 74° and 75° Northern Latitude // Geografisk Tidsskrift, 1992, 92, p. 111—115.
- Kay B. D., Groenevelt P. H. The redistribution of solutes in freezing soil: exclusion of solutes // The Fourth International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska, National Academy Press, Washington, D. C., 1983, p. 584—588.
- McKeague J. A., Day J. H. Dithionite- and oxalate-extractable Fe and Al as acids in differentiating various classes of soils // Can. J. Soil Sci., 1966, 46, p. 13—22.
- Mehra O. P., Jackson M. L. Iron oxide removal from soils and clays by dithionite citrate system buffered with sodium bicarbonate // Clays and Clay minerals. Monograph no. 5. Earth Sciences Series. Proceedings of the 7th National Conference on Clay and Clay Minerals. 1958. Pergamon Press, New York, 1960, p. 317—327.
- Scheffer F., Schachtschabel P. Lehrbuch der Bodenkunde, Enke, Stuttgart, Germany, 1989, p. 344.

**Sletten R. S.** The formation of pedogenic carbonates on Svalbard: The influence of cold temperatures and freezing // Proceedings of 5th International Conference of Permafrost. 1988, Trondheim, Norway: 467—472.

**Sletten R. S., Ugolini F.C.** Pedogenic processes in well-drained soils of Spitsbergen and Nordaustland. Inter-Nord, 1990, no 19, p. 465—470.

**White A. F., Brantly S. L.** Chemical weathering rates of silicate minerals: An overview // Reviews in Mineralogy, 1995, 31, p. 1-22.

**Ugolini F.C., Sletten R. S.** The role of proton donors in pedogenesis as revealed by soil solution studies // Soil Science, 1991. 151(1), p. 59—75.

**Ugolini F.C., Sletten R.S., Marrett D.J.** Contemporary pedogenic processes in the Arctic: brunification // Science du soil, 1990, 28(4), p. 333—348.

*Поступила в редакцию  
26 сентября 1997 г.*