

# ОЦЕНКА ПОВЕДЕНИЯ УГЛЕРОДА В НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ (ГЕНЕТИЧЕСКИЕ И КАРТОГРАФИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ)

Л.Г. Богатырев, И.О. Алябина  
МГУ им. М.В. Ломоносова, e-mail: [bogatyrev@ps.msu.ru](mailto:bogatyrev@ps.msu.ru)

## Введение

Оценка поведения углерода является одним из фундаментальных вопросов современного почвоведения. Это обусловлено, в первую очередь, тем, что сама сущность почвообразования самым тесным образом связана с синтезом и разложением органического вещества [5, 9]. М.А. Глазовская определяет педолитогенез как «совокупность процессов образования в почвах потенциально стабильных, содержащих гумус комплексов и соединений и захоронения в глубоких горизонтах почв и толщах рыхлых отложений» [6, с. 8]. Постоянный интерес к поведению углерода отмечается в других смежных с почвоведением дисциплинах, таких как биогеохимия и геохимия ландшафта. Наряду с продолжающимися экспериментальными исследованиями в области поведения углерода особое место принадлежит картографическим исследованиям. Последнее направление хорошо представлено в целом ряде работ, в частности выполненных под руководством Д.С. Орлова, в которых даны географические аспекты формирования гумусовых веществ, а также в картах общих запасов гумуса [14, 20 и др.]. Известен опыт отражения на картах типологии органопрфилей [22]. Авторы настоящей статьи также имеют опыт отражения разномасштабной картографии поведения углерода [4, 10–13].

В работе обсуждаются вопросы изучения поведения углерода в наземных естественных экосистемах России на основе цифровой карты [1, 3].

## Материалы и методы

Поведение органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ ) в почвенном покрове оценивали, используя построенную цифровую карту, путем расчетов в программе MapInfo Professional и обработки данных в Microsoft Excel.

В основу созданной карты положена карта геохимических ландшафтов СССР масштаба 1:20 000 000 [15]. Она содержит информацию о классах геохимических ландшафтов, выделенных А.И. Перельманом по особенностям водной миграции в

автономных ландшафтах – почвах, коре выветривания, континентальных отложениях. В целях оценки потенциальной роли кальция в поведении  $C_{орг}$  в ландшафтах геохимические классы объединили в 5 групп (табл. 1). Были выделены следующие ландшафты:  $H^+$ -класса – с ведущей ролью иона водорода;  $H^+ - Ca^{2+}$ -класса – переходная группа ландшафтов с участием ионов кальция и водорода;  $Ca^{2+}$ -класса – с абсолютной ролью кальция;  $Ca^{2+} - Na^+$ -класса – с участием иона натрия, обеспечивающего подвижность углерода в щелочной среде;  $Na^+, Cl^-, SO_4^{2-}$ -класса – с участием легкорастворимых солей, в присутствии которых происходит коагуляция органических соединений.

Содержащаяся на карте геохимических ландшафтов информация о типах и семействах ландшафтов (соответствующих растительным зонам и подзонам) была детализирована с использованием цифровой карты растительности СССР масштаба 1:4 000 000 [8], в результате чего были выделены дополнительные контуры. В зависимости от качества поступающего растительного опада все растительные ассоциации объединили в 6 основных групп экосистем, или биомов: тундры, хвойные леса, смешанные леса, широколиственные леса, травяные экосистемы (степи, луга) и болота. При оценке степени закрепления  $C_{орг}$  в почвах из рассмотрения исключили болота.

Таблица 1

**Классы геохимических ландшафтов**

<b>Группы классов</b>	<b>По А.И. Перельману [15] (в скобках – типоморфные элементы и ионы водной миграции)</b>
$H^+$	Кислый и кислый глеевый ( $H^+, H^+ - Fe^{2+}$ )
	Кислый глеевый ( $H^+ - Fe^{2+}$ )
	Кислый ( $H^+$ )
$H^+ - Ca^{2+}$	Переходный от кислого к кальциевому ( $H^+ - Ca^{2+}$ ), местами в комплексе с кислым ( $H^+$ ) и кальциевым ( $Ca^{2+}$ )
	Кислый ( $H^+$ ) в сочетании с кальциевым ( $Ca^{2+}$ ) и глеевым ( $H^+ - Fe^{2+}, Ca^{2+}$ )
$Ca^{2+}$	Карбонатный ( $Ca^{2+}$ )
	Карбонатный глеевый ( $Ca^{2+} - Fe^{2+}$ )
$Ca^{2+} - Na^+$	Кальциево-натриевый ( $Ca^{2+} - Na^+$ )
	Солонцовый ( $Na^+$ )
	Содовый ( $Na^+ - HCO_3^-$ ) в сочетании с кальциевым ( $Ca^{2+}$ )
$Na^+, Cl^-, SO_4^{2-}$	Соленосно-сульфидный ( $Na^+, SO_4^{2-}, Cl^-, H_2S$ )

Для учета гранулометрического состава почвообразующих пород в оценке потенциального поведения (закрепления) органического углерода в пределах почвенного

профиля была привлечена информация о гранулометрическом и петрографическом составе пород с цифровой почвенной карты РСФСР масштаба 1:2 500 000 [18]. По влиянию на характер поведения  $C_{орг}$  при поступлении в почвы почвообразующие породы объединили в 5 групп (табл. 2).

В зависимости от сочетания пород, преобладающих в пределах рассматриваемых ландшафтов, были выделены 8 вариантов потенциального поведения органического углерода (табл. 3). Шесть из них характеризуют закрепление  $C_{орг}$  в почвах от максимального до минимального и соответствуют последовательно сформированному ряду, от глин до песчаных отложений. Дополнительно выделили два варианта поведения  $C_{орг}$ . Первый объединяет территории с плотными породами, где потенциально ограничены уровень накопления и миграция углерода в профиле почв, а также возможен более интенсивный латеральный сток, второй относится к территориям, характеризующимся наибольшим разнообразием поведения углерода, обусловленного распространением на них пород различного гранулометрического состава.

В результате на цифровой карте поведения органического углерода в почвенном покрове выделено 88 неповторяющихся вариантов сочетаний биомов, классов геохимических ландшафтов и поведения  $C_{орг}$  (почвообразующих пород), которые могут быть использованы в ходе исследования для получения различных количественных характеристик.

Дополнительно на карте были выделены зоны с участием многолетнемерзлых пород как зоны специфического поведения углерода в условиях криогенеза и горные экосистемы, в пределах которых особенно ярко проявляется латеральный сток. Местоположение зон определили по границам распространения многолетней мерзлоты и горных территорий, приведенным на цифровой почвенной карте 1:15 000 000 [21].

Таблица 2

**Почвообразующие породы**

<b>Группы пород</b>	<b>По почвенной карте РСФСР [18]</b>
Глины	Глинистые и тяжелосуглинистые
	Глинистые и тяжелосуглинистые валунные и галечниковые
	Глинистые и тяжелосуглинистые щебнистые
	Плотные глины
	Засоленные глины
1	2

1	2
Суглинки	Среднесуглинистые
	Среднесуглинистые валунные и галечниковые
	Среднесуглинистые щебнистые
	Легкосуглинистые
	Легкосуглинистые валунные и галечниковые
	Легкосуглинистые щебнистые
	Легко- и среднесуглинистые, подстилаемые тяжелосуглинистыми и глинистыми породами
	Частая смена пород различного механического состава с преобладанием суглинков и глин
Пески/супеси	Супесчаные
	Супесчаные валунные и галечниковые
	Супесчаные щебнистые
	Песчаные
	Песчаные валунные и галечниковые
	Песчаные щебнистые
	Супесчаные на слоистых песчаных и супесчаных породах
	Частая смена пород различного механического состава с преобладанием песков и супесей
	Аэральные, преимущественно песчаные и супесчаные вулканические породы
Двучленные отложения	Глинистые и суглинистые, подстилаемые песчаными и супесчаными породами
	Песчаные и супесчаные, подстилаемые суглинистыми и глинистыми породами
Плотные породы	Кислые метаморфические и изверженные
	Основные метаморфические и изверженные
	Сланцы
	Песчаники
	Опоки
	Известняки и другие карбонатные породы

Таблица 3

**Поведение органического углерода в различных породах**

<b>Варианты поведения</b>	<b>Преобладающие сочетания пород в ландшафтах</b>
Закрепление максимальное	Глины
Закрепление выше среднего	Глины – суглинки
Закрепление среднее	Суглинки
Закрепление ниже среднего	Двучленные отложения
Закрепление низкое	Суглинки – пески/супеси
Закрепление минимальное	Пески/супеси
Ограниченное вертикальное перемещение	Плотные породы
Разнообразие в поведении	Глины – суглинки – пески/супеси

## Обсуждение результатов

На карте в цифровом виде содержится информация о факторах, оказывающих влияние на пространственные закономерности размещения территорий с различными вариантами потенциального поведения (закрепления) органического углерода в почвенном покрове (см. Приложение). Использование методов компьютерной картографии позволяет всесторонне анализировать собранный массив данных, выявлять закономерные связи степени закрепления  $C_{\text{орг}}$  в почвах, рассчитывать количественные параметры этих связей. В настоящей работе распределение территорий с различным поведением  $C_{\text{орг}}$  рассмотрено преимущественно в пределах основных естественных биомов, а также мерзлотных и горных территорий.

Используемый термин «поведение углерода» включает в себя гораздо более широкий спектр процессов, происходящих в экосистемах, по сравнению с той частью его поведения, которое получило отражение в настоящей работе. В самом деле, поведение углерода включает в себя целую серию последовательных и взаимообусловленных процессов – от фотосинтеза и формирования биомассы до его закрепления в почве с последующим различным уровнем миграции в системе сопряженных элементарных ландшафтов. Задача настоящей работы ограничивалась интегральной оценкой поведения углерода, относящегося к его закреплению в пределах почвенного профиля. В основе лежала концепция вероятного закрепления углерода на минеральной матрице почвы в зависимости от гранулометрического состава, условий среды (уровень кислотности) и особенностей биомов. Такой взгляд на поведение углерода в принципе не противоречит многочисленным эмпирическим и экспериментальным наблюдениям за характером закрепления углерода в природных условиях. Более того, он хорошо увязывается с типологией и генезисом основных почвенных разностей, которые специально не использовались при построении карты поведения углерода, чтобы не быть изначально связанными рамками классификационной принадлежности почв. Тем более удовлетворительным оказался последующий результат, показавший достаточный уровень корреляции с характером почвенного покрова.

### *О роли геохимических условий в закреплении углерода в профиле почв.*

Особенности поведения углерода в пределах каждого биома последовательно определяются характером кислотности среды. Действительно, уже начиная со смешанных лесов, где ландшафты  $Ca^{2+}$  и  $H^+$ - $Ca^{2+}$ -класса занимают около 35%, и далее на юг

преимущественная роль кальция в ландшафтах очевидна (табл. 4). В то же время и в пределах таежной зоны ландшафты с различной долей участия ионов Са занимают довольно значительную площадь – более 20%. Это обусловлено элементами карбонатности, которые вносят существенные коррективы в поведение углерода, причем в широком диапазоне гидротермических условий. Рассматривая эту проблему, можно выделить несколько вариантов воздействия повышенной карбонатности на закрепление углерода. Так, прямое воздействие карбонатность оказывает при непосредственном залегании карбонатных пород на поверхности, что приводит к развитию дерново-карбонатных почв в таежной зоне или перегнойно-карбонатных почв в тундровых ландшафтах. В этом случае закрепление углерода происходит непосредственно в поверхностных горизонтах. Такая классическая картина складывается, например, в пределах Архангельской области и территориально приурочена к районам Плесецкой и Каргопольской суши. В тундровых биомах нередко высокая насыщенность почв основаниями может быть результатом унаследованности от пород, что прослеживается для обширных тундровых ландшафтов Таймыра.

Таблица 4

**Площадь классов геохимических ландшафтов в пределах различных биомов, %**

Геохимические ландшафты Биомы	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup> -Ca <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup> - Na <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup> , Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Тундры	91,2	8,8			
Хвойные леса	77,8	10,0	9,9	2,3	
Смешанные леса	65,2	16,4	18,4		
Широколиственные леса	34,4	34,6	22,1	8,9	
Травяные экосистемы	10,0	2,9	54,8	32,2	0,1

Опосредованная роль кальция обнаруживается при более глубоком залегании карбонатов, в пределах 1–2 м. В этом случае на характер закрепления углерода оказывает влияние складывающийся водный режим, приводящий к дополнительному осушению почв и некоторому противодействию выноса углерода и к уменьшению масштабов элювиально-иллювиальной дифференциации почвенного профиля в целом. Нельзя не отметить, что и в первом, и во втором случае проявления карбонатности она оказывает воздействие на поведение углерода на самых начальных стадиях деструкции

органического вещества – стадии формирования подстилок. Последние в этом случае приобретают деструктивный или гумифицированный характер даже в условиях северотаежных ландшафтов, что следует расценивать как миграцию в эти районы южнотаежных типов подстилок.

Другой случай опосредованного влияния карбонатов обнаруживается для условий подчиненных ландшафтов, где дополнительный приток карбонатов благоприятствует развитию почв перегнойного ряда. Обычно эти почвы занимают транзитно-аккумулятивные ландшафты.

Косвенная роль карбонатности осуществляется и через механизм биологического круговорота. Так, в условиях Присурского лесного массива (Чувашская Республика) подстиление бедных и легких в гранулометрическом отношении почвообразующих пород тяжелыми, насыщенными основаниями пермскими глинами обуславливает формирование под смешанными хвойными лесами гумифицированных и перегнойных подстилок с тенденцией накопления гумуса в верхних горизонтах. В близких биоклиматических условиях в пределах Хреновского бора (Воронежская область) такие явления не отмечены, что объясняется отсутствием подобного подстилания.

Таким образом, проявление карбонатности довольно разнообразно, но ее роль инвариантна и обычно приводит к увеличению степени закрепления углерода в почвенном профиле – от подстилки до минеральных горизонтов, причем это принимает как локальный, так и территориальный характер с различным механизмом воздействия на закрепление углерода. Данное обстоятельство важно учитывать при составлении крупномасштабных карт поведения углерода.

***О роли рельефа в закреплении углерода в профиле почв.*** Хотя значение рельефа трудно переоценить, следует, тем не менее, указать на некоторые новые аспекты его роли. Полевые исследования в различных природных зонах показывают, что с юга на север происходит смещение основных центров гумификации в системе сопряженных элементарных ландшафтов.

Так, если в южнотаежных ландшафтах, как правило, благоприятные условия для накопления углерода складываются в автоморфных условиях, то в северотаежных экосистемах эти условия оказываются смещенными к транзитным ландшафтам. В частности, исследования в пределах Республики Коми показали, что обширные элювиальные позиции обычно занимают заболоченные ландшафты, где углерод

закрепляется в виде торфа, или на этих пространствах развиваются бедные песчаные подзолы с минимальными потенциальными возможностями для закрепления  $C_{орг}$ . Транзитные ландшафты с характерным для них проточным характером увлажнения, где развиваются перегнойно-глеевые почвы, оказываются в этой ситуации наиболее благоприятными пространствами для закрепления углерода.

Исследования в тундровой зоне показывают, что в условиях относительно расчлененного рельефа максимальное закрепление углерода обнаруживается в транзитно-аккумулятивных ландшафтах, часто представляющих полосы стока, где благоприятные условия создаются за счет полугидроморфизма в сочетании с постоянным дополнительным поверхностным притоком водорастворимых форм кальция и магния и растворенного кислорода. Эти условия и оказываются наилучшими для закрепления углерода в формирующихся полугидроморфных тундрово-болотных почвах.

Интересно заметить, что к югу от южной тайги благоприятные условия также частично смещаются от автоморфных к транзитным ландшафтам. Это хорошо видно на примере серых лесных глеевых почв, развивающихся на склонах с близким залеганием грунтовых вод и более активным накоплением гумуса, по сравнению с серыми лесными почвами водораздельных пространств. В степных условиях центры гумификации смещаются в транзитно-аккумулятивные ландшафты. Примером являются черноземно-луговые почвы и каштаново-луговые, занимающие подчиненное положение.

Таким образом, при движении и на север, и на юг от южнотаежной зоны характер увлажнения приобретает ведущее значение для поведения углерода. Вместе с тем представляется, что к югу от таежной зоны эта роль в большей степени принадлежит грунтовым водам, тогда как к северу и даже в пределах ее – верховодке. Вышесказанное подтверждает предположение А.А. Роде [19] о том, что при благоприятных условиях гумусообразование может продвигаться далеко на север. Однако это происходит на фоне сужения общего экологического пространства, благоприятного для гумусонакопления.

***Поведение органического углерода в пределах мерзлотных и горных областей.*** Обращение к картографическому материалу показывает, что значительная часть биомного пространства России лежит в пределах мерзлотного сектора, занимающего более 60% ее территории. В этот обширный сектор входят арктическая пустыня, тундра и значительная часть таежного пространства. К тому же он осложняется горными системами, что в свою очередь определяет целый ряд специфических



характерных черт. В связи с этим при всей безусловной важности биомов, лежащих вне зоны распространения мерзлоты, ведущая роль криогенеза в поведении углерода, по крайней мере в площадном отношении, в пределах России несомненна.

Основная особенность поведения  $C_{орг}$  в этих условиях связана с широким распространением плотных пород – свыше 50% общей площади многолетнемерзлых пород (рис. 1). Это обуславливает интенсивный латеральный сток, который характерен не только для собственно тундровых ландшафтов с близким залеганием мерзлоты, ограничивающим вертикальное перемещение углерода, но и для горных ландшафтов. Неслучайно А.И. Перельман выделял мерзлоту в качестве отдельного геохимического фактора [16]. Менее 30% мерзлотных областей характеризуются максимальным и средним уровнями закрепления углерода в почвенном покрове.

Горные области, занимающие свыше 30% территории страны, характеризуются абсолютным преобладанием плотных пород, в пределах которых площадь ландшафтов с ограниченным вертикальным перемещением  $C_{орг}$  составляет более 80%. Интересно отметить более низкую долю, приходящуюся на ландшафты со средним уровнем потенциально возможного закрепления углерода, по сравнению с территорией развития многолетнемерзлых пород. В целом же, наблюдается достаточно высокое подобие в общем характере распределения территорий с различными вариантами поведения органического углерода в пределах мерзлотных и горных областей.

**Тундровые биомы.** Тундровые биомы, занимающие в пределах России около 19%, тянутся узкой полосой вдоль северных территорий всего евроазиатского континента, характеризуясь с точки зрения закрепления углерода несколькими важнейшими особенностями.

В первую очередь, обращает на себя внимание тот факт, что в рамках масштаба карты тундры представлены ландшафтами всего двух классов –  $H^+$  и  $H^+-Ca^{2+}$  (рис. 2), причем ландшафты кислого класса преобладают, занимая свыше 90% площади тундр (табл. 4). Такой узкий диапазон геохимических условий вполне закономерен для территорий с ограниченной почвенной толщей, наличием многолетнемерзлых пород и незначительным периодом активного почвообразования – факторами, ограничивающими дифференциацию почвенного покрова в целом.

Вторая особенность закрепления углерода в тундрах – это специфические криогенные процессы, приводящие к активному перемешиванию и погребению верхних

органоминеральных горизонтов, остатки которых часто обнаруживаются у фронта мерзлоты и имеют голоценовый возраст. Нередки явления ретинизации, приводящие к миграции и накоплению углерода у фронта мерзлоты.

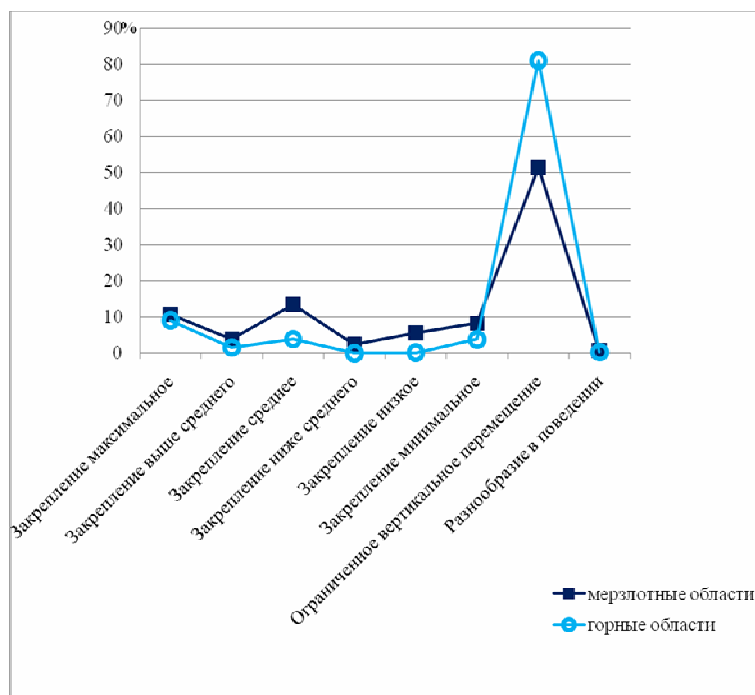


Рис. 1. Распределение территорий с различным поведением  $C_{орг}$  в пределах мерзлотных и горных областей

Третья важная особенность тундровых экосистем – боковое поверхностное элювирование верхней органоминеральной толщи, приводящее не только к выносу растворимых органических соединений, но и к частичной облегченности в гранулометрическом отношении [7].

**Тундровые биомы.** Тундровые биомы, занимающие в пределах России около 19%, тянутся узкой полосой вдоль северных территорий всего евроазиатского континента, характеризуясь с точки зрения закрепления углерода несколькими важными особенностями.

В первую очередь, обращает на себя внимание тот факт, что в рамках масштаба карты тундры представлены ландшафтами всего двух классов –  $H^+$  и  $H^+Ca^{2+}$  (рис. 2), причем ландшафты кислого класса преобладают, занимая свыше 90% площади тундр (табл. 4). Такой узкий диапазон геохимических условий вполне закономерен для территорий с ограниченной почвенной толщей, наличием многолетнемерзлых пород и

незначительным периодом активного почвообразования – факторами, ограничивающими дифференциацию почвенного покрова в целом.

Вторая особенность закрепления углерода в тундрах – это специфические криогенные процессы, приводящие к активному перемешиванию и погребению верхних органоминеральных горизонтов, остатки которых часто обнаруживаются у фронта мерзлоты и имеют голоценовый возраст. Нередки явления ретинизации, приводящие к миграции и накоплению углерода у фронта мерзлоты.

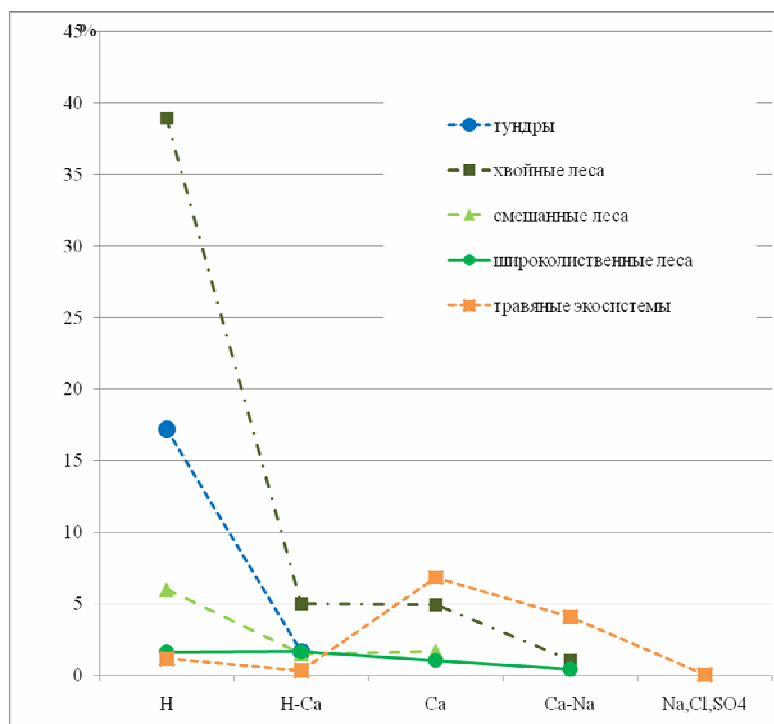


Рис. 2. Распределение территории России по геохимическим классам и биомам

**Тундровые биомы.** Тундровые биомы, занимающие в пределах России около 19%, тянутся узкой полосой вдоль северных территорий всего евроазиатского континента, характеризуясь с точки зрения закрепления углерода несколькими важнейшими особенностями.

В первую очередь, обращает на себя внимание тот факт, что в рамках масштаба карты тундры представлены ландшафтами всего двух классов –  $H^+$  и  $H^+-Ca^{2+}$  (рис. 2), причем ландшафты кислого класса преобладают, занимая свыше 90% площади тундр (табл. 4). Такой узкий диапазон геохимических условий вполне закономерен для территорий с ограниченной почвенной толщей, наличием многолетнемерзлых пород и

незначительным периодом активного почвообразования – факторами, ограничивающими дифференциацию почвенного покрова в целом.

Вторая особенность закрепления углерода в тундрах – это специфические криогенные процессы, приводящие к активному перемешиванию и погребению верхних органоминеральных горизонтов, остатки которых часто обнаруживаются у фронта мерзлоты и имеют голоценовый возраст. Нередки явления ретинизации, приводящие к миграции и накоплению углерода у фронта мерзлоты.

В целом особенности поведения  $C_{орг}$  в пределах тундровых биомов заключаются в преобладании ландшафтов с ограниченным вертикальным перемещением углерода в профиле тундровых почв, а также достаточно широким развитием территорий (на полуострове Таймыр) с максимальным уровнем его закрепления (рис. 3, Приложение). Последнее объясняется широким распространением на полуострове богатых основаниями почвообразующих пород и, как следствие, ландшафтов  $H^+Ca^{2+}$ -класса.

**Хвойные леса.** Хвойные экосистемы, занимающие около 50% всей территории России, характеризуются преобладанием кислых ландшафтов (78%), остальная площадь приходится на ландшафты  $H^+Ca^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  и  $Ca^{2+}Na^+$ -классов (рис. 2, табл. 4). К тому же это сочетается с кислыми продуктами, формирующимися при разложении хвойного опада, что рассматривается как один из факторов, приводящих к оподзоливанию и потере органического вещества.

Для хвойных биомов характерно широкое распространение плотных пород, что ограничивает вертикальное перемещение углерода (в тундровых экосистемах этот процесс контролируется мерзлотой). В этом отношении несколько различаются хвойные леса равнинных и горных территорий: в последних особенно активен поверхностный вынос водорастворимых органических соединений.

Следует также отметить, что из всех рассмотренных экосистем хвойные биомы имеют наименьшую относительную площадь ландшафтов с максимальным закреплением органического углерода.

**Смешанные леса.** Хотя эти леса в пределах России занимают не более 10%, здесь, по сравнению с другими биомами, возрастает доля территорий, характеризующихся максимальным закреплением углерода, что сочетается с возрастанием доли площадей, отмеченных разнообразием в его поведении (рис. 3). В этом отношении особенно выделяется юг Западной Сибири. Для биомов характерно также снижение

распространенности ландшафтов с кислым классом миграции на фоне закономерного увеличения доли ландшафтов  $H^+$ - $Ca^{2+}$  и  $Ca^{2+}$ -класса (табл. 4).

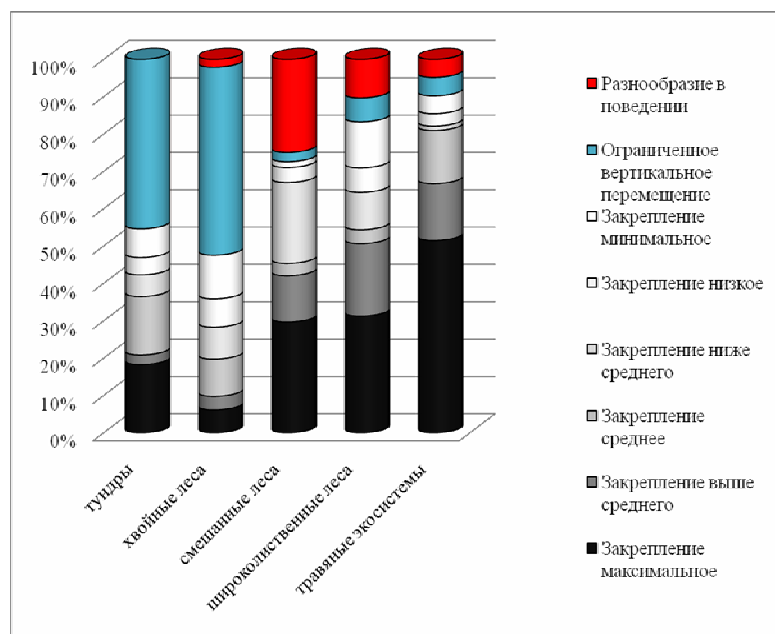


Рис. 3. Характеристика биомов по поведению  $C_{org}$

**Широколиственные леса.** По сравнению со смешанными лесами, в этих экосистемах увеличивается доля площадей с максимальным и выше среднего потенциальными уровнями закрепления органического углерода (в сумме более 50%), а доля ландшафтов с разнообразием в поведении  $C_{org}$  – снижается (рис. 3).

Площадь  $H^+$ ,  $H^+$ - $Ca^{2+}$  и  $Ca^{2+}$ -классов геохимических ландшафтов под широколиственными лесами достаточно выровнена (табл. 4, рис. 2). В условиях данных биомов отмечается развитие ландшафтов со смешанным участием ионов кальция и натрия. Ярким примером в этом отношении являются широколиственные леса Воронежской области, в пределах знаменитого Шипова леса, где в почвенном покрове нередко развиваются темно-серые почвы с элементами солонцеватости вплоть до солонцов.

**Травяные экосистемы.** Особенности геохимических условий существования этих экосистем заключаются в преобладании ландшафтов  $Ca^{2+}$  и  $Ca^{2+}$ - $Na^+$ -классов, занимающих в совокупности 87% территории биома (рис. 2, табл. 4). Кроме того, только в пределах этого биома выделяются занимающие незначительную площадь ландшафты  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ -класса. Для травяных экосистем характерна наивысшая, по сравнению с другими

экосистемами, доля территорий с максимальными потенциальными возможностями для закрепления углерода – на них приходится более 50% (рис. 3). Это вполне укладывается в общую концепцию формирования гумуса, обычно описываемую для степных экосистем. В числе благоприятных факторов накопления углерода следует назвать состав почвообразующих пород и высокую насыщенность почв основаниями. Не последняя роль принадлежит интенсивной скорости круговорота органического вещества и зольных элементов.

### Заключение

В рамках развиваемой концепции показано, что на территории России с севера на юг увеличиваются возможности для закрепления органического углерода в почве, связанные, в первую очередь, с особенностями почвообразующих пород. Минимальный уровень закрепления  $C_{орг}$  характерен для хвойных лесов, максимальный – для травяных экосистем.

Реализация потенциальных возможностей закрепления углерода в почве тесно связана с геохимическими условиями. Доля благоприятных для закрепления  $C_{орг}$  ландшафтов с участием кальция наиболее велика в травяных экосистемах и широколиственных лесах, что подтверждает концепцию Пономаревой [17] о ведущей роли кальция в закреплении углерода в почве.

Показано, что при благоприятных условиях, включая повышенную карбонатность и специфику проточного увлажнения, гумусообразование может продвигаться далеко на север. В системе последовательных ландшафтов южная тайга – северная тайга – тундровые экосистемы происходит смещение положения основных центров накопления углерода – от водораздельных к склоновым, а затем к транзитно-аккумулятивным ландшафтам, соответственно. Тундровый сектор и горные мерзлотные районы сближает роль криогенеза и явления поверхностного выноса в общем поведении углерода. Роль почвообразующих пород проявляется независимо от типа биома.

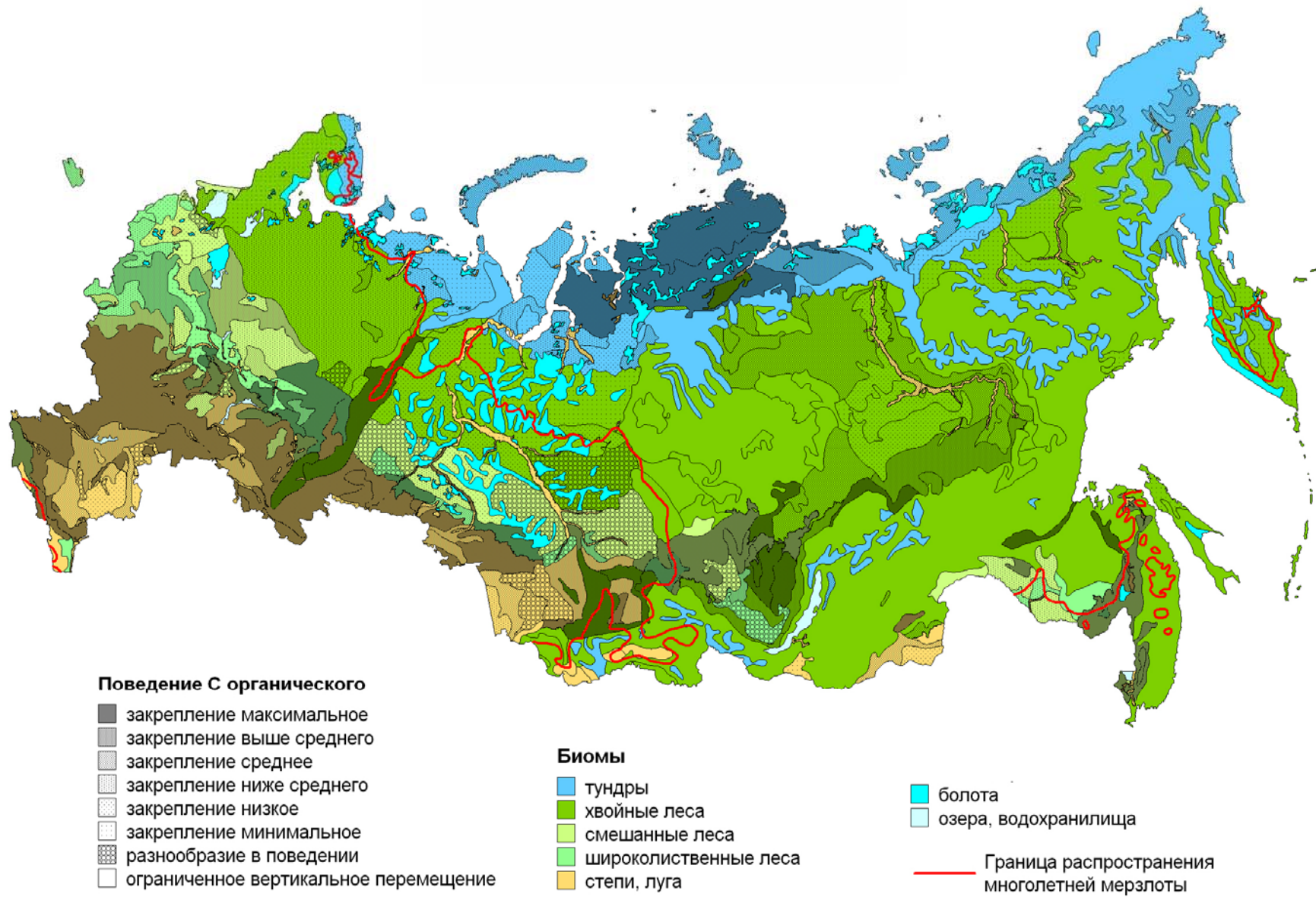
### ЛИТЕРАТУРА

1. Алябина И.О., Богатырев Л.Г. Оценка и картографирование закрепления органического углерода в почвенном покрове // География продуктивности и биогеохимического круговорота наземных ландшафтов: к 100-летию профессора

- Н.И. Базилевич: Материалы конф., Пущино, Московская область, 19–22 апр. 2010 г.). / под ред. Г.В. Добровольского и др. М., 2010. С. 38–50.
2. *Арчегова И.Б.* Гумусообразование на Севере европейской территории СССР / отв. ред. Д.С. Орлов. Л.: Наука, 1985. 136 с.
  3. *Богатырев Л.Г., Алябина И.О.* Оценка поведения углерода в современных ландшафтах на основе использования ГИС-технологий // Всероссийская научная конференция молодых исследователей «Шаг в будущее»: Докл. пленар. заседаний. М., 2010. С. 24–27. (Профессионал).
  4. *Богатырев Л.Г., Кунишуакова А.М.* Опыт использования картографического метода в изучении баланса углерода // Вестн. МГУ. Сер. 17, Почвоведение. 1994. № 1. С. 26–30.
  5. *Вильямс В.Р.* Почвоведение. М.: ОГИЗ Сельхозгиз, 1953. Т. 5.
  6. *Глазовская М.А.* Педолитогенез и континентальные циклы углерода. М.: Книж. дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 336 с.
  7. *Иванов В.В.* О возможной роли поверхностно-элювиальных процессов в генезисе покровных отложений Севера // Почвоведение. 1976. № 2. С. 27–34.
  8. Карта растительности СССР: (для высших учебных заведений). Масштаб 1:4 000 000. М.: Ин-т географии АН СССР, 1990.
  9. *Крупеников И.А.* О законах почвоведения // Бонитировка, генезис и химия почв Молдавии. Кишинев: Штиинца», 1979. С. 3–9.
  10. *Моисеев Б.Н., Алябина И.О.* Баланс углерода в экосистемах. Масштаб 1:25 000 000 // Федеральный атлас «Природные ресурсы и экология России» / под ред. Н.Г. Рыбальского и В.В. Снакина. М.: НИА «Природные ресурсы», 2002. С. 88–89.
  11. *Моисеев Б.Н., Алябина И.О.* Депонирование органического углерода в почве. Масштаб 1:35 000 000 // Федеральный атлас «Природные ресурсы и экология России» / под ред. Н.Г. Рыбальского и В.В. Снакина. М., 2002. С. 90–91.
  12. *Моисеев Б.Н., Алябина И.О.* Оценка и картографирование потоков органического углерода, поступающего в почвы основных биомов России // Почвоведение. 2002. № 6. С. 675–681.
  13. *Моисеев Б.Н., Алябина И.О.* Оценка и картографирование составляющих углеродного и азотного балансов в основных биомах России // Изв. РАН. Сер. геогр. 2007. № 5. С. 1–12.

14. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И. Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 254 с.
15. Перельман А.И. Геохимические ландшафты СССР. Масштаб 1:20 000 000. ФГАМ. М.: ГУГК, 1964. С. 238, 297–298.
16. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М.: Высш. шк., 1966. 392 с.
17. Пономарева В.В., Плотникова Т.А. Гумус и почвообразование. Л., 1980. 222 с.
18. Почвенная карта РСФСР / под ред. В.М. Фридланда. Масштаб 2 500 000. М.: ГУГК, 1988. (Скорректированная цифровая версия, 2007).
19. Роде А.А., Смирнов В.Н. Почвоведение. М.: Высш. шк., 1972. 480 с.
20. Рожков В.А., Вагнер В.В., Козут Б.М., Конюшков Д.Е., Шеремет Б.В. Запасы органических и минеральных форм углерода в почвах России // Углерод в биогеоценозах: Доклады на XV ежегод. чтениях памяти академика В.Н. Сукачева. М., 1997. С. 5–58.
21. Урусевская И.С., Мартыненко И.А., Алябина И.О. Почвы. Масштаб 1:15 000 000 // Национальный атлас России. М.: Роскартография, 2007. Т. 2: Природа. Экология. С. 298–301.
22. Черкинский А.Е., Чичагова О.А. Типы органопротилей почв Мира // Глобальная география почв и факторы почвообразования / под ред. Н.А. Караваевой. М., б.г. С. 164–195.





ПРИЛОЖЕНИЕ. Поведение органического углерода в почвах биомов