



003057763

*На правах рукописи*

СПИРИДОНОВА Инга Александровна

**ПОЧВООБРАЗОВАНИЕ И ВЫВЕТРИВАНИЕ  
НА ПЛОТНЫХ ГИПСАХ В БОРЕАЛЬНОЙ ЗОНЕ:  
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ**

25.00.23 – физическая география и биогеография,  
география почв и геохимия ландшафтов

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Москва – 2007

Работа выполнена в Лаборатории географии и эволюции почв  
ИНСТИТУТА ГЕОГРАФИИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Научный руководитель: Доктор географических наук  
Сергей Викторович ГОРЯЧКИН

Официальные оппоненты: Профессор, доктор биологических наук  
Мария Иннокентьевна ГЕРАСИМОВА

Кандидат географических наук  
Дмитрий Евгеньевич КОНЮШКОВ

Ведущая организация: Московский Педагогический Государственный  
Университет (МПГУ)

Защита состоится "20" апреля 2007 г. в 11 час. на заседании  
диссертационного совета Д.002.046.03 в Институте географии РАН по  
адресу: 119017, Москва, Старомонетный пер., 29. Факс (495) 959 00 33

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГ РАН.

Автореферат разослан "20" марта 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Кандидат географических наук



Л.С. Мокрушина

**Актуальность исследования.** Определение роли магеринских пород в формировании почв является одной из точек роста современного генетического почвоведения. Поэтому весьма важно накопление и систематизация знаний о почвах, формирующихся в разных условиях климата на различных, в том числе редких и специфических по своим свойствам, магеринских породах Почвы, сформированные на плотных гипсах (ППГ), имеют крайне ограниченное распространение во всем мире, несмотря на то, что гипс ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) является одним из широко распространенных минералов литосферы и педосферы. На фоне многочисленных работ по аридным и семиаридным почвам с аккумуляцией вторичного гипса, крайне мало данных по почвам, материнскими породами которых являются плотные гипсы. Их классификация еще недостаточно разработана, и сведений об этих почвах, как правило, нет ни на почвенных картах, ни в учебниках по почвоведению.

Большинство известных к настоящему времени ППГ характеризуется высоким содержанием силикатных и карбонатных минералов. Однако не так давно на севере Европейской части России (ЕЧР) были обнаружены уникальные почвы с чисто гипсовой минеральной основой, без силикатных, карбонатных или каких-либо других примесей. Можно предположить, что развитие таких почв должно отличаться от широко известной схемы почвообразования с синтезом и/или относительным накоплением устойчивых минералов в почвенном профиле. Изучение этой модели почвообразования представляет большой интерес для почвоведения и географии почв.

Мономинеральные плотные гипсы являются конгруэтно растворимыми и наиболее легко растворимыми материнскими породами, что делает ППГ удобной моделью для изучения процессов и скоростей внутрпочвенного выветривания в холодном гумидном климате.

**Цели и задачи.** Цель исследования - выявить основные процессы почвообразования и выветривания на плотных гипсах в бореальной зоне, оценить их скорости и выявить их географические закономерности.

В рамках этой цели сформулированы следующие задачи:

1. Дать анализ представлений о почвообразовании на плотных гипсах и подходов к классификации почв на плотных гипсах.
2. Охарактеризовать организацию, состав и свойства бореальных почв на плотных гипсах.
3. Выявить основные процессы и механизмы формирования бореальных почв на плотных гипсах; выявить их пространственную изменчивость.
4. Экспериментально исследовать скорости процессов почвообразования на мономинеральных плотных гипсах в бореальной зоне.

**Объекты и районы исследования.** Почвы на нижнепермских плотных гипсах мономинерального, химически чистого состава в северной, средней и южной тайге ЕЧР в Архангельской и Пермской областях.

**Предмет исследования.** Настоящее исследование имеет почвенно-генетико-географическое направление; его предметом являются процессы почвообразования на плотных гипсах, их зависимость от факторов почвообразования, их скорости в бореальной зоне ЕЧР.

**Защищаемые положения.**

1. Бореальные почвы на мономинеральных плотных гипсах представляют собой уникальный случай, описываемый особой моделью педогенеза без образования и накопления устойчивых твердофазных минеральных продуктов в почвенной толще. В профиле исследованных почв плотный гипс в результате совместной работы процессов физической дезинтеграции, преимущественно криогенной, и (био)химического растворения последовательно трансформируется в гипсовые щебень, дресву и мелкозем, которые накапливаются благодаря превалированию дезинтеграции над растворением, интенсивность дезинтеграции возрастает, а интенсивность растворения снижается с уменьшением мощности лесной подстилки.
2. Экспериментально определенная скорость биохимического растворения плотного гипса под лесной подстилкой в северотаежных условиях составляет около 20 г/кг или 0.02 г/см<sup>2</sup> в год или 9 мм/100 лет, что соответствует скорости тотального выноса 6.5 мг CaO и 9.3 мг SO<sub>3</sub> на 1 см<sup>2</sup> поверхности гипса в год.

**Научная новизна работы.** Все защищаемые положения составляют новизну работы. Впервые детально исследованы ППГ, у которых все элементы минеральной части профиля (щебень, дресва, мелкозем, кутаны) состоят из практически чистого гипса. Выявлен уникальный тип почвообразования, не образующий долгоживущих твердофазных минеральных продуктов. Усовершенствована система индексации и диагностики горизонтов ППГ. Показано разнообразие морфологического строения ППГ в зависимости от факторов почвообразования. Впервые выполнена экспериментальная оценка скорости растворения плотных гипсов в северотаежных условиях

**Практическая ценность работы.** Представленная в диссертации идеальная модель почвообразования на плотных гипсах может послужить существенным расширением и дополнением к курсу генетического почвоведения и географии почв в высших учебных заведениях. Спектр почв на плотных гипсах, описанных в данной работе, может стать материалом для обсуждения при разработке и усовершенствовании классификации почв. Детальная характеристика ППГ позволяет внести их в Красную книгу почв, что послужит сохранению почвенного и биологического разнообразия в целом.

**Апробация работы.** Результаты исследований представлены на пяти российских и семи международных научных форумах, в том числе на 17-ом международном конгрессе почвоведов (Бангкок, 2002), международном

симпозиуме "Функции почв в геосферно-биосферных системах" (Москва, 2001), III Съезде Докучаевского общества почвоведов (Суздаль, 2000), международной конференции "Роль почвы в функционировании экосистем" (Люблин, 1999) и др.

**Публикации.** Результаты опубликованы в 19ти научных работах (6ти статьях и 13ти тезисах докладов конференций), в том числе в журналах из списка ВАК - "Почвоведение" и «Известия РАН, серия географическая».

**Структура и объем работы.** Диссертация объемом 127 страниц состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы (содержащего 100 источников, из них 42 на иностранных языках) и приложений. В ней содержится 49 рисунков и 22 таблицы.

**Благодарности.** Автор приносит благодарности С.В. Горячкину и В.О.Таргульяну за помощь в постановке и проведении исследования и в обсуждении результатов, а также за внимательное критическое прочтение диссертации. Автор благодарит Н.А. Караваеву за ценные советы по написанию автореферата. Большую признательность автор выражает сотрудникам химической лаборатории ИГРАНа А.М. Чугуновой и Т.А. Востоковой за помощь в химических исследованиях. Автор благодарен С.Н. Лесовой из СПбГУ за помощь в проведении и интерпретации результатов рентген-дифрактометрического анализа исследованных почв, С.Н. Седову за содействие в электронно-микроскопическом анализе почв, и сотрудницам Проблемной биологической лаборатории Н.С. Сугоркиной, О.В.Залесской и Е.М. Даниловой за помощь в определении растений. Большая благодарность Е.В.Шавриной (Пинежский заповедник), А.А. Семиколенных и Т.А. Туюкиной за сотрудничество в работе, а также всей лаборатории географии и эволюции почв ИГРАН за участие в обсуждении работы и полезные советы.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Глава 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ФАКТОРАХ И СУЩНОСТИ ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ НА ПЛОТНЫХ ГИПСАХ В БОРЕАЛЬНОЙ ЗОНЕ**

#### **(1.1.) Особенности бореального почвообразования**

В условиях холодного гумидного климата, на преобладающих в тайге ЕЧР материнских породах ледникового генезиса, в автономных позициях формируются зональные почвы – подзолы, подзолистые и др. Для этих почв характерны процессы оподзоливания, лессиважа, элювиально-иллювиального перераспределения оксидов Fe и Al, гумуса и пр.; для формирования зрелого профиля требуется до 3 тыс. лет [Геннадиев; Глазовская, Геннадиев]. Спектр автономных мезоморфных почв существенно расширяется в карстовых областях, где из-под чехла четвертичных отложений на поверхность выходят более древние, в частности, пермские карбонатные и сульфатные породы. На последних формируются почвы, описанные ранее как сульфореңдзины –

морфологически сходные с рендзинами (почвами на карбонатных породах), но сильно отличающиеся от них по свойствам; предполагалось, что формирование зрелого профиля сульфореנדзин занимает первые сотни лет [Горячкин, Макеев, Горячкин]. В каждой материнской породе, в связи с особенностями ее состава, генетически заложена лимитированность проявления тех или иных почвообразующих процессов, и в частности, в почвах на плотных гипсах проявляется менее половины элементарных почвообразовательных процессов, характерных для таежных пластово-денудационных и карстовых равнин [Горячкин].

### **(1.2.) Почвообразование на плотных гипсах в мире**

Почвы на плотных гипсах встречаются довольно редко, в основном в умеренных и субтропических широтах северного полушария. Ф.Дюшофур различает ППГ (1) гумидных бореальных областей, характеризующиеся поверхностным накоплением подстилки и грубого гумуса, и (2) семиаридных континентальных и средиземноморских областей, отличающихся присутствием поверхностных гипсовых и солевых корочек. Интерес к исследованию этих почв до настоящего времени был невысок, и количество публикаций по ним весьма ограничено. Представители первой группы описаны в европейской части России [Высоцкий; Гагарина и др.; Горячкин], в Польше [Strzemski; Wicik; Ciarkowska], Румынии [Micleus, Scabo] и Германии [Heinze]. Представители второй группы есть на южном Урале [Климентьев и др.], в Италии [Dazzi, Scalenghe; Dazzi *et al.*], Испании [Herrero *et al.*; Elorza and Santolalla; Machin, Navas], Иране [Owliaie *et al.*] и США [Meyer]. Часто о возможном существовании ППГ в том или ином регионе можно судить лишь по упоминаниям о поверхностном гипсовом карсте – в Швейцарских Альпах, в Албании ("Белые горы"), на Кавказе и Памире, на Ферганском хребте в Тянь-Шане, Туркмении (Мингчугур или "Тысячи ям"), Узбекистане (плато Устюрт), Китае, Монголии, Сирии, Алжире, Ливии, Тунисе, Венесуэле, Аргентине, Мексике, в пределах Канадского Арктического архипелага [Моташ и др.; Гвоздецкий; Klimchouk *et. al.*; Calaforra, Pulido-Bosch].

### **(1.3.) Гипсовый карст и его влияние на почвообразование**

Основные черты современных карстовых ландшафтов закладывались в послеледниковье, когда сквозь массивы легкорастворимых пород просачивались огромные массы воды [Малков]. Гипсовый карст развивается много быстрее чем карбонатный, т.к. растворимость гипса в воде при 20<sup>0</sup>С в 183 раза больше, чем растворимость кальцита [Якуч]. Выделяют зоны слабой, средней и сильной трещиноватости гипсовых массивов, к которым приурочены соответствующие степени развития карстового рельефа: в зонах слабой трещиноватости развиваются редкие заболоченные карстовые депрессии, тогда как в зоне сильной трещиноватости густота карстовых форм (воронок, останцов и пр.) достигает 1500 к ф./ км<sup>2</sup> [Сабуров; Малков]. В последних почвенный покров характеризуется максимальной сложностью и мелкоконтурностью, что связано с широким разнообразием материнских пород (в т.ч. встречаются ППГ)

[Горячкин]. Широко известен феномен повышения разнообразия растительности в карстовых ландшафтах за счет присутствия видов термофилов и петрофилов, ксерофитов и гипсофитов, в том числе редких и эндемичных [Пучнина и др.; Chmielewski et. al.; Schnug et.al.; Romao, Escudero].

#### **(1.4.) Образование, состав и устойчивость плотных гипсов**

Плотные гипсы являются хемогенно-осадочными породами. На территории исследований их накопление происходило в начале пермского периода, 258 - 286 миллионов лет назад [Страхов]. Гипсовые осадки после захоронения подверглись уплотнению и катагенезу – в результате дегидратации гипс перешел в полугидрат или бассанит ( $\text{CaSO}_4 \times 0.5\text{H}_2\text{O}$ ) и далее в ангидрит ( $\text{CaSO}_4$ ), впоследствии, в результате эрозии вышележащих отложений давление снизилось, и началась гидратация ангидрита с образованием гипса, что сопровождалось интенсивным образованием трещин в массиве.

Помимо реликтов ангидрита, в качестве микрокомпонентов в плотных гипсах встречаются целестин  $\text{SrSO}_4$ , барит  $\text{BaSO}_4$ , доломит  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , кальцит  $\text{CaCO}_3$ , иногда магнезит  $\text{MgCO}_3$ , флюорит ( $\text{CaF}_2$ ), терригенный материал и органическое вещество (углистые включения). Чистый гипс ( $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ ) имеет состав: 32.5 % CaO, 46.5%  $\text{SO}_3$  и 21%  $2\text{H}_2\text{O}$  [Рухин]

Плотные гипсы относительно быстро растворяются под действием карстовой денудации (около 30 мм/100 лет [Гвоздецкий; Горбунова и др., Шаврина]), а также конденсационной коррозии (6 мм в 100 лет [Корогкевич; Дублянский, Дублянская]).

#### **(1.5.) Процессы растворения и переотложения гипса**

Гипс имеет растворимость около 2,4 г/л, которая мало зависит от температуры, но может сильно снижаться в присутствии других сульфатов и возрастать в присутствии хлоридов [Сонненфелд; Hardie]. В чистой воде режим растворения гипса диффузионно-кинетический: скорость растворения растёт с увеличением времени контакта с раствором и скорости перемешивания раствора [Лебедев и Лехов; Lui and Nancollas] Гипс может переотлагаться либо при испарении растворов (в аридных почвах, в пещерах [Сонненфелд, Рогожников]), либо в результате "вымораживания" из раствора [Черников и др.; Коницев]. Гипс лучше всего кристаллизуется при значениях pH от 7 до 8. Размер кристаллов уменьшается с ростом pH, концентрации раствора и скорости его испарения, в присутствии органических веществ [Сонненфелд]. Как правило, в почвах образуются линзовидные кристаллы, а для пород характерны игольчатые, скрытокристаллические и прочие формы гипса [Porta].

#### **(1.6.) Основные концепции и современные проблемы в области изучения процессов выветривания и почвообразования, развивающихся на плотных гипсах, и их связь с задачами настоящего исследования**

*Гипотезы о формировании карбонатов из гипса.* Существующие интерпретации генезиса окарбончатенных почв на плотных гипсах базируются на двух группах гипотез. Большинство исследователей считает накопление

кальцита в верхних горизонтах почв результатом растворения карбонатно-гипсовой породы [Гагарина и др.; Горячкин, Makeev; Strzemski; Duchaufour] Некоторые исследователи считают, что кальцит синтезируется из гипса в ходе почвообразования – под действием карбоната аммония, образующегося в ходе разложения органического вещества:  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3 + \text{CaSO}_4 = \text{CaCO}_3 + (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  [Высоцкий; Wicik] или в результате поглощения  $\text{Ca}^{2+}$  растениями, его возврата с опадом в форме  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  и последующего осаждения в форме  $\text{CaCO}_3$  [Пономарева].

*Проблема развития почв без силикатной составляющей* Уникальным свойством некоторых ППГ является их крайне "чистый" химический состав – кроме  $\text{CaO}$  и  $\text{SO}_3$  содержание всех остальных окислов приближается к ошибке валового анализа [Горячкин]. Принято считать, что процесс почвообразования сопровождается относительным накоплением устойчивых минералов в почвенном профиле, и практически неизвестно, какими механизмами определяется развитие почв с гипсовой основой без силикатных и карбонатных примесей.

*Вопросы классификации.* К настоящему времени в мире существует несколько подходов к классификации ППГ. В Центральной и Восточной Европе почвы на окарбоначенных гипсах называют рендзинами сульфатными или гипсовыми [Strzemski; Duchaufour; Heinze; Micleus, Scabo; Wicik; Ciarkowska], т.е., сближают ППГ с почвами на карбонатных породах, рендзинами. В Италии и Испании почвы на плотных гипсах называются Calcic Gypsisols, т.е. приравниваются к почвам со вторичными гипсовыми аккумуляциями [Dazzi, Scalenge; Romao, Escudero]. При обнаружении бескарбонатных ППГ на севере России было предложено выделить их в отдельный тип под названием "сульфурендзины", которое соответствует упомянутой европейской традиции, но подчеркивает отличие ППГ от рендзин [Горячкин]. Однако в последнюю Российскую классификацию [2004] ППГ вошли как примитивные почвы, гипсопептрозоми. Это название вполне соответствует термину WRB [1998] Hypergypsic Leptosols. Однако под это определение не попадают развитые, мощные ППГ, в профиле которых плотный гипс превращен в результате дезинтеграции в муку. Недавно было предложено ввести их в классификацию как дезинтеграционно-метаморфические почвы, "гипсобелоземы" [Горячкин].

## **Глава 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Исследования проводились в гипсово-карстовых ландшафтах Архангельской и Пермской областей, в подзонах северной тайги (в районах Государственного природного заповедника "Гинеевский" и Государственного ландшафтного заказника "Чугский"), средней тайги (в районе пристани Звон на Северной Двине) и южной тайги – в окрестностях г. Кунгур.

### **(2.1.) Физико-географическая характеристика районов исследования**

Районы исследований характеризуются умеренно континентальным, гумидным климатом; большинство осадков выпадает летом; годовой

коэффициент увлажнения лежит в пределах 1.1–1.6. Изменение климатических характеристик от западных северотаежных районов исследования к восточному южнотаежному выражается в постепенном увеличении среднегодовых температур (от -0.2 до +1.3) и суммы температур  $>10^{\circ}\text{C}$  (от 1000 до 1850), нарастании континентальности климата (например, разницы между температурами самого холодного и самого теплого месяцев) и снижении увлажнения (среднегодовое количество осадков уменьшается примерно на 20%, от 650 до 497 мм); продолжительность безморозного периода увеличивается на 20-30 дней (от 85-95 до 115), а продолжительность периода с устойчивым снежным покровом снижается примерно на 10 дней (от 173 до 165).

Для всех районов характерен карстовый рельеф и выходы нижнепермских гипсов (тастубского горизонта сакмарского яруса в северо- и среднетаежных районах, иренского горизонта кунгурского яруса в южнотаежном районе), на которых формируются исследуемые почвы.

Зональные таежные (хвойные) леса в гипсово-карстовых ландшафтах, как правило, имеют высокий бонитет за счет улучшенного дренажа и прогреваемости субстратов. В тех редких случаях, когда гипсы преобладают среди материнских субстратов, развиваются специфические олиготрофные фитоценозы – таежные карстовые редколесья [Горячкин, Туюкина и др.]. Видовой состав растительности карстовых ландшафтов обогащается нетипичными для тайги видами: встречаются аркто-альпийские виды и эндемичный гипсофит качим пинежский (в северной тайге), неморальные (во всех подзонах) и степные виды (в южной тайге).

## **(2.2.) Объекты исследования**

Наше внимание было сосредоточено на ППГ с чисто гипсовой минеральной основой (изучен 21 разрез, 20 прикопок, траншея по склону карстовой воронки). Были также описаны почвы на гипсово-карбонатных породах (3 разреза) и, для сравнения, на доломитах (3 разреза).

При описании профилей ППГ мы столкнулись с проблемой недостатка индексов и определений для их очень специфичных горизонтов в современной "Классификации и диагностике почв России" [2004], куда входят только слабо развитые ППГ, где подстильно-торфяной горизонт О залегает непосредственно на плотном гипсе  $M_{cs}$  (предлагается субстратные признаки обозначать подстрочно). В этой классификации отсутствуют развитые ППГ с горизонтом, где плотный гипс превращен в результате внутрпочвенного выветривания в мелкозем – этот горизонт было предложено назвать "дезинтеграционно-метаморфический" ( $BDM_{cs}$ ) [Горячкин]. Мы предлагаем также использовать индекс  $Mdm_{cs}$  для обозначения щебнистого гипсового горизонта, являющегося переходным от  $BDM_{cs}$  к  $M_{cs}$ . В случаях почвообразования на коллювиях, мы обозначали породу индексом  $C-M_{cs}$ .

## **(2.3.) Методы исследований**

Для всех ППГ выполнены общие описания, анализы и приведены краткие морфо-аналитические характеристики: макроморфология, гранулометрический

состав (сухое просеивание), рН водный и солевой, потери при прокаливании в органогенных горизонтах и содержание гумуса в минеральных горизонтах. Для выборочных разрезов ППГ проведены детальные мезо-, микро- и субмикроморфологические исследования, определения объемной плотности, валовой химической и минералогической (рентген-дифрактометрия в неориентированных препаратах) анализы. Экспериментально исследованы скорости основных элементарных почвообразующих процессов (ЭПП) на начальных стадиях формирования ППГ в северной тайге (см. Главу 5)

### Глава 3. МОРФО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТАЕЖНЫХ ПОЧВ НА ПЛОТНЫХ ГИПСАХ

#### (3.1.) Морфология ППГ

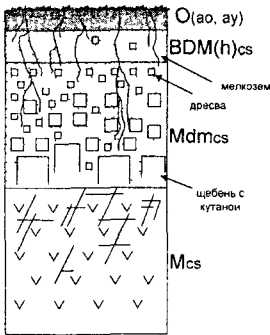


Рис 1 Схема строения профиля развитой ППГ

*Макроморфология.* В таежных карстовых ландшафтах Европейской части России на локальных выходах нижнепермских гипсов формируются почвы, профили которых имеют мощность от десятка сантиметров до полутора метров и строение от O – M<sub>cs</sub> (слаборазвитые почвы, гипсопегроземы) до O(ao, ay) – BDM(h)<sub>cs</sub> – Mdm<sub>cs</sub> – M<sub>cs</sub> (развитые почвы, рис. 1), где ниже подстилочно-торфяного горизонта, часто имеющего некоторые признаки грубогумусового и/или серогумусового горизонтов, залегает минеральный дезинтеграционно-метаморфический горизонт, состоящий преимущественно из гипсовой муки (частицы < 1мм) и иногда слабо прокрашенный гумусом и оксидами железа (которые являются продуктами разложения опада, мертвых корней и грибных гифов), ниже переходящий к менее раздробленному, дресвянисто-щебнистому горизонту и затем к плотному гипсу

Уникальным морфологическим элементом ППГ являются натечные гипсовые кутаны на нижней стороне дресвы и щебня плотного гипса. Корни растений, крупные и тонкие, глубоко проникают в плотный гипс по крупным трещинам. В таких трещинах нередко накапливается "корневой войлок", густо оплетенный гифами грибов, и гипсовая мука, окрашенная гумусовыми соединениями, образовавшимися в результате разложения корней.

*Мезоморфология.* Гипсовый щебень и дресва имеют кавернозную поверхность и множество трещин, по которым они легко разламываются; дресва из верхних горизонтов растирается пальцами до муки. Мелкозем ППГ в основном не агрегирован, за исключением единичных копролитоподобных агрегатов в верхней части горизонта BDM<sub>hcs</sub>. Гипсовые кутаны варьируют от бледно-палевых фрагментарных пленочных образований до ярких буровато-охристых бугорковатых корок толщиной 3-5 мм (иногда до 7 мм). Окраска

кутан обусловлена присутствием органических и железистых соединений. Граница между кутаной и белым гипсом щебня резкая.

*Микроморфология* Наименее выветренные частицы крупнозема сложены малоизмененным гипсом материнской породы, имеющим ксеноморфно-разнозернистую и спутанно-волоконистую структуру. Более выветренные частицы дресвы сложены трещиноватым микрозернистым гипсом. Гипсовая мука представлена индивидуальными ромбовидными кристаллами (0.004-0.02 мм), таблитчатыми кристаллами (0.04-0.8 мм) и игольчатыми кристаллами (0.1-0.3 мм); причем крупные кристаллы (0.01-1 мм) имеют корродированный край, а мелкие (< 0.01мм) имеют правильную форму. В массе гипсовой муки в верхней части горизонта  $BDMh_c$  обнаруживаются частицы грубого органического вещества (хлопьев, чешуек, комочков) и фрагменты разрушающихся кутан. В горизонтах  $BDMh_c$  и  $Mdm_{cs}$  регулярно встречаются отдельные крупные гипсовые кристаллы (до 2 мм) – "пойкилиты" – с многочисленными включениями микро- и мелкозернистого ангидрита.

*Субмикроморфология* Среди признаков растворения на поверхности гипсовой дресвы отмечено: селективное травление микрозернистого гипса вдоль линий спайности индивидуальных кристаллов (этчинг), не имеющих общей ориентировки; зубчатые края пластинчатых кристаллов; останцы кристаллов волоконистого гипса. Кутаны образованы из линзовидных кристаллов гипса (0.03-0.04 мм) и несут как признаки роста, так и признаки растворения. Об активных процессах роста кристаллов кутан свидетельствует тот факт, что грибные гифы, по-видимому, еще живые, оказываются заключенными внутри кристаллов кутаны.

### **(3.2.) Данные сухого просеивания, определения объемной плотности и наименьшей влагоемкости**

Усредненная характеристика минеральных горизонтов ППГ по содержанию фракций крупнозема и мелкозема и объемной плотности представлена в таблице 1, которая может оказаться полезной при выборе диагностических критериев для дезинтеграционно-метаморфических горизонтов. Горизонты различаются наиболее четко по содержанию гипсовой муки:  $BDM_{cs}$  – более 50%,  $Mdm_{cs}$  – от 10 до 50%,  $M_{cs}$  – менее 10%. Другим важным критерием различия горизонтов можно считать соотношение гипсового щебня и дресвы:  $BDM_{cs}$  – дресвы больше, чем щебня,  $Mdm_{cs}$  – дресва и щебень в примерно равных количествах;  $M_{cs}$  – щебень резко преобладает. В случаях "пограничных" значений содержания гипсовой муки, соотношение дресвы и щебня помогает диагностировать горизонт. Например, если верхний минеральный горизонт содержит 49% гипсовой муки, 45% дресвы и всего 6% щебня, мы диагностируем как  $BDM_{cs}$ , а не  $Mdm_{cs}$ . В гипсовой муке доля частиц <0.1 мм варьирует от 36% до 63%, что соответствует механическому составу от среднего суглинка до легкой глины. Полевая влагоемкость горизонтов  $BDM_{cs}$  и  $Mdm_{cs}$  составляет 24-27% и сопоставима с влагоемкостью суглинистых почв с кварц-силикатной основой.

Таблица 1. Усредненная характеристика горизонтов ППГ по содержанию гипсового щебня, дресвы и муки и объемной плотности

Горизонты	Содержание фракций, % (вверху - минимальные и максимальные значения, внизу - средние)			объемная плотность, г/см <sup>3</sup>
	щебень, >10 мм	дресва, 10-1 мм	мука, <1 мм	
BDM <sub>cs</sub>	<u>0 – 16</u> 7	<u>22 – 63</u> 30	<u>49 – 79</u> 59	<u>0.7 – 1.05</u> 0.95
Mdm <sub>cs</sub>	<u>10 – 68</u> 35	<u>12 – 55</u> 33	<u>12 – 44</u> 29	<u>1.05 – 1.12</u> 1.09
M <sub>cs</sub> (плотный гипс)	<u>82 – 97</u> 88	<u>1 – 11</u> 7	<u>2 – 8</u> 5	<u>2.05 – 2.16</u> 2.11

### (3.3.) Аналитическая характеристика

*pH* Как и для большинства почв таежной зоны, для ППГ характерны кислые и сильнокислые значения *pH* подстилок. Реакция минеральных горизонтов ППГ слабокислая; внутри крупных трещин, где обнаруживаются обильные скопления корней, *pH* снижается до сильнокислой. Специфическим свойством ППГ является превышение  $pH_{KCl}$  над  $pH_{H_2O}$  (свойство «джерик» [WRB]), что характерно для почв с положительным зарядом, способных действовать как анионообменник.

*Потери при прокаливании* подстильно-торфяного горизонта в целом высоки: в слабо-разложившемся материале (O1) достигают 90-95%, а в сильно-разложившемся (O3) – 60-80%.

*Содержание гумуса* в минеральных горизонтах ППГ обычно низко, 0.5-1.5%, но в горизонте BDM<sub>cs</sub> оно может достигать 2-3%. В мелкозему внутри крупных трещин оно может подниматься до 8%, что можно объяснить высоким содержанием органического вещества, формируемого в результате разложения корней и гифов, сконцентрированных в этих трещинах.

В *составе гумуса* резко преобладают фульвокислоты ( $C_{гк}/C_{фк} < 0.3$ ), представленные кислоторастворимой фракцией; очень высока доля негидролизуемого остатка - около 90%. Такое высокое содержание гумина мы связываем с тем, что гумус этих почв «незрелый»: гумусовые вещества, образующиеся при разложении растительных остатков, сразу же связываются с кальцием и коагулируют.

Данные *валового химического анализа* ППГ свидетельствуют о том, что материнская порода и минеральные горизонты почв состоят из практически чистого гипса: за исключением CaO и SO<sub>3</sub>, все остальные окислы (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и пр.) содержатся в количествах, близких к ошибке валового анализа (десятые и сотые доли процента).

### (3.4.) Минералогический состав.

Рентген-дифрактометрический анализ плотного гипса, гипсовой муки и кутан из разрезов ППГ в северной, средней и южной тайге выявил, что

большинство образцов состоит целиком из гипса; только в образцах гипсовой муки из трещин возможно наличие кварца, 2-3%. Силикатные минералы ни в гипсе, ни в гипсовой муке не обнаружены. Таким образом, подтверждаются данные детальных морфологических исследований и валового анализа. гипс является монодоминантным минералом исследуемых почв.

#### **Глава 4. ПРОЦЕССЫ И ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ НА ПЛОТНЫХ ГИПСАХ**

В ППГ проявляется менее половины элементарных почвообразовательных процессов (ЭПП), характерных для таежных почв [Горячкин], что объясняется мономинеральным составом плотных гипсов, т.е., практически полным отсутствием силикатных минералов, оксидов и гидроксидов железа и алюминия.

Формирование подстильно-торфяных горизонтов ППГ в высокой степени зависит от латерального поступления растительного опада, т.к. плотные гипсы являются экстремально олиготрофными субстратами (недостаток P, K и остальных питательных элементов, за исключением Ca и S) и поэтому способны поддерживать таежные фитоценозы только благодаря соседству с почвами на моренах и четвертичных силикатных отложениях, перекрывающих плотные гипсы [Туюкина].

В формировании минеральных горизонтов ППГ ключевая роль принадлежит процессам физической дезинтеграции и биохимического растворения гипса. Наши исследования позволили уточнить и углубить ранее имевшиеся представления о сущности различных ЭПП в почвах на плотных гипсах, что будет показано ниже.

##### **(4.1.) ЭПП преобразования органического вещества.**

Для ППГ, как и для большинства таежных почв, характерен процесс *поверхностного накопления низкочольной подстилки*. В случаях, когда ППГ занимают небольшие площади (первые квадратные метры) и развиваются под зональной таежной растительностью, питающейся за счет корней в соседних силикатных почвах, подстилконакопление идет интенсивно и ППГ приобретают мощные, дифференцированные по степени разложения органического материала горизонты O1, O2 и O3. В случаях преобладания ППГ в почвенном покрове (когда ареалы ППГ занимают сотни квадратных метров) происходит олиготрофизация таежных экосистем с резким снижением бонитета и густоты древостоя: вес растущей надземной древесины в пересчете на сухую фитомассу составляет 148 ц/га, что в 8-10 раз меньше, чем в типичных зональных сообществах: в ельнике-зеленомошнике на подзолистых почвах и в сосняке на подзолах [Горячкин, Туюкина и др.]. Под такими олиготрофными редколесьями ППГ имеют маломощные подстильно-торфяные горизонты, не стратифицированные по степени разложения органического вещества.

Трансформация органических остатков осуществляется биогенными и, в меньшей степени, криогенными процессами, в результате которых в ППГ накапливается *грубый гумус* (типа "мор").

Наряду с ЭПП поверхностного гумусонакопления, в мощных профилях ППГ развит также ЭПП *внутрипрофильного гифого-корневого гумусонакопления*, благодаря которому образуется гумусированный материал на разных глубинах внутри трещин и карманов, заполненных живыми и отмершими корнями и гифами и гипсовой мукой.

Процесс *миграции и иммобилизации гумусовых веществ* имеет низкую интенсивность в ППГ и морфологически выражается в слабом прокрашивании гипсовой муки в буровато-палевые тона, как в верхних минеральных горизонтах так и внутри трещин, а также в буровато-палевом окрашивании гипсовых кутан. В материале кутаны гумус остается до тех пор, пока гипс кутаны не подвергается растворению и дезинтеграции. Процессы миграции и иммобилизации гумусовых веществ, как правило, сопровождаются процессами *миграции и иммобилизации оксидов железа*, которые диагностируются по охристой окраске гипсовой муки и кутан; однако содержание оксидов железа в гипсовом материале ничтожно мало (см. выше - параграф «валовой анализ»).

Очень ограниченно проявленный процесс *биогенного оструктурирования* в верхних горизонтах ППГ (единичные мелкие копролитоподобные агрегаты гипсовой муки) осуществляется представителями мезофауны – земляными червями (люмбрицидами) и многоножками (кивсяками) [Семиколенных].

#### **(4.2.) ЭПП преобразования плотного гипса.**

Основными процессами внутрипочвенного изменения гипса являются физическая дезинтеграция плотного гипса, биохимическое растворение гипса, вынос растворов сульфата кальция за пределы почвенной толщи и элювиально-иллювиальное перераспределение гипса, т.е., переотложение гипса в форме кутан (рис. 2).

На базе наших морфологических исследований можно предположить, что процессы внутрипочвенного выветривания плотного гипса в бореальной зоне ЕЧР развиваются в следующей последовательности (см. рис. 2):

*1я стадия: трещиноватые плотные гипсы "разборная скала".* На первой стадии внутрипочвенного выветривания ведущую роль в образовании трещин играет физическая дезинтеграция, которая развивается по унаследованной трещиноватости и приводит к увеличению густоты трещинной сети. На стадии "разборной скалы" процессы переотложения гипса в форме кутан незначительны. В слабо развитых ППГ гипсовые кутаны очень маломощные и фрагментарные. В развитых профилях ППГ мощные гипсовые кутаны в горизонте  $M_{cs}$ , являются, скорее всего, продуктом иллювиования гипса из вышележащих горизонтов  $M_{dm_{cs}}$  и  $BDM_{cs}$ .

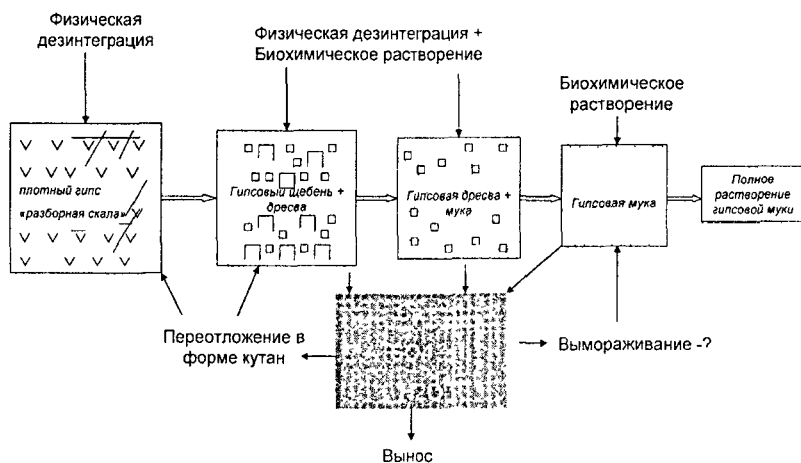


Рис. 2. Процессы внутрисочвенного выветривание плотного гипса

В условиях холодного гумидного климата в профиле ППГ работают следующие процессы физической дезинтеграции: криогенные (при сезонном промерзании-оттаивании), гидратационные (гидратация реликтов ангидрита с образованием гипса) и механической (в связи с ростом корней растений). Ведущее значение, по-видимому, имеют криогенные механизмы дезинтеграции (а) расклинивающее действие льда при замерзании воды в крупных трещинах и (б) криогидратация – колебания расклинивающего давления пленок воды, адсорбированных в микротрещинах [Конишев].

*2я стадия глыбисто-щебнисто-дресвянистый гипсовый материал*  
 Развитие физической дезинтеграции и рост суммарной поверхности фрагментов гипса приводит к резкому усилению биохимического растворения и тотального выноса сульфата кальция за пределы почвенной толщи, а также к массовому образованию гипсовых кутан на нижних гранях щебня. На этой стадии выветривания количество образовавшейся гипсовой муки весьма незначительно; эта стадия соответствует горизонту  $Md_{m_1}$  в профиле ППГ.

(Био)химическое растворение гипса в профиле ППГ происходит в условиях промывного режима, под действием атмосферных осадков, подкисленных органическими соединениями после просачивания сквозь подстильно-торфяные горизонты. На рассматриваемой стадии процесс растворения приводит к формированию каверн травления в плотном гипсе и коррозии поверхности гипсовых щебней, дресвы и стенок трещин.

*3я стадия гипсовая дресва и мелкозем (мука).* На этой стадии совместная работа физической дезинтеграции и биохимического растворения приводит к полному разрушению гипсового крупнозема и кутан. Физическая дезинтеграция доводит частицы мелкозема до размеров  $<0.1$  мм (мелкого песка и пыли), и таким образом завершается. На фоне затухания физической

дезинтеграции усиливается биохимическое растворение и тотальный вынос сульфата кальция. Эта стадия выветривания гипса реализуется в верхнем минеральном горизонте развитых ППГ (BDM<sub>с</sub>).

*4я стадия: гипсовая мука.* Заключительные стадии выветривания реализуются также в верхнем минеральном горизонте (BDM<sub>с</sub>) и подразумевают обработку и уничтожение гипсовой муки процессом биохимического растворения. Известно, что преобладающий механизм растворения кристаллов гипса обратен механизму роста: растворение происходит преимущественно путем послойного обтачивания частиц гипса по плоскостям спайности [Bosbach et.al.]. Поэтому обломочные частицы гипсовой муки песчаной и крупно-пылевой размерностей в исследованных ППГ при растворении, доходя до размеров средней и тонкой пыли, приобретают правильную кристаллическую форму. Такая форма делает их похожими на кристаллы гипса в почвах теплых аридных регионов, где гипс образуется в результате осаждения при испарении растворов сульфата кальция [Ромашкевич, Герасимова; Stoops, Poch; Herrero *et al.* и др.]. Однако мы считаем, что в условиях холодного гумидного климата правильные кристаллы гипса в ППГ имеют преимущественно остаточную природу, образуясь по вышеописанному механизму.

*5я стадия: полное растворение гипсовой муки.* В конечном счете, процесс растворения полностью уничтожает кристаллы гипсовой муки тонко-пылевой размерности. Таким образом, в результате внутрисочвенного выветривания минеральный материал ППГ, представленный исключительно гипсом, уничтожается без остатка.

#### **(4.3.) Модель почвообразования в бореальной таежной зоне на полностью растворимых плотных гипсах.**

Полноразвитые ППГ, формирующиеся на выположенных межвороночных повышениях в отсутствии (при минимальном воздействии) эрозионно-аккумулятивных процессов, являются примерами реализации модели педогенеза без образования устойчивых минеральных продуктов, помимо легкорастворимого гипса (рис. 3). В идеальной модели мы рассматриваем вертикальную анизотропию строения и свойств почвы, образованную вертикальными потоками вещества.

Исходные условия модели:

- 1) холодный гумидный климат с сезонным промерзанием-оттаиванием почв и резким преобладанием осадков над испарением ( $P \gg ET$ );
- 2) таежная растительность;
- 3) мономинеральные плотные гипсы (без примесей карбонатных и других минералов).

Данная модель реализуется на базе упрощенной комбинации ЭПП. Трансформация минеральной массы осуществляется следующими процессами: физическая дезинтеграция гипса, биохимическое растворение гипса, тотальный вынос кальция и сульфат-иона в растворе и переотложение гипса в виде кутан. Органические горизонты, формируемые процессами

поверхностного накопления низкочольной подстилки и грубого гумуса, предупреждают механический снос образующегося гипсового мелкозема и

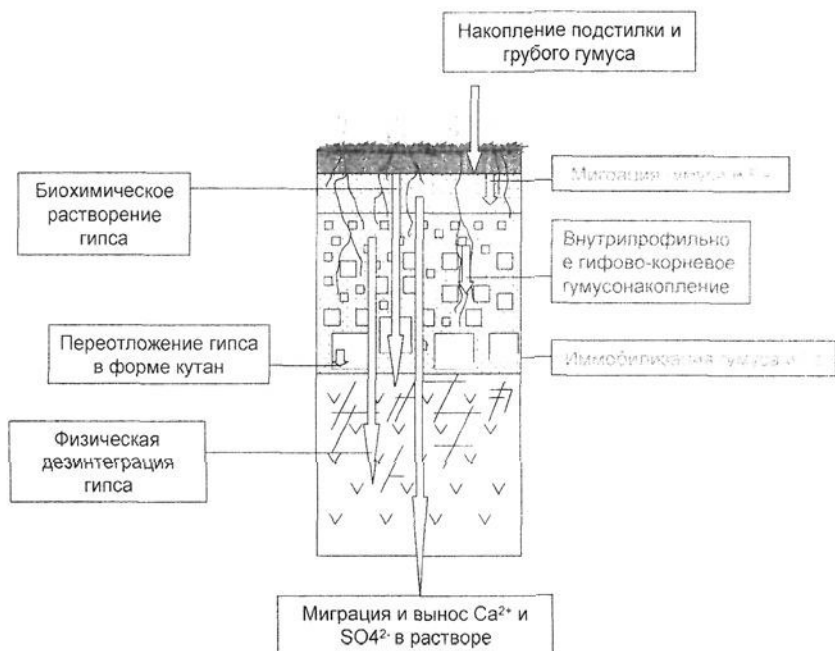


Рис. 3. Идеальная модель почвообразования на плотных гипсах

являются источником органических и железистых соединений, мигрирующих в нижележащие гипсовые горизонты. Корни растений, глубоко проникающие в профиль ППГ, также продуцируют органические кислоты. Органические вещества участвуют в биохимическом растворении гипса, подкисляя почвенный раствор и делая его более агрессивным растворителем. Отмершие корни растений и гифы грибов, сконцентрированные внутри крупных трещин в гипсе, служат первичным материалом для ЭП внутрипрофильного гипсово-корневого гумусонакопления и локальной миграции гумусовых веществ. Процесс иммобилизации гумусовых веществ и оксидов железа сопряжен с процессом образования гипсовых кутан.

В ходе почвообразования профиль ППГ "вгрызается" в материнскую породу, в которой отсутствуют минералы, длительно-устойчивые к воздействию бореального климата и биоты. Профиль ППГ и минеральные гипсовые горизонты существуют только потому, что унаследованная литогенная трещиноватость и современная физическая дезинтеграция создают ресурсы рыхлого материала, который не успевает раствориться в условиях холодного гумидного климата Европейской части России. То есть, скорость физической дезинтеграции существенно выше скорости биохимического растворения гипса, что является главным и определяющим

условием формирования ППГ в холодном гумидном климате. В этом и заключается принципиальное отличие данной модели от других моделей почвообразования, подразумевающих изменение минералогического и химического состава почвенной толщи по сравнению с материнской породой, как например на гипсах с примесями карбонатных и силикатных минералов (где происходит относительное накопление кальцита и кремнезема, а также новообразование кальцита).

#### (4.4.) Генезис гипсовых кутан: ЭПП внутрипрофильной миграции и переотложения гипса.

Буровато-охристые гипсовые кутаны на нижних гранях белых щебней плотного гипса являются специфическими новообразованиями ППГ. Такие новообразования не были описаны до настоящего времени; хотя было известно, что продуктами переотложения гипса в разных климатических условиях могут являться гипсовая мука, гажа, друзы, щетки, трубочки, розы и пр. [Герасимова и др.; Климентьев и др.; Ромашкевич, Герасимова; Сонненфелд; Черников и др.; Ямнова, Черноусенко; Herrero *et al.*].

На основании детального морфологического исследования мы можем предполагать, что образование кутан на нижних гранях щебней в профиле ППГ происходит следующим образом (рис. 4). Почвенные растворы стекают по трещинам (с верхних и боковых граней щебня); и на нижних гранях щебня эти растворы удерживаются силами капиллярного подтягивания и достигают пересыщения по гипсу (в результате испарения), что приводит к его кристаллизации. Аналогичным образом интерпретируется генезис гипсовых кристаллов, развитых в виде покрова на стенках пещер Подольского Приднестровья [Рогожников].

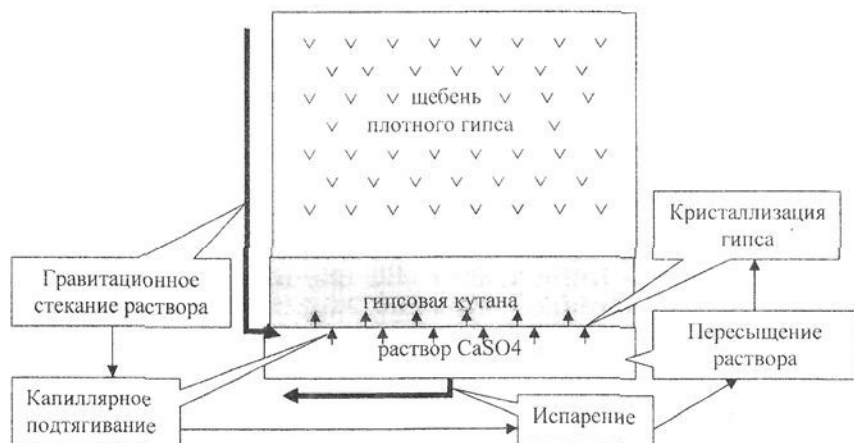


Рис. 4. Механизм образования гипсовой кутаны на нижней грани щебня в профиле ППГ

Мелкий размер кристаллов исследованных кутан может быть связан с присутствием органического вещества в почвенном растворе [Сонненфелд]. Линзовидная форма кристаллов кутан также указывают на почвенное происхождение [Porta].

#### **(4.5.) К вопросу о превращении гипса в карбонаты.**

Существует несколько гипотез об образовании кальцита из гипса в верхних горизонтах почв (см. раздел 1.6), выдвинутых на основании исследований почв на окаربоначенных гипсах. Мы не исключаем возможность таких процессов, поскольку окаربоначенные гипсовые почвы имеют щелочную реакцию, благоприятствующую синтезу кальцита. Однако в изученных нами абсолютно бескарбонатных ППГ создается кислая обстановка, где синтез кальцита невозможен.

#### **(4.6.) Пространственные закономерности почвообразования на плотных гипсах в таежной зоне Европейской части России.**

Большинство исследованных ППГ имеет малые элементарные почвенные ареалы (ЭПА) (первые м<sup>2</sup>) и ничтожно низкую долю в почвенном покрове. Они находятся в окружении зональных почв, формирующихся на моренах, и имеют органогенные горизонты, характерные для таежных почв. Можно отметить следующие биоклиматически-обусловленные изменения ППГ от северной тайги к южной: уменьшение мощности подстильно-торфяных горизонтов и степени морфологического проявления процесса иллювиирования гумуса, увеличение выраженности признаков биогенного оструктурирования.

Минеральная часть ППГ очень сильно изменяется под влиянием топогенно-литогенных факторов, которое маскирует влияние биоклиматических факторов. В профилях ППГ со сходными по мощности и строению подстильно-торфяными горизонтами можно обнаружить абсолютно разные гипсовые горизонты – малоизмененную материнскую породу (на вершинах гипсовых карстовых останцов) или мощные дезинтеграционно-метаморфические горизонты (в аккумулятивных позициях на отложениях коллювия плотных гипсов).

На склонах, растворение гипса под действием латеральных потоков приводит к выклиниванию дезинтеграционно-метаморфического горизонта и усиленному переотложению гипса в виде кутан в нижней части склона; при этом подстильно-торфяный горизонт не меняется, развиваясь под однородным растительным покровом (рис. 5).

Существенные различия наблюдаются между ППГ, имеющими малые и большие ЭПА: первые, как было упомянуто выше, формируются под продуктивными лесными фитоценозами, а последние поддерживают малопродуктивные олиготрофные редколесья.

Анализ ППГ с большими размерами ЭПА (под редколесьем) и малыми ЭПА (под сосновым лесом) на сходных элементах рельефа показал, что

возрастание мощности подстильно-горячих горизонтов сопровождается снижением мощности минеральной толщи ППГ (рис. 6).

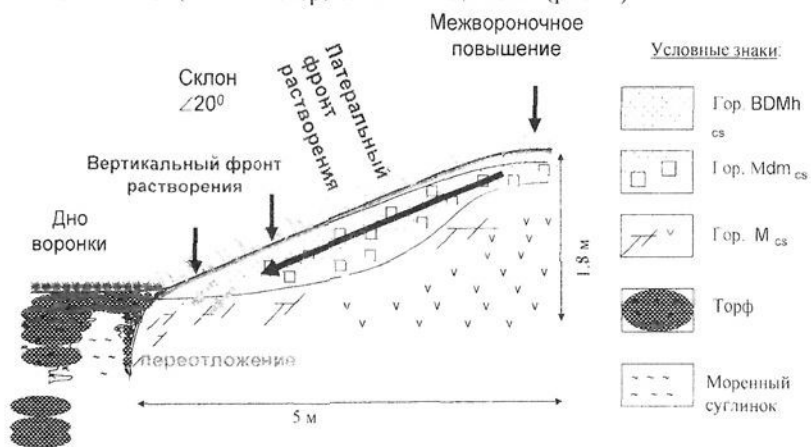
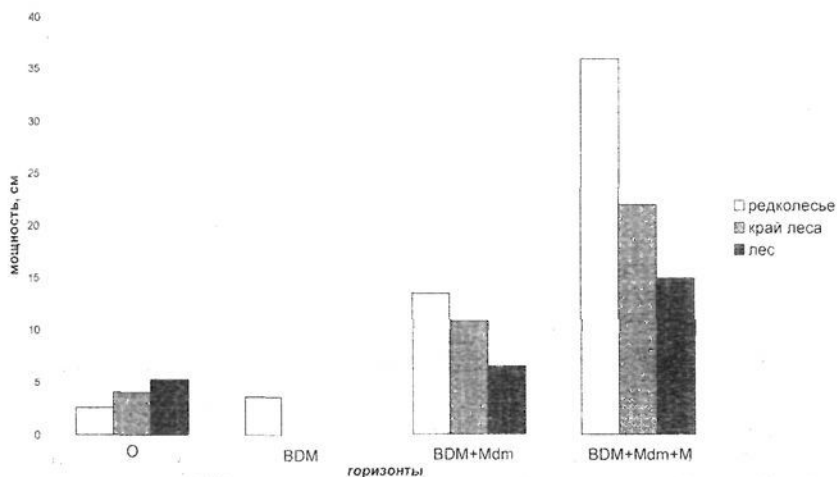


Рис. 5. Изменение ППГ по мезорельефу – влияние латерального фронта растворения

По-видимому, с ростом мощности подстилки снижается скорость дезинтеграции гипса в почвенном профиле, т.к. подстилка сглаживает колебания температуры минеральных горизонтов при сезонном промерзании. Кроме того, подстилка задерживают влагу в почвенном профиле, увеличивая время контакта гипсовой муки с раствором и, тем самым, повышая скорость ее растворения.

Рис. 6. Средние мощности горизонтов ППГ редколесья, края леса и леса



Теоретически, снижение мощности подстилок ППГ от северной тайги к южной должно сопровождаться увеличением мощности дезинтеграционно-метаморфического горизонта, чему также должно способствовать усиление промерзания почв, наблюдающееся при движении на восток. Однако, природа не предоставила объектов для проверки этой гипотезы: описанные в южной тайге ППГ располагались на эродированных бровках склонов и на коллювиальных отложениях, и поэтому влияние топогенно-литогенных факторов полностью маскировало влияние биоклиматических факторов.

#### (4.7.) Макрогеографические закономерности почвообразования на плотных гипсах

Анализ литературы показал, что модель почвообразования на плотных гипсах, где ведущим процессом является физическая (криогенная) дезинтеграция гипса в условиях сезонного промерзания почв и (био)химическое растворение в условиях промывного водного режима, реализуется только в холодном гумидном и семигумидном климате. Начиная с умеренного климата (южная Польша) процесс дезинтеграции плотного гипса затухает на фоне усиления растворения. В теплом семиаридном климате (Испания, Италия) мелкозем в ППГ формируется в результате осаждения гипса при испарении растворов сульфата кальция, являющихся продуктом растворения плотных гипсов [Herrero *et.al.*, Dazzi *et. al.*]. Этот процесс может достигать огромных масштабов в аридном климате. Например, отложения гипсовых песков "White sands" на юге штата Нью Мексико, США образованы в результате стекания сульфатно-кальциевых растворов на дно депрессии с последующим испарением воды и осаждением гипса [Бетехтин, и др.].



Рис. 7. Макрогеографические закономерности проявления дезинтеграции и других педогенных процессов на плотных гипсах – их зависимость от среднегодовой температуры и коэффициента увлажнения.

Таким образом, при переходе от бореальных гумидных областей к семиаридным и аридным происходит принципиальная смена механизма мелкоземообразования на гипсах – вместо процессов физико-химического разрушения плотной породы до муки преобладающими становятся процессы отложения гипса в виде муки при испарении пересыщенных растворов сульфата кальция. В первом случае мука сложена исходным гипсом породы, а в последнем – вторичным, новообразованным гипсом. Зависимость основных процессов педогенного преобразования плотных гипсов показана на рис. 7. Имеющиеся в настоящее время данные по ППГ позволяют считать представленную нами схему закономерностей почвообразования на плотных гипсах от климатических параметров гипотетической Далеко не все опубликованные работы по ППГ позволяют четко понять, какими процессами формируются ППГ в тех или иных климатических условиях. Полностью отсутствуют данные по ППГ теплых гумидных областей (здесь следует ожидать тотальный вынос гипса и отсутствие мелкозема в почвах) и по ППГ холодных (семи)аридных областей, где криогенное дробление плотных гипсов может сочетаться с переотложением гипса.

## Глава 5. ОЦЕНКА СКОРОСТЕЙ ПРОЦЕССОВ ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ НА ПЛОТНЫХ ГИПСАХ

### (5.1.) Методика экспериментальных исследований

В северной тайге (Пинега) были проведен четырехлетний опыт по изучению скоростей основных ЭПП на начальных стадиях почвообразования на девяти модельных гипсовых *глыбах* средней массы 26 кг, отобранных из свежих обнажений коренного берега р. Пинега и установленных в карстовом логу, причем одни были оставлены открытыми, а другие накрыты материалом лесной подстилки. Также проведен двухлетний опыт по оценке скорости биохимического растворения десяти гипсовых *таблеток* средней массы 40 г, выпиленных из глыбы плотного гипса и заложенных под лесную подстилку.

### (5.2.) Результаты экспериментальных исследований

На поверхности открытых модельных глыб быстро накапливался хвойно-лиственный опад и поселились мхи. Под накапливающимся опадом за 4 года постепенно сформировался фрагментарный слой ( $\leq 1.5$  мм) гипсовой муки, частично окрашенной в палевые тона гумусовыми соединениями, образовавшимися при разложении растительного опада. Такая же окраска характерна для горизонта  $BDMh_{cs}$  полноразвитых почв на плотных гипсах. То есть, всего за 4 года на модельных гипсовых глыбах сформировался микропрофиль почвы "О-  $BDMh_{cs}$ - $M_{cs}$ " мощностью  $\approx 3$  мм.

Морфологические признаки дезинтеграции (рост трещиноватости) на модельных глыбах, накрытых лесными подстилками, появлялись медленнее, а признаки растворения (рост каверн) – быстрее, чем на открытых глыбах. Под лесной подстилкой криогенная дезинтеграция гипса замедляется, поскольку подстилка сглаживает колебания температуры при сезонном промерзании. А растворение гипса ускоряется, поскольку подстилка задерживает влагу, тем

самым увеличивая время контакта гипса с раствором (аналогичные тенденции были выявлены при сравнении ППГ под подстилками разной мощности, см. раздел 4.6.).

Скорость тотального выноса растворенного гипса оценивалась по потерям массы модельных гипсовых глыб (табл. 2). В начале эксперимента процесс растворения гипса, по-видимому, конкурировал с процессом гидратации реликтов ангидрита (присутствие последних было выявлено нами в шлифах горизонтов ППГ); известно, что гидратация ангидрита с образованием гипса сопровождается увеличением массы на 20,91% [Porta].

Таблица 2. Изменение массы модельных гипсовых глыб.

№ глыбы	m, кг в начале опыта	1-й год		2-й год		4-й год	
		$\Delta m$ , кг 1-й год	$\Delta m/m$ , г/кг	$\Delta m$ , кг 2-й год	$\Delta m/m$ , г/кг	$\Delta m$ , кг 4-й год	$\Delta m/m$ , г/кг
<i>Открытые модельные глыбы</i>							
1	27.6	+0.2	+7	+0.2	+7	-0.4	-14
3	17.1	-0.2	-12	-0.7	-38	0	0
5	24.0	+0.3	+12	-0.1	-4	-0.2	-8
7	23.1	+0.1	+4	0.0	0	-0.1	-4
9	39.2	+0.3	+8	+0.5	+14	-0.5	-13
средние	26.2	+0.1	+4	-0.1	-4	-0.2	-8
<b>-0.1 кг/год; -4 г/кг в год</b>							
<i>Накрытые модельные глыбы*</i>							
2	26.1+1.8* = 27.8	+1.7	+61	-0.8	-28	-1.1	-39
4	21.4+1.5* = 22.9	-0.4	-17	-0.3	-13	-0.3	-13
6	27.6+1.7* = 29.3	+0.9	+31	-1.1	-37	-0.9	-31
8	23.2+1.9* = 25.1	-0.2	-8	-0.5	-19	-0.8	-32
средние	26.3	+0.5	+19	-0.7	-26	-0.8	-31
<b>-0.5 кг/год; -19 г/кг в год</b>							

\*Взвешивание глыб в 1-4 годы проводилось вместе с материалом накрывающих их подстилок

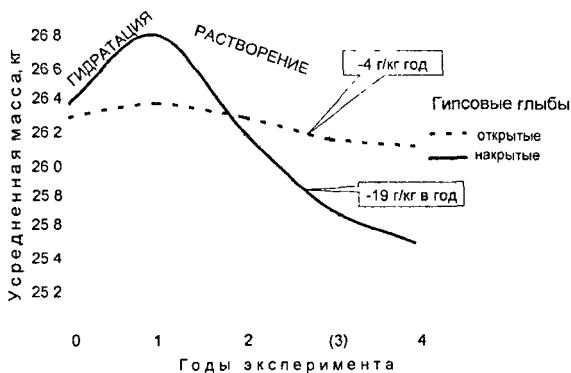


Рис 8 Изменение массы модельных гипсовых глыб

За первый год масса большинства глыб увеличилась (табл. 2), т.е процессы гидратации доминировали над процессами растворения. На второй год большинство глыб стало легче, что указывает на затухание процессов гидратации на фоне продолжающегося растворения. На четвертый год надежно выявлены существенные потери массы. В целом, у накрытых глыб колебания массы были более существенными, чем у открытых глыб (рис. 8). Задержка влаги в материале подстилки могла служить причиной как более сильной гидратации накрытых глыб (по сравнению с обнаженными) в начале эксперимента, так и их более сильного растворения в последующие годы. Из-за гидратационной компенсации весовых потерь, вызванных тотальным выносом растворенного гипса, мы можем дать только грубую оценку скорости растворения: как средней ежегодной потери массы гипсовых глыб со второго по четвертый год эксперимента (отбрасываем данные за первый год, где преобладают гидратационные прибавки массы). Скорости растворения гипса на обнаженных и накрытых подстилками глыбах составляли, соответственно 4 и 19 г/кг гипса в год.

В двухлетнем опыте по растворению гипсовых таблеток под лесной подстилкой (подстилично-торфяными горизонтами) уменьшение массы составляло в среднем 21 г/кг гипса в год (табл. 3), что сопоставимо со средней скоростью растворения накрытых подстилками гипсовых глыб 19 г/кг в год. Варьирование скорости растворения по отдельным образцам может быть связано со специфическими дефектами поверхности и особенностями формы каждого образца, неравномерным распределением влаги под лесными подстилками, а также присутствием включений ангидрита и их гидратацией.

Таблица 3. Скорость растворения гипсовых таблеток под лесной подстилкой.

№ п/п таблетк и	масса таблеток до опыта, г	Площадь поверхности таблеток, см <sup>2</sup>	Δm, г / год	Δ m/m, г/кг в год	Δm/S, г/см <sup>2</sup> в год
1	62.0	52.8	0.1	2	0.002
2	27.2	30.8	1.2	43	0.039
3	37.9	38.0	2.5	64	0.066
4	20.2	25.1	0.2	10	0.025
5	62.9	55.2	1.4	21	0.013
6	41.0	39.9	0.5	12	0.013
7	67.8	57.3	1.2	16	0.021
8	21.3	26.9	0.2	9	0.007
9	27.7	28.2	0.5	18	0.018
10	25.3	26.8	0.6	23	0.022
средние	40	38	0.8	21	0.02

При делении потерь веса на измеренную площадь поверхности таблеток получилась средняя скорость растворения плотного гипса 0.02 г/см<sup>2</sup> поверхности в год (табл. 3), что соответствовало бы "съеданию" поверхности плотного гипса процессом растворения со скоростью 9 мм/100 лет.

Скорости *тотального выноса* CaO и SO<sub>3</sub> в результате растворения плотного гипса, исходя из известных массовых долей CaO и SO<sub>3</sub> в гипсе (32.5% и 46.5%, соответственно), можно оценить как 6.5 мг CaO и 9.3 мг SO<sub>3</sub> на 1 см<sup>2</sup> поверхности плотного гипса в год.

Определение скорости растворения плотного гипса в почвах ранее не проводилось, поэтому целесообразно сравнить полученную нами цифру (0.02 г/см<sup>2</sup> в год) с известными скоростями карстовой денудации гипса, т.е. растворения гипса пещерными водами, в районах наших исследований: 0.036-0.084 г/см<sup>2</sup> в год [Шаврина], 0.028-0.053 г/см<sup>2</sup> в год [Горбунова и др.], 0.066 г/см<sup>2</sup> в год [Гвоздецкий]. В целом, величины имеют одинаковый порядок, будучи чуть ниже в почвах. В почвах на образцы плотного гипса действуют более агрессивные (менее насыщенные по гипсу) растворы, но отсутствует полный контакт поверхности образца с раствором. Выявленная скорость растворения плотных гипсов сопоставима также со скоростью выветривания песчаных стен старинных замков в северной Испании (1.6-8.4 мм/100 лет [Sancho *et. al.*]). Иными словами, растворение гипсов в природных условиях идет сравнительно медленно, несмотря на то, что они считаются легко растворимыми породами.

## ВЫВОДЫ

1. Исследованные почвы на плотных гипсах (ППГ) формируются благодаря следующему сочетанию факторов: (1) холодный гумидный климат; (2) таежная растительность; (3) мономинеральные плотные гипсы (без существенных примесей карбонатных и других минералов). Такие ППГ имеют ряд принципиальных отличий от бореальных почв на окарбоначенных гипсах, а также от всех семиаридных гипсовых почв.

2. Изученные ППГ представлены локальными ареалами, приуроченными к выходам нижепермских плотных гипсов из-под чехла перекрывающих отложений. Повышение доли гипсов среди материнских субстратов вызывает олиготрофизацию фитоценозов. Минеральные горизонты ППГ обладают специфическими свойствами и составом, унаследованным от их материнских пород.

2.1. Профили ППГ имеют мощность от нескольких сантиметров до 0.5 м и более; строение профиля варьирует от "O-M<sub>cs</sub>" (слаборазвитые ППГ, гипсопетроземы), где подстильно-торфяной горизонт залегает непосредственно на белом плотном гипсе, до "O-BDM(h)<sub>cs</sub>-Mdm<sub>c</sub>-M<sub>cs</sub>" (развитые ППГ), где под подстильно-торфяным горизонтом залегает мелкоземисто-дресвянистый гипсовый горизонт с бледно-палевой окраской, ниже переходящий к белому дресвянисто-щепнистому гипсовому горизонту, и затем, к плотному гипсу. Гипсовые щебни и дресва несут признаки интенсивного внутрипочвенного выветривания. Гипсовый мелкозем (мука) состоит из разрушающихся блоков кристаллов и индивидуальных кристаллов гипса. Специфическим

морфологическим элементом ППГ являются буровато-охристые мелкокристаллические гипсовые кутаны на нижних сторонах белых гипсовых щебней.

2.2. Минеральная часть профиля ППГ состоит из практически чистого гипса: содержание  $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$  достигает 95-99%. Исключительно в виде микропримесей присутствуют оксиды железа, карбонаты, глинистые минералы и кварцевые зерна.

2.3. По свойствам ППГ характеризуются как слабокислые, малогумусные, ненасыщенные, бедные питательными элементами (P, K и др.) почвы.

3. ППГ развиваются при необходимом условии латерального поступления растительного опада и представляют собой уникальную модель почвообразования, в которой не образуется устойчивых гвердофазных минеральных продуктов, помимо легкорастворимого гипса. В пределах таежной зоны локальные топографические и литологические факторы изменчивости ППГ более существенны, чем климатические; однако за ее пределами происходит климатически-обусловленная смена основных ЭПП трансформации минеральной массы.

3.1. В условиях холодного гумидного климата на плотных гипсах реализуется упрощенная комбинация ЭПП: 1) поверхностное накопление низкочольной подстилки и грубого гумуса, (2) внутрипрофильное гифово-корневое гумусонакопление, (3) физическая дезинтеграция гипса, (4) биохимическое растворение гипса, (5) тотальный вынос сульфата кальция, (6) частичное переотложение гипса в виде кутан, (7) локальная миграция гумусовых и железистых соединений и их иммобилизация в материале гипсовых кутан.

3.2. Формирование гипсового мелкозема из плотного гипса осуществляется при совместном действии ЭПП физической дезинтеграции (преимущественно криогенной) и биохимического растворения, а возможность накопления гипсового мелкозема в профиле ППГ обеспечивается преобладанием дезинтеграции над растворением.

3.3. Процесс переотложения гипса в виде кутан развивается в нижней части минеральной толщи ППГ: гипсовые кутаны кристаллизуются из капиллярно-подвешенных растворов на нижних гранях гипсовых щебней.

3.4. От северной к южной тайге климатически-обусловленные тенденции изменения ППГ сводятся к снижению мощности подстильно-торфяных горизонтов и степени морфологического проявления процесса иллювиирования гумуса. Эти тенденции зачастую маскируются в результате сильного варьирования ППГ в зависимости от положения в карстовом рельефе (определяющего развитие эрозии, латерального внутрипочвенного растворения гипса и пр.) и степени олиготрофизации таежных фитоценозов (определяющей снижение

мощности лесной подстилки и сопряженное с этим усиление дезинтеграции гипса).

3.5. Макрогеографические закономерности почвообразования на плотных гипсах выражаются в преобладании процессов криогенной дезинтеграции плотного гипса с образованием гипсовой муки в холодном гумидном климате, по-видимому, биохимического растворения гипса и тотального выноса сульфата кальция в жарком гумидном климате, испарительной садки гипсовой муки из растворов сульфата кальция в теплом семиаридном климате.

4. Формирование ППГ, вопреки ожиданиям, исходившим из определения гипсов как легкорастворимых пород, идет далеко не быстро. Процесс биохимического растворения гипса имеет достаточно низкую скорость, чтобы дать возможность накоплению продуктов физической дезинтеграции гипса в почвенном профиле.

4.1. Скорость биохимического растворения плотного гипса под лесной подстилкой в северотаежных условиях составляет около 20 г/кг или 0.02 г/см<sup>2</sup> в год или 9 мм/100 лет, что соответствует скорости тотального выноса 6.5 мг CaO и 9.3 мг SO<sub>3</sub> на 1 см<sup>2</sup> поверхности гипса в год. Растворение открытой поверхности плотного гипса (без лесной подстилки) идет в пять раз медленнее.

4.2. В условиях интенсивного накопления опада на поверхности плотного гипса за четыре года может сформироваться микропрофиль ППГ "O-BDMh<sub>cs</sub>-M<sub>cs</sub>" мощностью до 3 мм, где дезинтеграционно-метаморфический микрогоризонт (BDMh<sub>cs</sub>) может достигать мощности 1.5 мм и иметь зачаточные признаки локальной миграции органических веществ из верхнего горизонта.

## По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

### Статьи

- 1 *И А Спиридонова, С В Горячкин, В О Таргульян* Бореальные почвы на плотных гипсах – уникальные природные объекты севера ЕТР // М-лы межд конф "Геодинамика и геоэкология", Архангельск, 1999, стр. 341-343
- 2 *И А Спиридонова* Биогеоценоотические функции почв, сформированных на плотных гипсах в южной тайге ЕТР. // М-лы по изучению русских почв, т. 3(30), Санкт-Петербург унив., 2002, стр. 14-16
- 3 *С В Горячкин, И А Спиридонова, С Н Седов, В О Таргульян* Северотаежные почвы на плотных гипсах: морфология, свойства, генезис // Почвоведение. №7, 2003, стр 773-785
- 4 *С В Горячкин, Т Ю Туюкина, В Н Малков, Е И Гуркало, Л В Пучнина, А А Семиколетных И А Спиридонова, Е В Шаврина* Генезис и геохимия таежных редколесий гипсово-карстовых ландшафтов Европейской России. // Известия РАН, сер. географическая, №2, 2004, стр 100-110
- 5 *I A Spiridonova*. An experimental study on the dissolution and disintegration of hard gypsum in conditions of the northern taiga. // In: Goryachkin S.V. and Pfeiffer E. (eds ) Soils and perennial underground ice of glaciated and karst landscapes in Northern European Russia Moscow, Inst of Geogr , 2005, p. 51-58

6. *С В Горячкин, Т Ю Туюкина, Л В Пучнина, А А Семиколенных, И А Спиридонова* Геохимия и экологические особенности таёжных редколесий гипсово-карстовых ландшафтов ЕТР // Геохимия биосферы Доклады Международной научной конференции Москва, 15-18 ноября 2006 г Смоленск: Ойкумена, 2006, стр. 109-110

### Тезисы конференций

1. *I A Spiridonova, S V Goryachkin* Sulforendzinas (redziny siarczanowe) and their role in boreal forest ecosystems // Proc. of Int. Conf. "Role of soil in functioning of ecosystems". Lublin (Poland) 1999, p. 475-476
2. *И А Спиридонова, С В Горячкин* Таежные почвы на плотных гипсах - в Красную книгу Тезисы докладов III съезда Докучаевского общества почвоведов (11-15 июля 2000г., Суздаль) Книга 3. М. 2000. С 253-254
3. *С В Горячкин, Е И Гуркало, В Н Малков, Л В Пучнина, А А Семиколенных, И А Спиридонова, Т Ю Туюкина, Е В Шаврина* Феномен, структура и генезис ландшафтов северотаежных карстовых редколесий ЕТР и особенности их почвенного покрова// Генезис, география, антропогенные изменения и плодородие почв (Сибирцевские чтения). Тезисы докладов XI съезда РГО (Архангельск, 2000г.) Том 6. Санкт-Петербург, 2000 С 23-24.
4. *И А Спиридонова* Взаимосвязь между свойствами почв, сформированных на плотных гипсах, и составом фитоценозов // М-лы Докучаевских чтений, Санкт-Петербург, 2000, стр. 160-161
5. *И А Спиридонова* Биогеоэценоотические функции почв, сформированных на плотных гипсах в южной тайге ЕТР // М-лы Докучаевских чтений, Санкт-Петербург, 2001, стр 90-91
6. *T Yu Tuuyukina, I A Spiridonova* Geochemistry of boreal soils and landscapes on hard gypsum and cryogenesis. // Proc. of Int. Conf. "Conservation and Transformation of Matter and Energy in the Earth Cryosphere", Pushchino, 2001, p. 127
7. *И А Спиридонова, В О Таргульян* Формирование мелкозема при внутрпочвенном выветривании плотных гипсов. // М-лы межд симп. "Функции почв в геосферно-биосферных системах", Москва, 2001, стр 242-243
8. *С В Горячкин, Е В Шаврина, И А Спиридонова, Т.Ю Туюкина* Динамика почвенно-геоморфологических систем карстовых экотонov в бореальной зоне. // М-лы межд симп "Функции почв в геосферно-биосферных системах", Москва, 2001, стр. 231-232
9. *И А Спиридонова* Некоторые временные закономерности бореального почвообразования на плотных гипсах // М-лы VI конф молодых ученых "Биология – наука 21 века", Пушино, 2002, стр. 157
10. *I A Spiridonova, T Y Tuuyukina, S V Goryachkin* Mineralogy, Geochemistry, and the Ecosystem Role of Hard Gypsum Regolith in the Boreal Climate. // Abstracts of the 17th World Congress of Soil Science, Bangkok, Vol 3, 2002, p. 947
11. *С Н Лесовая, С В Горячкин, Л В Пучнина, А А Семиколенных, И А Спиридонова, Т Ю Туюкина, Ю Н Водяницкий.* Почвообразование и биоразнообразии таежных почв на красноцветных породах и плотных гипсах // Международная конференция "Биогеография почв" Сыктывкар, 16-20 сентября 2002 г. Тезисы докладов Сыктывкар, 2002, стр 27-28
12. *S Goryachkin, J Zakharchenko, M Glazov, V Malkov, L Puchnina, A Rykov, A Semikolennykh, E Shavrina, I Spiridonova, T Tuuyukina* The reasons of high biodiversity in karst landscapes of the Northern taiga. // The 14<sup>th</sup> International Congress of Speleology Greece, September, 2005, p. 91-92
13. *I A Spiridonova, E V Shavrina* Imperative for conservation of unique soils on gypsum rocks NW Russia //5th Int. Congress of the European Society for Soil Conservation, Palermo, June 25-30, 2007 (в печати)

Подписано в печать 13.03.2007  
Формат 60×88 1/16. Объем 2 п.л.  
Тираж 100 экз. Заказ № 614  
Отпечатано в ООО «Соцветие красок»  
119992 г.Москва, Ленинские горы, д.1  
Главное здание МГУ, к. А-102