

Методика расчетного определения химических показателей экологической опасности деградации почв тундр и ее обоснование

В. Д. ВАСИЛЬЕВСКАЯ, В. Я. ГРИГОРЬЕВ, Е. Ю. ПОГОЖЕВ, Е. А. ПОГОЖЕВА

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
119992, Москва, Воробьевы горы
E-mail: pogozhevae@rambler.ru

АННОТАЦИЯ

На основе краткого обзора и детального анализа результатов исследований химических и других свойств почв тундровой зоны России разработана методика расчетного определения важных агрохимических свойств естественного и нарушенного почвенного покрова тундр для количественной оценки экологической опасности его деградации. Исходными данными для проведения расчетов являются величины содержания гумуса в слое 0–20 см, установленные экспериментально или рассчитанные по взаимосвязям его значений с величинами потери почвы при прокаливании, гигроскопической влажности верхнего слоя почвы и органической его составляющей, а также качественная характеристика водных и тепловых условий в вегетационный период. Для наглядной иллюстрации последовательности и правомерности расчетных определений приведены пример расчета и результаты их практического применения.

Ключевые слова: методика, агрохимические показатели, деградация почв, тундра.

Проблема агрохимической характеристики почв Севера и оценка изменчивости ее показателей в условиях техногенных воздействий до сих пор остается актуальной и в литературе освещена крайне скудно. Однако взаимосвязь свойств почв с показателями продуктивности растительности позволяет использовать их в качестве диагностических признаков для количественной оценки степени устойчивости, экологической опасности деградации и возможности естественного или искусственного восстановления почвенно-растительного покрова тундр после внешних воздействий [1–5].

Важную роль в этой оценке играет количественное определение изменений агрохимических свойств почв, которые в комплексе с изменениями других их свойств, вод-

ных и тепловых условий определяют эффективное плодородие. Учет этих изменений актуален при механических и физических нарушениях, химическом и биологическом загрязнении почв [4]. В любом из этих случаев прогнозную оценку устойчивости и степени экологической опасности деградации нарушенных тундровых почвогрунтов можно провести по экспериментальным или расчетным определениям изменений полезных и вредных для роста растений химических свойств почв. Цель настоящей работы – разработка по имеющимся результатам исследований методики расчетной оценки изменчивости химических показателей естественных и нарушенных тундровых почв для определения экологической опасности деградации и условий естественного или искусственного вос-

становления почвенно-растительного покрова тундр. Первая попытка этой разработки сделана нами ранее [4, 6].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Агрохимическая характеристика почв предполагает экспериментальные определения кислотности водной и солевой вытяжек, гумуса по Тюрину, общего азота по Кьельдалю, легкорастворимых фосфатов по Кирсанову и подвижного калия по Масловой, доступных для растений форм азота и некоторых других химических элементов известными и общепринятыми в почвоведении методами [7]. Аммиачный азот определяли в 2%-й вытяжке KCl с реактивом Несслера. В эту вытяжку переходит аммоний, находящийся в обменном состоянии, и аммоний растворимых в воде аммонийных солей, причем последняя форма аммония составляет незначительную часть [4,7].

Агрохимические свойства связаны между собой и с другими характеристиками почв, поэтому для достижения поставленной в работе цели использованы выявленные и аналитически выраженные общие закономерности распределения по почвенному морфологическому профилю количественных показателей (уровня кислотности, содержания гумуса, азота, фосфора и калия) и их взаимосвязи, полученные при математической обработке результатов исследований свойств почв тундровой зоны Сибири [8–10].

В основу определения количественных взаимосвязей между агрохимическими свойствами тундровых почв положены результаты собственных полевых и лабораторных исследований, а также данные полевых и модельных экспериментов других исследователей. Используемые натурные данные получены в основном на полуостровах Таймыр и Ямал, а также в восточно-европейской тундре. Тундры исследованы в широком диапазоне типов микрорельефа, почвенных и растительных ассоциаций.

Диапазон исследованных тундровых почв включает глееземы (грубогумусированные, перегнойные), торфяно-глееземы (торфяно-глееземы типичные, перегнойно-торфяно-глееземы), подбуры и др. [8–10]. Полевые и ла-

бораторные исследования, результаты которых использованы в работе, проведены по общепринятым методам определения свойств почв [7, 14]. При обработке экспериментальных данных использованы математические методы подбора эмпирических уравнений [15]. Для наглядной иллюстрации выявленных общих закономерностей и взаимосвязей построены графики, на которых точками показаны статистически усредненные значения зависимых переменных и штриховыми линиями – диапазон их изменений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основные результаты исследований включают описание общих закономерностей изменений основных агрохимических свойств почв по морфологическому профилю и выявленных взаимосвязей агрохимических свойств почв с другими почвенными свойствами, методику расчетной агрохимической характеристики почвенного покрова и оценки экологической опасности его деградации при разных техногенных воздействиях, а также примеры и результаты ее практического применения.

Общие закономерности изменений агрохимических свойств почв. Выявленные закономерности изменения агрохимических свойств почв по морфологическому профилю почв тундр представлены графически (рис. 1) и в виде аналитического описания. Определено, что кислотность почв Крайнего Севера, оцениваемая величиной рН водной вытяжки, мало изменяется во времени и только к началу вегетационного периода несколько увеличивается. Почвы отрицательных элементов нанорельефа, как правило, имеют более кислую реакцию верхних горизонтов по сравнению с аналогичными горизонтами почв положительных элементов нанокомплексов. В болотных почвах кислотность в нижней части профиля немного возрастает, в тундровых, наоборот, книзу идет некоторое подщелачивание [8]. Величина рН водной вытяжки изменяется от 4 до 6 для почв Ямала и восточно-европейской тундры и от 5 до 7 – для почв Таймыра [8–10].

Детальный анализ экспериментальных данных выявил для исследованных почв за-

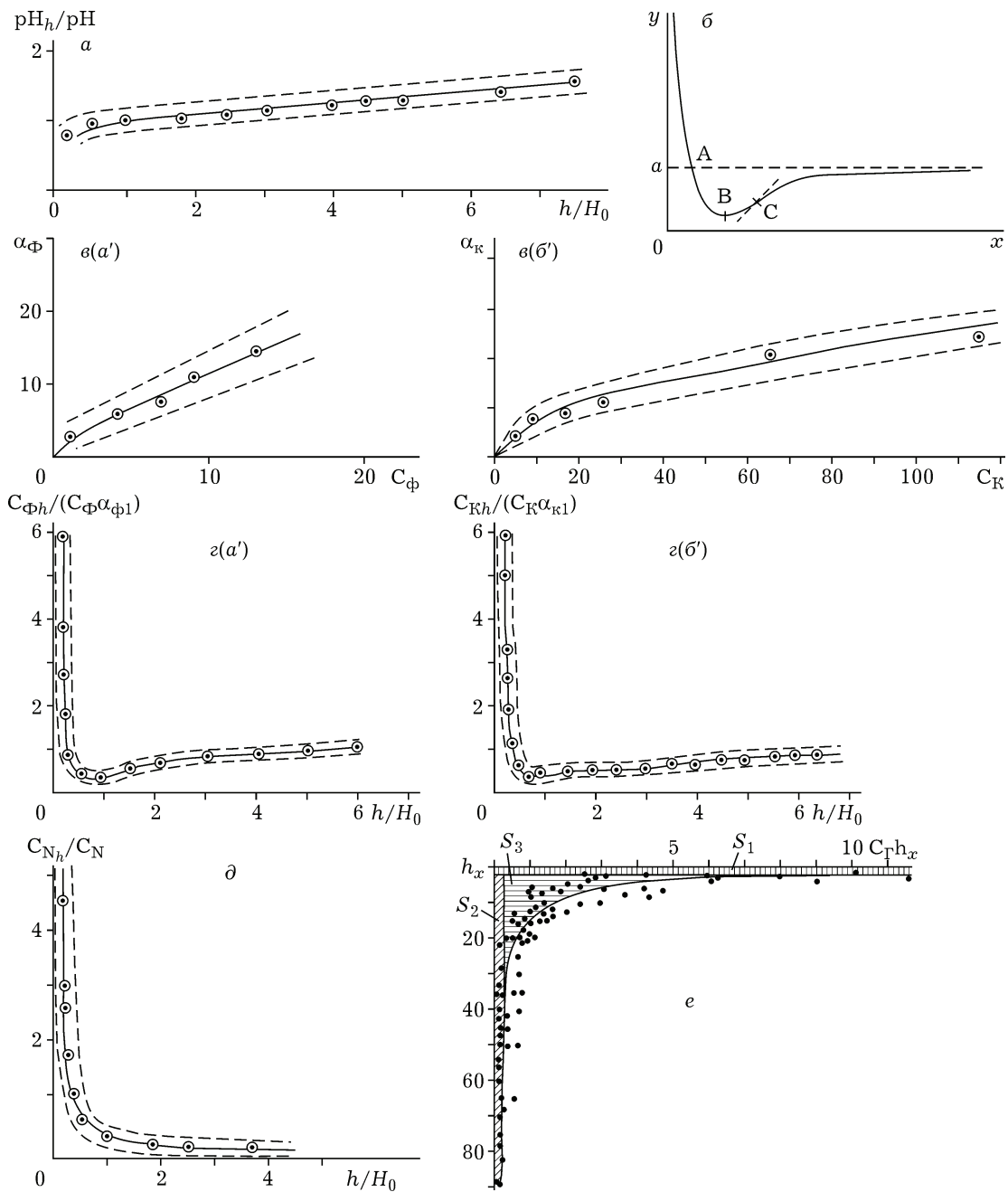


Рис. 1. Графики общих закономерностей изменения по морфологическому профилю почв тундры их агрохимических характеристик: а – кислотности (pH_h / pH_0) по глубине (h/H_0); б – подвижных форм фосфора и калия (y) по глубине (x); в – параметров α_ϕ и α_k от содержания (мг/100 г почвы) в слое 0–20 см подвижных форм фосфора (C_ϕ) и калия (C_k) соответственно а' и б'; з – подвижных форм фосфора ($C_{\phi h}$) и калия (C_{kh}) в виде функций $C_{\phi h}/(C_\phi \cdot \alpha_{\phi 1})$ от h/H_0 и $C_{kh}/(C_k \cdot \alpha_{k1})$ от h/H_0 соответственно а' и б'; д – общего азота (C_{Nh}) в величинах C_{Nh}/C_N и h/H_0 ; е – гумуса ($C_{\Gamma h_x}$) по глубине (h_x). Другие обозначения пояснены в тексте

кономерности изменения величин рН по их профилю. Распределение величины рН по глубине различных почв описывается эмпирическими уравнениями вида:

$$pH_h = \alpha h^{0,8} - pH_{h_0} \text{ при } 3 \leq h \leq 130 \text{ см, (1)}$$

где pH_h , pH_{h_0} – показатели кислотности почв соответственно на глубине (h) и в поверхностном слое (h_0). Величины эмпирических коэффициентов (α) для исследуемых разных почв различны и изменяются от 0,5 до 2,5.

Более общая закономерность изменения величины рН по профилю почв выявляется при анализе функций относительных величин pH_h / pH от h / H_0 (рис. 1, а):

$$pH_h = 0,95(h/H_0)^{0,2}pH \text{ при } 0,1 \leq h/H_0 < 8,0, \quad (2)$$

где рН – средневзвешенный показатель кислотности в слое почвы (H_0), равном 0–20 см.

Определение подвижного фосфора показало, что как тундровые, так и болотные почвы разных районов тундры чрезвычайно бедны легкорастворимыми фосфатами. По грациям, принятым для дерново-подзолистых почв под культурные растения, эти почвы относятся к группе с очень низкой обеспеченностью фосфором. Наименее бедны фосфором болотные почвы. Однако растения тундры интенсивно используют запасы фосфора в почвах, что при разложении поступающего в почву растительного опада способствует выравниванию содержания фосфатов по глубине почвенного профиля. В течение вегетационного периода содержание подвижных фосфатов в зависимости от влажности и температуры почв изменяется в верхних и остается более или менее постоянным в нижних слоях. С глубиной содержание фосфора в верхних горизонтах почв уменьшается, а в нижних надмерзлотных глеевых слоях снова увеличивается.

В содержании подвижного калия в почвах тундр отмечаются те же закономерности, что и для подвижного фосфора. По грациям для дерново-подзолистых почв болотные почвы тундр относятся к слабообеспеченным подвижным калием, тундровые – к среднеобеспеченным. Содержание подвижного калия в зависимости от влажности и температуры почв изменяется в течение вегетационного периода подобно изменению содержания подвижного фосфора. Из органогенных горизонтов извлекается больше подвижного калия, нежели из минеральных. Однако в нижней части деятельного слоя почв содержание подвижных форм калия, как и фосфора, заметно увеличивается. В изменчивости содержания подвижного калия в различные сезоны отмечается та же закономерность, что и для подвижного фосфора: в теплое лето их количество в почвах больше, чем в холодное.

Детальный анализ экспериментальных данных выявил общую закономерность измене-

ний содержания подвижных форм фосфора $C_{\text{Ф}}$ (P_2O_5) и калия $C_{\text{К}}$ (K_2O) по морфологическому профилю исследуемых почв тундр. Аналитически она описывается функцией общего вида (рис. 1, б):

$$y = a + b/x + c/x^2 \text{ при } x > 0; b < 0; c > 0, \quad (3)$$

где y – зависимая переменная, равная $C_{\text{Ф}}$ или $C_{\text{К}}$, мг/100 г; x – независимая переменная, равная глубине h , см; a, b, c – эмпирические коэффициенты.

График этой функции имеет две асимптоты при $x = 0$ и $y = a$, а также три характерные точки со следующими координатами (x, y): пересечение с асимптотой $A(-c/b, a)$; экстремум $B(-2c/b, a - b^2/(4c))$ и точку перегиба $C(3c/b, a - 2b^2/(9c))$.

Величина коэффициента a для подвижных форм фосфора и калия разных почв изменяется в широких пределах: для фосфора ($a_{\text{Ф}}$) от 0 до 20, для калия ($a_{\text{К}}$) от 0 до 25 мг/100 г.

Анализ данных показал, что статистически усредненные значения $a_{\text{Ф}}$ и $a_{\text{К}}$ зависят от содержания в слое исследуемых почв тундр (H_0), равном 0–20 см, подвижных форм фосфора ($C_{\text{Ф}}$) и калия ($C_{\text{К}}$) соответственно (см. рис. 1, в ($a', б'$)). Эти зависимости описываются эмпирическими уравнениями следующего вида:

$$a_{\text{Ф}} = 2,0 C_{\text{Ф}}^{0,8} \quad (4)$$

$$\text{и } a_{\text{К}} = 2,4 C_{\text{К}}^{0,5}. \quad (5)$$

Для учета различий коэффициентов ($a_{\text{Ф}}$, $a_{\text{К}}$) и нахождения общего уравнения распределения подвижных форм фосфора и калия по глубине (h) построены графики зависимости относительных величин $C_{\text{Ф}h}/(C_{\text{Ф}} \cdot a_{\text{Ф}1})$, $C_{\text{К}h}/(C_{\text{К}} \cdot a_{\text{К}1})$ от значений h/H_0 (см. рис. 1, г ($a', б'$)) и определены координаты характерных точек А, В, С, а также эмпирические коэффициенты b_1, c_1 (табл. 1).

Таким образом, учитывая, что относительные значения асимптот $a_{\text{Ф}1}, a_{\text{К}1}$ соответственно равны $a_{\text{Ф}}/C_{\text{Ф}}, a_{\text{К}}/C_{\text{К}}$ и установлены величины коэффициентов b_1, c_1 , можно составить уравнения для расчетного определения содержания подвижных форм фосфора и калия в любой точке профиля почв тундр:

$$C_{\text{Ф}h} = a_{\text{Ф}} (1 - 0,84H_0/h + 0,25H_0^2/h^2) \text{ при } 0 < h \leq 100 \text{ см} \quad (6)$$

Результаты обработки экспериментальных данных

Характеристика	Характерные точки						Эмпирические коэффициенты	
	А		В		С		b_1	c_1
	y	x	y	x	y	x		
Фосфор ($C_{\text{Ф}}$)	1,0	0,3	0,3	0,6	0,4	0,9	-0,84	0,25
Калий ($C_{\text{К}}$)	1,0	0,4	0,4	0,8	0,6	1,2	-0,96	0,38

и

$$C_{\text{К}h} = a_{\text{к}} (1 - 0,96 H_0/h + 0,38 H_0^2/h^2) \quad \text{при } 0 < h \leq 100 \text{ см}, \quad (7)$$

где $a_{\text{ф}}$, $a_{\text{к}}$ – коэффициенты, равные абсолютным значениям асимптот, рассчитываются соответственно по уравнениям (4), (5), мг/100 г.

Исходными данными для расчетных определений являются заданная глубина (h) и величины содержания подвижных форм фосфора ($C_{\text{Ф}}$) и калия ($C_{\text{К}}$) в слое 0–20 см почвы. Значения $C_{\text{Ф}}$, $C_{\text{К}}$ определяются экспериментально или по расчетным эмпирическим уравнениям. Одинаковый характер изменений содержания $C_{\text{Ф}h}$ и $C_{\text{К}h}$ по морфологическому профилю почв тундр позволяет сделать предположение о наличии взаимосвязей между ними.

Другой важной химической и агрохимической характеристикой почв является валовое содержание азота. Общий запас его в почве считают показателем ее потенциального плодородия. Накопление органического азота (N) и углерода (C) характеризует почвообразовательный процесс. Отношение C : N служит показателем обогащенности гумуса азотом [7].

Количество общего азота в гумусоаккумулятивных и минеральных горизонтах почв тундровой зоны Западной и Средней Сибири, а также восточно-европейской тундры сравнительно невелико и изменяется от 0,03 до 0,6 % [8–10]. Значительно большее количество общего азота (1–3 %) содержится в органогенных горизонтах (подстилках и торфянистых горизонтах), имеющих потерю при прокаливании более 50 % [10]. Изменение содержания органического азота по профилю почв тундр приближенно описывается следующей зависимостью (рис. 1, д):

$$C_{\text{N}h} = 0,5C_{\text{N}}H_0/h, \quad (8)$$

где $C_{\text{N}h}$, C_{N} – содержание общего азота на глубине (h) и в слое почвы H_0 (0–20 см).

Более изменчиво в почвах тундровой зоны, особенно в органогенных горизонтах, количество аммиачного азота. Наибольшим количеством аммиачной формы азота характеризуются болотные почвы, далее идут тундровые глеевые разных типов тундр. В течение вегетационного периода содержание аммиачного азота изменяется в широких пределах и зависит в основном от содержания органического вещества, влажности и в меньшей степени от температуры почвы. По сравнению с изменениями подвижных форм калия и фосфора незначительное увеличение его содержания отмечается в самый теплый период при оптимальной влажности, когда идет наиболее интенсивное разложение органического вещества. Несмотря на максимальное развитие в это время растений и микроорганизмов, количество аммиачного азота в почве остается высоким. Средние за вегетационные периоды трех лет наблюдений значения содержания аммиачного азота в слое 0–20 см составляли 2,5–4,5 в тундровых почвах и 5,7–17,0 мг/100 г – в болотного типа почвах. Наименьшие значения характерны для положительных элементов микрорельефа, наибольшие – для отрицательных. По глубине почвенного профиля наблюдается резкое уменьшение содержания аммиачного азота до примерно постоянного его значения в минеральных горизонтах почв. Характер его распределения по глубине близок к характеру изменения по профилю почв содержания общего азота.

Предварительная качественная агрохимическая характеристика почв тундр Сибири показала, что нуждаемость растений в доступных формах фосфора сильная, калия – средняя. Азот в тундровых, особенно нару-

шенных, почвах всегда в дефиците. Количество элементов питания растений и уровень кислотности резко уменьшаются в верхних слоях, далее по профилю почв они меняются слабо. Основной причиной резкого уменьшения содержания химических элементов питания растений является аналогичный характер изменения содержания органического вещества (гумуса) с глубиной тундровых почв.

Основными общими признаками, характеризующими особенности гумусного состояния почв тундр Сибири, являются высокое содержание гумуса в верхней части профиля почв и резко убывающий тип его профильного распределения до постоянного значения в почвообразующих породах. Другой особенностью является пропитанность гумусом всей оглеенной части профиля тундровых почв. Например, в глеевых горизонтах суглинистых почв Таймыра содержание гумуса составляет в среднем 2,3–2,7 % [8].

Выделяются несколько процессов и причин накопления гумуса в глеевой толще почв тундр. Во-первых, процессы мерзлотной ретинизации гумуса, включающие в себя миграцию подвижных форм гумусовых соединений к холодному фронту многолетней мерзлоты, механическую задержку гумусовых соединений над мерзлотным водоупором и постепенное накопление (консервация) гумусовых веществ в глеевой толще в связи с замедленностью их разложения. Вторым существенным источником внутрипочвенного гумусонакопления может служить корневой опад или постепенное погребение органогенных горизонтов при процессах криогенного массообмена [9, 10], а также наличие гумуса в материнской породе. Определение органического углерода в морских отложениях, являющихся почвообразующими породами для многих почв тундр, показало, что в морских суглинках и глинах количество гумуса колеблется от 1 до 2 %, а в песках и супесях от 0 до 0,5 % [8].

Анализ экспериментально установленных распределений гумуса по профилю почв Западной и Средней Сибири с учетом его содержания в материнской породе показал, что они описываются эмпирическими уравнениями следующего вида (см. рис. 1, е):

$$C_{\Gamma h} - C_{\Gamma 0} = \alpha_{\Gamma}/h \text{ при } h > h_0 \quad (9a)$$

и $C_{\Gamma h} = C_{\Gamma h_0} - C_{\Gamma 0} \text{ при } h < h_0, \quad (9б)$

где $C_{\Gamma h}$, $C_{\Gamma h_0}$ и $C_{\Gamma 0}$ – содержание гумуса соответственно на глубине h , в поверхностном слое h_0 и в материнской породе, %; α_{Γ} – эмпирический коэффициент, зависящий от уровня гумусности почв.

Математическая обработка данных показала, что величина коэффициента α связана с содержанием гумуса (C_{Γ}) в поверхностном слое (0–20 см) почв:

$$\alpha_{\Gamma} = 5,0 (C_{\Gamma} - C_{\Gamma 0}). \quad (10)$$

Тогда общий вид распределения гумуса по профилю тундровых почв описывается простыми уравнениями:

$$C_{\Gamma h} = 0,25 (C_{\Gamma} - C_{\Gamma 0})(H_0/h) + C_{\Gamma 0} \quad (11a)$$

при $h \geq h_0$

и $C_{\Gamma h} = C_{\Gamma h_0} \text{ при } h < h_0, \quad (11б)$

где H_0 – поверхностный слой почвы, равный 20 см.

При малом содержании гумуса в материнской породе $C_{\Gamma 0} \approx 0$ или при $C_{\Gamma} \gg C_{\Gamma 0}$ уравнение (11a) значительно упрощается:

$$C_{\Gamma h} = 0,25 C_{\Gamma} \cdot H_0/h. \quad (12)$$

Выявленные и аналитически описанные общие закономерности изменения по морфологическому профилю почв уровня кислотности, содержания минеральных элементов питания и гумуса, а также более детальный анализ накопленного экспериментального материала позволили установить ряд эмпирических уравнений их взаимосвязей для количественного расчетного определения агрохимических свойств наиболее активного слоя (0–20 см) и показателей экологической опасности деградации почв тундр.

Взаимосвязи агрохимических и других почвенных свойств. Выявленные взаимосвязи представлены графически (рис. 2) и последующим аналитическим описанием. Между важными показателями уровня кислотности почв солевой (pH_c) и водной (pH_B) вытяжек обнаружена следующая зависимость (см. рис. 2, а):

$$pH_c = 1,7 (pH_B)^{1,2} \text{ при } 4 < pH_B < 8. \quad (13)$$

Анализ результатов экспериментальных определений содержания гумуса (C_{Γ}) и общего азота (C_N) в органоминеральных и минеральных горизонтах почв разных тундр показал, что между C_N и C_{Γ} выявляется взаимосвязь, которая описывается следующими эмпирическими уравнениями (см. рис. 2, б):

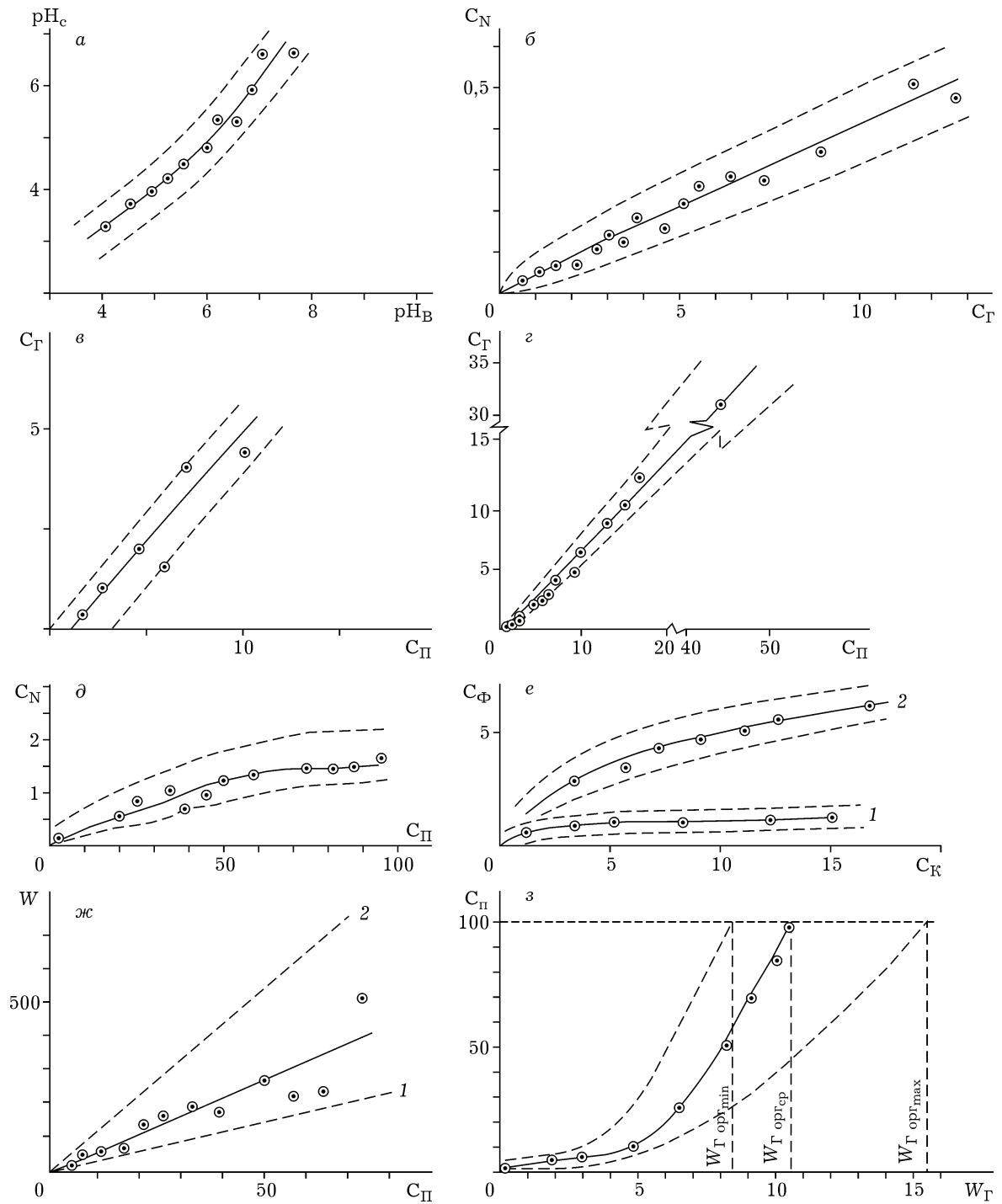


Рис. 2. Графики взаимосвязей агрохимических и других свойств почв тундр: а – кислотности солевой (pH_c) и водной (pH_B) вытяжек; б – общего азота (C_N , %) и гумуса ($C_Г$, %); в – гумуса ($C_Г$, %) и потери при прокаливании ($C_П$, %); г – ($C_Г$, %) и ($C_П$, %) тундровых и других почв; д – (C_N , %) и ($C_П$, %); е – подвижных форм фосфора ($C_Ф$) и калия (C_K) соответственно в теплое (1) и холодное (2) лето; ж – (W , %) и ($C_П$, %) соответственно в сухое (1) и влажное (2) лето; з – ($C_П$, %) от отношения ($W_Г/W_{Горг}$). Другие обозначения в тексте

$$C_N = K_N \cdot C_T^{0,8} \text{ при } 0 < C_T \leq 12 \quad (14a)$$

$$\text{или } C_T = (C_N/K_N)^{1,25} \text{ при } 0,03 < C_N < 0,6, \quad (14b)$$

где C_N , C_T – количество соответственно общего азота и гумуса, %; K_N – эмпирический коэффициент, изменяющийся от 0,080 до 0,046 и в среднем равный 0,063.

Для проверки уравнений привлечены независимые (не учитываемые при нахождении уравнений) данные экспериментальных определений C_N и C_T в нарушенных и ненарушенных почвах Ямала, в целинных и окультуренных почвах восточно-европейской тундры и в почвах Таймыра с разной биологической активностью [8–10].

Сопоставление расчетных и экспериментально установленных значений содержания общего азота (C_N) показало удовлетворительное соответствие. Средняя относительная ошибка расчета 24 %.

Область применения уравнений (14a) и (14b) ограничивается областью применения используемого метода определения гумуса (C_T) по Тюрину, т. е. при $C_T < 15$ % [1]. Сущность этого метода заключается в определении содержания в почве органического углерода (C_C) и расчета величины C_T по соотношению

$$C_T = k_{\Pi} \cdot C_C, \quad (15)$$

где k_{Π} – коэффициент пересчета, равный 1,724 [1].

Содержание органического углерода (C_C) в поверхностном слое (0–20 см) некарбонатных почв тесно связано с потерей почвы при прокаливании (C_{Π}). Однако эта связь для

органогенных (16a), органоминеральных (16б) и минеральных (16в) слоев почв неоднозначна и описывается соответственно разными уравнениями регрессии [11]:

$$C_C = 0,417C_{\Pi} - 2,492; \quad (16a)$$

$$C_C = 0,388C_{\Pi} - 0,578; \quad (16б)$$

$$C_C = 0,405C_{\Pi} - 0,710. \quad (16в)$$

Коэффициенты корреляции для этих уравнений регрессии составляют $0,86 \div 0,98$. Рекомендуемые уравнения регрессии при известном коэффициенте пересчета (k_{Π}) в соотношении (15) позволяют установить зависимости содержания гумуса (C_T) в явном виде от потери почвы после прокаливании (C_{Π}). Например, при $k_{\Pi} 1,724$ по экспериментальным данным определено, что связь содержания гумуса (C_T) с потерей при прокаливании (C_{Π}) для верхних слоев тундровых почв аналитически описывается уравнением (см. рис. 2, в):

$$C_T = 0,6 C_{\Pi} - 1,0 \text{ при } 2 < C_{\Pi} < 12 \%. \quad (17)$$

Сопоставление усредненных экспериментальных данных и расчетных величин содержания гумуса по уравнениям (16б), (16в) и (17) показало их удовлетворительное соответствие (табл. 2). Средняя относительная ошибка не превышает 17 %. Расчетные величины (C_T) по уравнению регрессии (16a) при $6 \leq C_{\Pi} \leq 12$ % сильно занижены. Среднее относительное занижение составляет более 33 %. Очевидно, это уравнение применимо при $C_{\Pi} > 15$ %. Расчетные величины содержания гумуса по уравнениям (16a), (16б) и (17) при потере от

Т а б л и ц а 2

Экспериментальные и расчетные величины содержания гумуса

Результаты	Содержание гумуса (C_T , %) при разной потере при прокаливании (C_{Π} , %)						Ош, %*
	3	4	6	8	10	12	
Экспериментальные	0–1,6 0,8	0,8–2,4 1,6	1,6–3,7 2,6	2,8–4,7 3,7	4,0–6,0 5,0	5,0–7,0 6,0	–
Расчетные по уравнениям:							
(17)	0,8	1,4	2,6	3,8	5,0	6,2	3,1
(16б)	1,0	1,7	3,1	4,3	5,7	7,0	16,2
(16в)	0,9	1,6	3,0	4,4	5,8	7,2	13,2
(16a)	–	–	0,02	1,5	3,0	4,3	33,2

* Здесь и далее в таблицах средняя относительная ошибка.

Расчетные величины содержания гумуса

Результаты расчета по формулам	Содержание гумуса (C_{Γ} , %) при разной потере при прокаливании (C_{Π} , %)					Ош, %
	20	40	60	80	100	
(16а)	10,1	24,5	38,8	53,2	67,6	10,7
(16б)	12,4	25,6	39,1	52,5	65,9	11,8
(16в)	12,7	26,7	40,7	54,6	68,6	16,1
(17)	11,0	23,0	35,0	47,0	59,0	–

прокаливании $C_{\Pi} \geq 20$ % представлены в табл. 3.

Сопоставление расчетных величин содержания гумуса (C_{Γ}) показало, что все уравнения регрессии по сравнению с эмпирическим уравнением (17) для тундровых почв дают несколько завышенные значения. Величина завышения значений C_{Γ} составляет не более 16,1 % (см. табл. 3).

Таким образом, расчетные определения органического углерода (C_C) и содержания гумуса (C_{Γ}) в слое 0–20 см тундровых почв можно проводить по формулам (17) или по уравнениям регрессии (16б), (16в) при потере при прокаливании (C_{Π}) меньше 20 % и по (16а), (16б) при $C_{\Pi} \geq 20$ %.

Для более детального анализа привлечены экспериментальные данные для тундровых и некоторых других почв [7, 12, 13]. В результате введено уравнение связи содержания гумуса (C_{Γ}) и потери при прокаливании (C_{Π}) общего вида (см. рис. 2, з):

$$C_{\Gamma} = C_{\Gamma_{\max}} \cdot (C_{\Pi} - C_{\Pi 0}) / (100 - C_{\Pi 0}), \quad (18)$$

где C_{Γ} , $C_{\Gamma_{\max}}$ – содержание гумуса соответственно при C_{Π} и $C_{\Pi} = 100$ %, %; $C_{\Pi 0}$ – величина потери при прокаливании, при которой $C_{\Gamma} \approx 0$, %. По нашим данным, $C_{\Pi 0} = 2$ %.

Из-за отсутствия достаточного объема определений C_{Γ} при $C_{\Pi} > 15$ % представленный вид уравнения связи при больших значениях C_{Π} является ориентировочным. Очевидно, по мере накопления данных о величинах C_{Γ} при $C_{\Pi} > 15$ % характер уравнения связи и его параметры необходимо уточнять, особенно для органогенных горизонтов тундровых почв, в которых степень минерализации и гумификации органических веществ в значительной степени определяет соотношение углерода гумуса ($C_{\text{СГ}}$) и общего углерода (C_C). Следует уточнить, что при $C_{\Pi} > 15$ % пере-

счет C_C в C_{Γ} является просто алгебраическим действием (умножением на 1,724) и теряет “биологический смысл”.

На данном этапе уточнение расчетных величин C_{Γ} , $C_{\Gamma_{\max}}$ можно провести по известным основным показателям гумусного состояния почв: соотношения ($\Pi_{\Gamma\text{Ф}}$) гуминовых ($C_{\Gamma\text{К}}$) и фульвокислот ($C_{\text{ФК}}$); степени гумификации органического вещества (Π_{Γ}), равного отношению $C_{\Gamma\text{К}}$ и общего органического углерода (C_C); содержания негидролизуемого остатка ($C_{\text{НГ}}$) [8, 12, 13].

Содержание углерода гумуса (C_{Γ}) определяется по уравнению:

$$C_{\text{СГ}} = C_{\Gamma\text{К}} + C_{\text{ФК}} + C_{\text{НГ}}. \quad (19)$$

Величина углерода гуминовых кислот ($C_{\Gamma\text{К}}$) рассчитывается по соотношению

$$C_{\Gamma\text{К}} = \Pi_{\Gamma} C_C. \quad (20)$$

Значение углерода фульвокислот ($C_{\text{ФК}}$) находится по соотношению

$$C_{\text{ФК}} = \Pi_{\Gamma\text{Ф}} / C_{\Gamma\text{К}} = \Pi_{\Gamma\text{Ф}} / (\Pi_{\Gamma} C_C). \quad (21)$$

Тогда содержание углерода гумуса ($C_{\text{СГ}}$) определяется по формуле

$$C_{\text{СГ}} = \Pi_{\Gamma} C_{\Gamma} + \Pi_{\Gamma\text{Ф}} / (\Pi_{\Gamma} C_C) + C_{\text{НГ}} = \beta C_C, \quad (22)$$

где β – доля углерода гумуса от общего органического углерода.

Следовательно, в этих случаях содержания гумуса C_{Γ} при C_C и $C_{\Gamma_{\max}}$ при $C_{\text{Сmax}}$ определяются по общему соотношению

$$C_{\Gamma} = k_{\Pi} \beta C_C \text{ и } C_{\Gamma_{\max}} = k_{\Pi} \beta C_{\text{Сmax}}, \quad (23)$$

где k_{Π} – коэффициент пересчета, равный 1,724; $C_{\text{Сmax}}$ – максимальное содержание органического углерода в органогенных слоях почвы, которое рассчитывается по уравнению (16а) при $C_{\Pi} = 100$ %.

Выявленные соотношения можно применять для расчетного определения близких к

Основные показатели гумусного состояния почв

Показатель	Тундровые почвы			Почвы пятен	Болотные тор- фянисто-гле- евые почвы	Тундровые дерновые почвы
	гумусные глееватые	глеевые типичные	глеевые перегнойные			
Соотношение содержания гуминовых и фульвокислот, П _{ГФ} , долей ед.	1–0,5	1–0,5	1–0,5	2–1	1–0,5	1–0,5
Степень гумификации органического вещества, П _Г , % от С _С	20–30	0–10	0–10	30–40	0–10	20–30
Содержание негидролизуемого остатка, С _{НГ} , % от С _С	10–60	40–60	40–60	20–40	40–60	20–40
Коэффициент β, долей от С _С	1,08	0,62	0,62	0,88	0,62	0,88

реальным значениям величин содержания гумуса в органогенных и органоминеральных слоях тундровых почв. Для этой цели использованы основные показатели оценки гумусного состояния некоторых типов почв Таймыра (табл. 4) [8].

Определено, что для тундровых почв Таймыра соотношение (β) величин углерода гумуса ($C_{СГ}$) и общего органического углерода ($C_{С}$) изменяется от 1 до 0,6 (см. табл. 4). Средняя величина β равна 0,78. В этом случае наибольшее содержание гумуса в слое 0–20 см тундровых почв ($C_{Г\max}$) рассчитывается по формуле (23) при значениях коэффициентов $k_{П} = 1,724$, $\beta = 0,78$. Необходимое для расчета значение содержания $C_{С\max}$ определяется по уравнению регрессии (16а) при $C_{П} = 100$ %. Вычислено, что усредненная расчетная величина $C_{Г\max}$ для тундровых почв Таймыра равна 52,7 %. Расчетное определение значений β , $C_{Г\max}$ для других почв тундр проводится аналогичным способом.

Содержание гумуса ($C_{Г}$) в поверхностном слое (0–20 см) почв тундр в значительной степени определяет содержание общего азота (C_{N}). Аналитически взаимосвязи C_{N} и $C_{Г}$ описаны уравнениями (14а) и (14б). Для органогенных горизонтов, состоящих в основном из растительных остатков, для которых метод определения гумуса по Тюрину неприменим, количество общего азота (C_{N}) связано с величиной потери при прокаливании ($C_{П}$) следующим уравнением (см. рис. 2, д):

$$C_{N} = k_{NП} \cdot C_{П}^{0,8} \text{ при } 20 \leq C_{П} \leq 100 \%, \quad (24)$$

где $k_{NП}$ – эмпирический коэффициент, изменяющийся от 0,03 до 0,07 и в среднем равный 0,05.

Наличие взаимосвязей C_{N} с $C_{Г}$ (14а), C_{N} с $C_{П}$ (24) позволяет опосредованно выявить связь содержания гумуса ($C_{Г}$) и потери при прокаливании ($C_{П}$) в результате решения в более широком диапазоне изменения $C_{П}$ ($0 < C_{П} \leq 100$ %) следующего тождества уравнений (14а) и (24):

$$k_{N} C_{Г}^{0,8} = k_{NП} C_{П}^{0,8}. \quad (25)$$

Решение тождества показало, что связь между $C_{Г}$ и $C_{П}$ определяется по соотношению

$$C_{Г} = k_{ГП} C_{П}, \quad (26)$$

где $k_{ГП}$ – эмпирический коэффициент, величина которого изменяется от 0,6 до 0,8 и в среднем равна 0,7.

Полученное соотношение (26) является дополнительным подтверждением правомерности прямолинейной связи $C_{Г}$ и $C_{П}$ в уравнениях (17) и (18). Для оценки погрешности расчетного определения $C_{Г}$ по формулам (17), (18) и (26) в диапазоне $5 < C_{П} < 100$ % приведено сопоставление расчетных величин (табл. 5).

Формулы (18) и (26) по сравнению с эмпирическим уравнением (17) дают соответственно заниженные на 13 и завышенные на 32 % значения $C_{Г}$. Следовательно, для расчетного определения абсолютных значений $C_{Г}$ в диапазоне $5 \leq C_{П} \leq 100$ % целесообразно использовать уравнение (17), установленное по экспериментальным данным. Другие фор-

Расчетные значения содержания гумуса (C_T) в слое 0–20 см почв тундр

Расчетная формула	Величины C_T , % при разных значениях C_{II} , %							Ош, %
	5	10	20	40	60	80	100	
(17)	2,0	5,0	11,0	23,0	35,0	47,0	59,0	–
(18)	1,6	4,3	9,7	20,5	31,3	42,1	52,9	–13
(26)	3,5	7,0	14,0	28,0	42,0	56,0	70,0	+32

мулы могут быть применены в расчетах относительных изменений содержания гумуса (C_T) при техногенных воздействиях и активизации негативных склоновых процессов.

Для количественной оценки динамики подвижных элементов питания растений в почвах тундр выявлены взаимосвязи содержания подвижных форм фосфора C_F (P_2O_5) и калия C_K (K_2O). Математическая обработка данных показала, что между средневзвешенными значениями C_F и C_K в наиболее активном поверхностном слое (0–20 см) почв тундр отмечаются удовлетворительные взаимосвязи вида (см. рис. 2, е):

$$C_F = k_t \cdot C_K^{0,5} \text{ при } 1 < C_K \leq 18 \quad (27a)$$

$$\text{или } C_K = (C_F / k_t)^2 \text{ при } 0 < C_F \leq 8, \quad (27б)$$

где C_F , C_K – содержание в поверхностном слое 0–20 см подвижных форм соответственно фосфора и калия, мг/100 г почвы; k_t – эмпирический коэффициент, зависящий от погодных (тепловых) условий. По экспериментальным данным для холодного и теплого лета величина k_t соответственно равна 0,32 и 1,60.

Для расчетного определения количеств подвижного фосфора C_F , калия C_K и доступного аммиачного азота C_{AN} в слое 0–20 см, а также оценки их изменений в зависимости от погодных условий вегетационного периода введены следующие уравнения (рис. 3):

$$C_F = k_f / \sqrt{W}; \quad (28a)$$

$$C_K = k_k / \sqrt{W}; \quad (28б)$$

$$C_{AN} = 0,12 W^{0,8} \text{ при } 20 < W \leq 350 \%, \quad (28в)$$

где W – равновесная влажность почвы в слое 0–20 см; k_f и k_k – коэффициенты, равные соответственно 7 и 40 для холодного и 50 и 70 для теплого лета.

Равновесная влажность (W) поверхностного слоя почв тундр в момент вегетационного периода зависит от погодных условий и со-

держания органических остатков, которое оценивается величиной потери массы почвы при прокаливании (C_{II}). Значения величин W и диапазон их изменения приблизительно определяются по уравнению (см. рис. 2, ж):

$$W = k_W \cdot C_{II}, \quad (29)$$

где k_W – коэффициент, примерно равный 10 и 2 соответственно для влажного и сухого лета, наиболее часто k_W равен 5.

Величина потери при прокаливании (C_{II}) верхних органогенных и органоминеральных горизонтов почв тундр, характеризующая

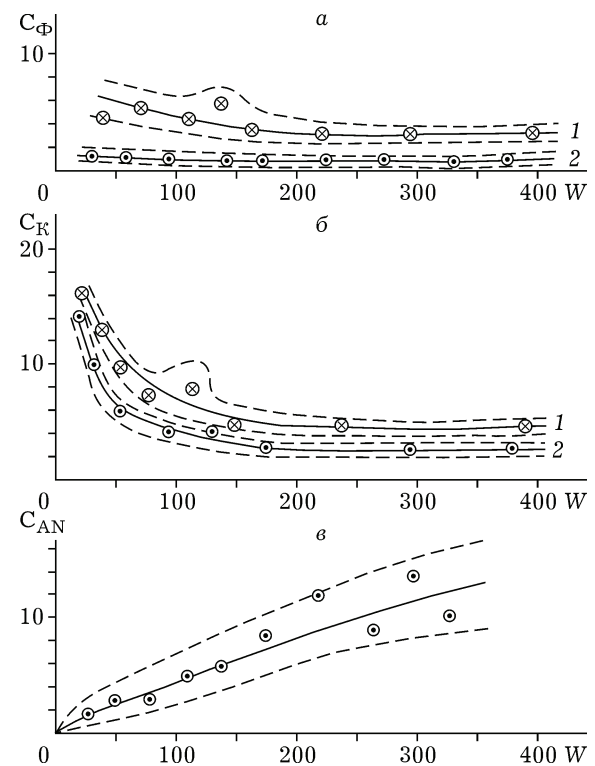


Рис. 3. Графики взаимосвязей подвижных форм (мг/100 г почвы): а – фосфора (C_F), б – калия (C_K), в – аммиачного азота (C_{AN}) и равновесной влажности (W , %) соответственно в теплое (1) и холодное (2) лето

количество органической составляющей, опосредованно связана с содержанием в них гигроскопической влажности (W_{Γ}). Действительно, гигроскопическая влажность верхних слоев тундровых почв зависит в основном от содержания в них органической составляющей и водоадсорбционной ее способности. Последняя оценивается величиной гигроскопической влажности ($W_{\Gamma_{\text{орг}}}$) органической составляющей почв. Связь величин C_{Π} , W_{Γ} , $W_{\Gamma_{\text{орг}}}$ описывается следующим уравнением (см. рис. 2, з):

$$C_{\Pi} = 100 \cdot W_{\Gamma}^2 / W_{\Gamma_{\text{орг}}}^2, \quad (30)$$

где W_{Γ} – гигроскопическая влажность слоя почвы 0–20 см, %; $W_{\Gamma_{\text{орг}}}$ – гигроскопическая влажность органической составляющей этого слоя, %.

Таким образом, введены и рекомендованы для практического применения уравнения значимых базовых закономерностей и взаимосвязей агрохимических свойств почв тундр.

Практическое применение результатов. Полученные зависимости позволяют расчетным путем количественно оценить динамику важных агрохимических свойств и агрохимических показателей экологической опасности техногенных воздействий при разных уровнях деградации, естественного или искусственного восстановления почвенного покрова тундр в зависимости от исходной степени их нарушенности и смене погодных (водных и тепловых) условий.

Оценку экологической опасности деградации в результате техногенных воздействий обычно проводят в двух аспектах: потери почвенно-растительного покрова тундр на нарушенных площадях как ресурса; деградации (эрозия, загрязнения и др.) ненарушенных площадей, прилегающих к нарушенным в пределах ландшафтов, при активизации негативных склоновых процессов. Потерю почвенно-растительного покрова тундр как ресурса оценивают относительным снижением его биопродуктивности при различных видах деградации ($\Delta B_{\text{н}}$):

$$\Delta B_{\text{н}} = (B'_{\text{н}} - B_{\text{н}}) / B'_{\text{н}} = 1 - B_{\text{н}} / B'_{\text{н}}, \quad (31)$$

где $B'_{\text{н}}$, $B_{\text{н}}$ – надземная биомасса соответственно до и после нарушения почвы, г/м².

Каждой степени деградации, установленной по уменьшению $B_{\text{н}}$, соответствует такая

же степень экологической опасности. Следовательно, для количественной оценки степени экологической опасности деградации примерно принять градации известной шкалы степени деградации почв [3, 4].

Ранее нами для почв тундр выявлены взаимосвязи показателей плодородия (содержания гумуса C_{Γ} , %) и биопродуктивности растительности (надземная живая биомасса $B_{\text{н}}$, г/м²) следующего вида [1–4]:

$$C_{\Gamma} = 0,3 B_{\text{н}}^{0,5} \quad \text{при } B_{\text{н}} \leq 1200 \text{ г/м}^2 \quad (32a)$$

$$\text{или } B_{\text{н}} = 11,1 C_{\Gamma}^2 \quad \text{при } C_{\Gamma} \leq 10 \%. \quad (32b)$$

Эти взаимосвязи позволяют по расчетным величинам содержания гумуса в слое 0–20 см до (C'_{Γ}) и после (C_{Γ}) нарушения почвы определить интегральный показатель экологической опасности деградации ($\Delta B_{\text{н}}$).

Взаимосвязи (14), (17), (18), (30) позволяют использовать в качестве показателей экологической опасности деградации почвенно-растительного покрова тундр наряду с изменениями биопродуктивности ($B_{\text{н}}$) и изменения содержания гумуса (C_{Γ}), количества общего азота (C_{N}), величины потери при прокаливании (C_{Π}) и гигроскопической влаги (W_{Γ}) в поверхностном слое (0–20 см) почв (табл. 6).

Эмпирические уравнения (1)–(11) распределения агрохимических свойств по профилю почв тундр позволяют после несложных вычислений определить абсолютные значения уровня кислотности, содержания подвижных форм фосфора и калия, общего азота и гумуса в поверхностном слое (0–20 см) ненарушенных почв, а также их изменение при срезке, перемешивании, частичном и полном уничтожении верхних слоев почв в результате техногенных воздействий и активизации негативных склоновых процессов (эрозии, быстрых сплывов, солифлюкции и др.).

Особенно важное практическое значение в этом отношении имеют уравнения (11a), (11б) распределения по профилю почв содержания гумуса (C_{Γ}), которые позволяют кроме определения изменений C_{Γ} при нарушениях почв оценить экологическую опасность деградации почвенного покрова и в целом почвенно-растительного покрова тундр.

Для этой цели общую площадь эпюры распределения гумуса по глубине h_x в преде-

Показатели экологической опасности деградации почвенно-растительного покрова тундр

Показатель	Экологическая опасность деградации и изменение показателя				
	отсутствует	слабая	средняя	сильная	очень сильная
$1 - B_n / B'_n$	$\leq 0,11$	0,12–0,25	0,26–0,50	0,51–0,75	$> 0,76$
$1 - C_\Gamma / C'_\Gamma$	$\leq 0,05$	0,06–0,14	0,15–0,29	0,30–0,50	$> 0,51$
$1 - C_N / C'_N$	$\leq 0,04$	0,05–0,11	0,12–0,24	0,25–0,43	$> 0,43$
$1 - C_{II} / C'_{II}$	$\leq 0,05$	0,06–0,14	0,15–0,29	0,30–0,50	$> 0,51$
$1 - W_\Gamma / W'_\Gamma$	$\leq 0,02$	0,03–0,07	0,08–0,16	0,17–0,29	$> 0,30$

лах $0 < h_x < h_{x2}$ можно детально представить как сумму площадей S_1 , S_2 и S_3 (см. рис. 1, е). Тогда средневзвешенное значение содержания гумуса (C_Γ) в поверхностном слое почвы (H_0), равном 20 см, и величины S_1 , S_2 и S_3 определяются по следующим формулам [4]:

$$C_\Gamma = (S_1 + S_2 + S_3)/h_{x2}, S_1 = C_{\Gamma x0}h_{x1},$$

$$S_2 = C_{\Gamma 0}(h_{x2} - h_{x1}),$$

$$S_3 = 0,25H_0 (C'_\Gamma - C_{\Gamma 0}) \ln (h_{x2}/h_{x1}), \quad (33)$$

где C_Γ , C'_Γ – содержание гумуса в слое 0–20 см соответственно в нарушенной и ненарушенной почве, %; $C_{\Gamma x0}$, $C_{\Gamma 0}$ – содержание гумуса соответственно в поверхностном слое h_{x0} и в материнской породе, %; \ln – натуральный логарифм; h_{x1} , h_{x2} – координаты глубин, см.

Расчеты S_1 , S_2 , S_3 и C_Γ при перемешивании и срезке верхних слоев почвогрунтов проводятся при разных значениях координат глубин h_{x1} и h_{x2} . В первом случае их величины определяются при $h_{x1} = h_{x0}$ и h_{x2} , равной глубине перемешивания h_n . Во втором случае при глубине срезки (h_c) меньше h_{x0} величина S_1 рассчитывается при $h_{x1} = h_{x0} - h_c$, S_2 – при $h_{x1} = h_c$ и $h_{x2} = H_0 + h_c$, S_3 – при $h_{x1} = h_{x0}$ и $h_{x2} = H_0 + h_c$ при глубине срезки $h_c \geq h_{x0}$ $S_1 = 0$, а величины S_2 и S_3 рассчитываются при $h_{x1} = h_c$ и $h_{x2} = H_0 + h_c$. Значения C_Γ при перемешивании и срезке находятся соответственно при $h_{x2} = h_n$ и $h_{x2} = H_0$.

При отсутствии или методических трудностях непосредственных экспериментальных определений гумуса ($C_{\Gamma x0}$) в поверхностном слое (h_{x0}) величины $C_{\Gamma x0}$ и h_{x0} можно приближенно установить расчетным путем. Для известных значений C'_Γ и $C_{\Gamma 0}$ и заданных разных значений h_{x0} по уравнениям (33) при

$h_{x1} = h_{x0}$ и $h_{x2} = H_0 = 20$ см рассчитываются величины $C_{\Gamma x0}$ и C_Γ и из них выбираются те h_{x0} и $C_{\Gamma x0}$, при которых расчетное значение C_Γ близко к экспериментальной величине C'_Γ .

Взаимосвязь (32) содержания гумуса (C_Γ) в слое 0–20 см и величины надземной биомассы (B_n) позволяет уравнения (33) использовать для оценки и прогноза степени экологической опасности деградации почвенно-растительного покрова при различных механических нарушениях верхних слоев почвы. Можно оценить и прогнозировать влияние следующих вариантов нарушений: перемешивание, срезка, срезка и перемешивание, перемешивание и срезка. С этой целью расчетные значения C_Γ по (33) сопоставляются с величинами C'_Γ в ненарушенных почвах и оценивается степень снижения содержания гумуса в слое 0–20 см, а по (32) определяется уровень деградации (B_n / B'_n). Для заданных уровней деградации (B_n / B'_n) и известных C'_Γ и $C_{\Gamma 0}$ методом последовательных приближений устанавливаются соответствующие критические значения глубины перемешивания (h_n) или мощности (толщины) слоя (h_c), удаленного с поверхности почвы.

Эмпирические зависимости, использованные для определения критических показателей некоторых видов физической деградации, применимы также для оценки специфического вида деградации – погребения тундровых почв абиотическими наносами. Этот вид деградации часто наблюдается при аккумуляции на поверхности ненарушенных и нарушенных почв продуктов водной и ветровой эрозии нарушенных песчаных почвогрунтов и песчаных грунтов отсыпных сооружений. В этом случае при расчетах содержания гумуса (C_Γ) по формулам (9) – (11) или (33)

дополнительно учитывается толщина слоя наноса (h_n) и содержания в этом слое гумуса ($C_{Гн}$).

В первом приближении влияние этого вида деградации можно также оценить по уравнению (32) взаимосвязи содержания гумуса и надземной биомассы. При условии равномерного распределения гумуса в слое 0–20 см и увеличении толщины абиотического слоя наносов это уравнение принимает следующий вид [4]:

$$\begin{aligned} B_n/B'_n &= [h_n(C_{Гн}/C'_Г - 1)/H_0 + 1]^2 \text{ или} \\ \text{при } C_{Гн} \approx 0 \quad B_n/B'_n &= (1 - h_n/H_0)^2, \end{aligned} \quad (34)$$

где B_n , B'_n – соответственно надземная биомасса после и до погребения почвы; h_n – мощность абиотического слоя наносов, см; H_0 – верхний слой исходного почвогрунта, равный 20 см; $C_{Гн}$, $C'_Г$ – содержание гумуса соответственно в слое h_n и H_0 , %.

Эти уравнения позволяют для заданных критических значений B_n/B'_n установить соответствующие им критические величины мощности абиотического слоя наносов (h_n):

$$\begin{aligned} h_n &= H_0 C'_Г [1 - (B_n/B'_n)^{0,5}] / (C'_Г - C_{Гн}) \text{ или} \\ \text{при } C_{Гн} \approx 0 \quad h_n &= H_0 \cdot [1 - (B_n/B'_n)^{0,5}]. \end{aligned} \quad (35)$$

Критические значения мощности (толщины) абиотического наноса (h_n), перемешивания (h_c) и срезки (h_s), установленные по изменению основной агрохимической характеристики (содержания гумуса в слое 0–20 см) почв тундр, являются дополнительными показателями экологической опасности деградации почвенно-растительного покрова тундр (табл. 7).

Эти показатели могут быть использованы для приближенной оценки и прогноза экологической опасности при разных механических нарушениях почвенно-растительного покрова тундр. Более точные расчетные значения устанавливаются по формулам.

Соотношение (13) количества гумуса ($C_Г$) и органического углерода (C_C) и уравнения (14а), (14б) взаимосвязей содержания гумуса ($C_Г$) и органического азота (C_N) в поверхностном слое (0–20 см) позволяют установить важные агрохимические характеристики почв тундр, равные соотношению величин содержания органических форм углерода (C_C) и азота (C_N):

$$C_C/C_N = 9,21 C_Г^{0,2} \text{ при } 0,3 \leq C_Г < 15 \% \quad (36a)$$

$$\begin{aligned} \text{или } C_C/C_N &= 18,35 C_N^{0,25} \\ \text{при } 0,03 \leq C_Г < 0,6 \%. \end{aligned} \quad (36b)$$

Расчеты показали, что величины соотношений C_C/C_N для слоя 0–20 см почв тундр изменяются от 7 до 16. Различия соотношений C_C/C_N в поверхностном слое 0–20 см связаны с разным содержанием и типом (соотношения гуминовых и фульвокислот, $C_{ГК}/C_{ФК}$) гумуса, степенью гумификации ($C_{ГК}/C_C$) и отличиям других характеристик гумусного состояния генетических горизонтов в пределах слоя 0–20 см почв тундр. Полученные соотношения C_C/C_N близки к отношениям углерода к азоту в препаратах гуминовых и фульвокислот почв Таймыра, равным 10–16, причем фульвокислоты содержат относительно больше азота, чем гуминовые кислоты [8]. Очевидно, в агрохимическом отношении легкоподвижные фульвокислоты в почвах тундр служат основным источником азотного питания для микроорганизмов и первым резервом доступного азота для высших растений.

Другой важной агрохимической характеристикой почв тундр является соотношение содержания подвижных форм фосфора ($C_Ф$) и калия ($C_К$) в поверхностном слое (0–20 см). Согласно уравнениям (14а), (14б) взаимосвязей $C_Ф$ и $C_К$ эти соотношения рассчитывают по формулам:

Т а б л и ц а 7

Дополнительные показатели экологической опасности деградации почвенно-растительного покрова тундр

Показатель	Экологическая опасность деградации и изменение показателя				
	отсутствует	слабая	средняя	сильная	очень сильная
$1 - C_Г/C'_Г$	≤0,05	0,06–0,14	0,15–0,29	0,30–0,50	> 0,5
Мощность абиотического наноса, см	≤1	1–3	3–6	6–10	> 11
Глубина перемешивания, см	<20	21–23	24–29	30–45	> 45
Мощность срезки, см	<0,3	0,31–0,70	0,71–1,20	1,21–3,20	> 3,20

$$C_{\Phi}/C_K = k_t/C_K^{0,5} \quad (37a)$$

или $C_{\Phi}/C_K = k_i^2/C_{\Phi} \quad (37б)$

Эмпирический коэффициент k_t зависит от тепловых условий вегетационного периода. Для теплого и холодного периодов k_t соответственно равен 1,60 и 0,32.

Величины отношений C_{Φ}/C_K для тундровых почв при количестве в них калия (C_K) от 3,5 до 16,5 и фосфора (C_{Φ}) от 1,8 до 7,0 в теплый период и при содержании C_K от 1,2 до 15,0 и C_{Φ} от 0,4 до 1,5 мг/100 г почвы в холодный период соответственно изменяются в теплый период от 0,8 до 0,4; в холодный – от 0,3 до 0,1.

Обнаруженные соотношения C_C/C_N и C_{Φ}/C_K , очевидно, могут служить показателями устойчивого или неустойчивого равновесного экологического состояния ненарушенных или нарушенных почв тундр. Наиболее важен учет этих показателей при нарушении равновесных состояний почв тундр в результате химического загрязнения, например при поступлении из воздуха на поверхность почв производных оксидов азота, образующихся при сгорании газа в районах газовых месторождений, или при внесении минеральных и органических удобрений для биологической рекультивации нарушенных почвогрунтов тундр [4].

Необходимые для расчетного определения этих показателей величины C_T или C_N , C_{Φ} или C_K определяются экспериментально общеизвестными методами или расчетным способом [4, 6, 7]. Для расчетного их определения используются уравнения (27), (28) общих для почв тундр закономерностей изменений и взаимосвязей агрохимических и других почвенных свойств.

Таким образом, эмпирические уравнения (1)–(37) составили содержательную часть методики расчетного определения агрохимических свойств ненарушенных и нарушенных почв тундр, агрохимических показателей устойчивости равновесного их состояния и агрохимических показателей степени экологической опасности деградации при различных техногенных воздействиях на почвенный покров и почвенно-растительный покров в целом.

Определение исходных данных. Исходными данными для расчетов являются экспериментально определенные значения содержа-

ния гумуса (C_T) или расчетные их величины по эмпирическим зависимостям C_T от величин потери почвы при прокаливании (C_{II}), гигроскопической влажности (W_T) верхних слоев почвы и органической их составляющей ($W_{T\text{орг}}$), а также заданная качественная оценка сочетаний погодных (водных и тепловых) условий в вегетационный сезон: холодный – влажный; холодный – сухой; теплый – влажный; теплый – сухой; средне (теплый – влажный). Показатели качественной оценки “холодный”, “теплый” и “сухой”, “влажный” соответствуют погодным условиям при средних минимальных и средних максимальных величинах соответственно температуры воздуха и количества осадков в июле. Показатель средне “теплый – влажный” соответствует среднегодовым значениям температуры воздуха и количества осадков в июле. Величины температур и осадков приводятся по данным ближайших метеорологических станций.

Традиционные методы определения потери почвы при прокаливании (C_{II}) и гигроскопической влажности (W_T) нуждаются в некоторых пояснениях. Определение C_{II} и W_T проводят в навесках почвы, из которой удалены живые и негумифицированные растительные остатки [7, 14]. Трудность отделения последних приводит часто, особенно для органо-генных горизонтов почв тундр, к большим погрешностям в определении для них величин C_{II} и W_T . На данном этапе для повышения надежности расчетных определений целесообразно определять экспериментально гигроскопическую влажность органической составляющей почвы ($W_{T\text{орг}}$) или рассчитывать ее величину по эмпирическим уравнениям вида

$$W_T = k_{ТВ} C_{II} + W_{ТМ}, \quad (38)$$

где W_T – гигроскопическая влажность почвы при разной величине потери при прокаливании (C_{II} , %), %; $k_{ТВ}$ – эмпирический коэффициент; $W_{ТМ}$ – гигроскопическая влажность минеральной части почвы при $C_{II} \approx 0$, %.

Например, для легкосуглинистых почв Центрального Ямала по усредненным данным вычислены следующие значения параметров: $k_{ТВ} = 0,12$, $W_{ТМ} = 1,4$ % (рис. 4). В данном случае величина $W_{T\text{орг}}$ при $C_{II} \approx 100$ % равна 13,4 %.

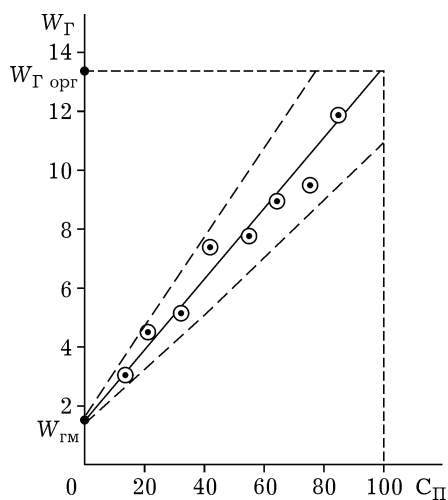


Рис. 4. Зависимость гигроскопической влажности ($W_{Г}$, %) поверхностного слоя (0–20 см) почв тундр от потери при прокаливании (C_{II} , %)

Основные результаты применения расчетного метода. Основные результаты расчетов агрохимических свойств почв тундр при разных сочетаниях погодных условий представлены в табл. 8. Сопоставление полученных расчетных и экспериментальных данных показало их удовлетворительное соответствие (табл. 9). Порядок расчетных и экспериментальных величин агрохимических характеристик верхнего слоя почв (0–20 см), а также диапазон их изменений практически полностью совпадают.

Ввиду отсутствия экспериментальных определений содержания гумуса ($C_{Г}$) при больших значениях потери при прокаливании (C_{II}) в расчетах допускается экстраполяция зависимости (17) за пределы диапазона имеющихся экспериментальных данных, на основе которой она получена.

Единственным подтверждением правомерности применения экстраполяции уравнения (17) могут служить установленная расчетным путем прямолинейная зависимость (26) содержания гумуса ($C_{Г}$) от величины потери при прокаливании (C_{II}) и соответствие диапазонов расчетных значений агрохимических свойств и их экспериментальных величин (см. табл. 9).

Агрохимические показатели устойчивости равновесного экологического состояния почвенного покрова тундр, равные отношениям $C_{С}/C_{N}$ и $C_{Ф}/C_{R}$, определяются по табл. 8. Расчетные величины $C_{С}/C_{N}$ изменяются в

диапазоне (7 ÷ 18), близком к диапазону экспериментально установленных их значений (7 ÷ 16). Расчетная величина показателя $C_{Ф}/C_{R}$ зависит от погодных условий и изменяется для граничных погодных условий от 0,1 до 0,4 для холодного–влажного и от 0,2 до 0,7 для тепло–сухого вегетационных сезонов. Экспериментальные значения этого показателя для холодного и тепло периода вегетации соответственно изменяются от 0,1 до 0,3 и от 0,4 до 0,8.

Агрохимические показатели степени экологической опасности деградации почвенного покрова после разных техногенных воздействий определяются по изменению содержания гумуса ($C_{Г}$) или содержания органического азота (C_{N}) в поверхностном слое почвы (0–20 см). При известных значениях $W_{Г}/W_{Горг}$ или величинах потери при прокаливании (C_{II}) для ненарушенных и нарушенных почв по табл. 8 устанавливаются изменения содержания $C_{Г}$ или C_{N} . Далее по уравнениям (14), (31), (32) рассчитываются показатели экологической опасности деградации и по шкале (см. табл. 6) определяются степени ее проявления.

Более точные значения агрохимических свойств и агрохимических показателей экологической опасности определяются непосредственно по расчетным формулам. Для наглядной иллюстрации последовательности расчетных определений приведен пример расчета.

Пример

Определить агрохимические свойства слоя (0–20 см) ненарушенной и нарушенной тундровой почвы и степень экологической опасности ее деградации при заданном сочетании погодных условий в вегетационный период.

Исходные данные.

1. Гигроскопическая влажность слоя (0–20 см) ненарушенной ($W'_{Г}$) и нарушенной ($W_{Г}$) почвы соответственно равна 5 и 2,5 %.

2. Гигроскопическая влажность ($W_{Горг}$) органической составляющей почвы равна 12 %.

3. Сочетание погодных условий вегетационного периода: теплый – влажный.

Расчет

1. Потеря при прокаливании ненарушенной (C'_{II}) и нарушенной (C_{II}) определяется по формуле (30):

$$C'_{II} = 100 \cdot W_{Г}^2 / W_{Горг}^2 = 100 \cdot 5,0^2 / 12^2 = 17,4 \%;$$

$$C_{II} = 100 \cdot W_{Г}^2 / W_{Горг}^2 = 100 \cdot 2,5^2 / 12^2 = 4,3 \%.$$

Расчетные значения агрохимических характеристик почвенного покрова тундр

Соотношение $\left(\frac{W_T}{W_{T_{орг}}}\right)$, доля ед.	Потеря при прокалива- нии (С _П)	Гумус (С _Г)	Азот общий (С _Н)	Равновесная влажность (W, %) и содержание подвижных (доступных) форм калия, фосфора, аммиачного азота (мг/100 г почвы) при разных погодных условиях											
				Холодный - влажный			Умеренно (теплый - влажный)			Теплый - сухой					
				W	С _К	С _Ф	С _{АН}	W	С _К	С _Ф	С _{АН}	W	С _К	С _Ф	С _{АН}
0,2	4,0	1,4	0,11	40,0	9,0	1,0	2,3	20,0	28,3	4,9	1,3	8,0	73,5	13,0	0,6
0,3	9,0	4,4	0,24	90,0	4,4	0,7	4,4	45,0	13,6	3,5	2,5	18,0	35,4	9,1	1,2
0,4	16,0	8,6	0,40	160,0	2,6	0,5	7,0	80,0	8,6	2,8	4,0	32,0	20,3	7,0	1,9
0,5	25,0	14,0	0,59	250,0	2,0	0,4	9,9	125,0	5,8	2,3	5,7	50,0	19,0	6,1	2,7
0,6	36,0	20,6*	0,79	360,0	2,0	0,4	13,3	180,0	4,4	2,0	7,6	72,0	11,0	5,2	3,7
0,7	49,0	28,4*	1,02	490,0	1,3	0,3	17,0	245,0	3,5	1,8	9,0	98,0	8,2	4,6	4,7
0,8	64,0	37,4*	1,27	640,0	1,3	0,3	21,1	320,0	3,0	1,6	12,1	128,0	7,0	4,2	5,8
0,9	81,0	47,6*	1,53	810,0	0,5	0,2	25,5	405,0	2,4	1,5	14,6	162,0	5,7	3,9	7,0

Соотношение $\left(\frac{W_T}{W_{T_{орг}}}\right)$, доля ед.	Потеря при прокалива- нии (С _П)	Гумус (С _Г)	Азот общий (С _Н)	Равновесная влажность (W, %) и содержание подвижных (доступных) форм калия, фосфора, аммиачного азота (мг/100 г почвы) при разных погодных условиях							
				Холодный - сухой			Теплый - влажный				
				W	С _К	С _Ф	С _{АН}	W	С _К	С _Ф	С _{АН}
0,2	4,0	1,4	0,11	8,0	37,0	1,8	0,6	40,0	17,8	6,6	2,3
0,3	9,0	4,4	0,24	18,0	16,0	1,3	1,2	90,0	9,2	4,8	4,4
0,4	16,0	8,6	0,40	32,0	10,5	1,0	1,9	160,0	5,7	3,9	7,0
0,5	25,0	14,0	0,59	50,0	8,0	0,9	2,7	250,0	4,2	3,3	9,9
0,6	36,0	20,6*	0,79	72,0	5,4	0,7	3,7	360,0	3,1	2,9	13,3
0,7	49,0	28,4*	1,02	98,0	4,4	0,6	4,7	490,0	2,6	2,6	17,0
0,8	64,0	37,4*	1,27	128,0	3,5	0,6	5,8	640,0	2,2	2,4	21,1
0,9	81,0	47,6*	1,53	162,0	3,3	0,6	7,0	810,0	2,0	2,2	25,5

* Рассчитаны по экстраполяции формулы (17).

Диапазон изменений расчетных (числитель) и экспериментальных (знаменатель) значений агрохимических свойств почв тундр

Потеря при прокаливании (C_{II}), %	Азот общий (C_N), %	Подвижные (доступные) формы, мг/100 г почвы		
		C_K	C_{Φ}	C_{AN}
$\frac{4-81}{3,5-97}$	$\frac{0,11-1,5}{0,08-2,0}$	$\frac{0,5-73,5}{1,2-115,0}$	$\frac{0,2-13,0}{0,3-17,0}$	$\frac{0,6-25,5}{0,7-28,0}$

2. Содержание гумуса (Γ) в слое (0–20 см) почвы до (C'_Γ) и после (C_Γ) ее нарушения рассчитывается по формуле (17):

$$C'_\Gamma = 0,6 \cdot C_{II} - 1,0 = 0,6 \cdot 17,4 - 1 = 9,4 \text{ \%};$$

$$C_\Gamma = 0,6 \cdot C_{II} - 1,0 = 0,6 \cdot 4,3 - 1 = 1,6 \text{ \%}.$$

3. Содержание общего азота в слое (0–20 см) ненарушенной (C'_N) и нарушенной (C_N) почвы при $C_{II} < 20 \text{ \%}$ находится по формуле (14а):

$$C'_N = k_N \cdot C_\Gamma^{0,8} = 0,063 \cdot 9,4^{0,8} = 0,39 \text{ \%};$$

$$C_N = k_N \cdot C_\Gamma^{0,8} = 0,063 \cdot 1,6^{0,8} = 0,09 \text{ \%}.$$

4. Равновесная влажность слоя (0–20 см) ненарушенной (W') и нарушенной (W) почвы определяется по соотношению (29) при k_W для влажного лета, равном 10:

$$W' = k_W \cdot C_{II} = 10 \cdot 17,4 = 174 \text{ \%};$$

$$W = k_W \cdot C_{II} = 10 \cdot 4,3 = 43 \text{ \%}.$$

5. Количество подвижных форм фосфора, калия и аммиачного азота в слое (0–20 см) ненарушенной (C'_Φ, C'_K, C'_{AN}) и нарушенной (C_Φ, C_K, C_{AN}) почвы рассчитываются по формулам (28а)–(28г) при значениях коэффициентов k_Φ и k_K для теплого лета, равных 50 и 70 соответственно:

$$C'_\Phi = k_\Phi \sqrt{W'} = 50 / \sqrt{174} = 3,8;$$

$$C_\Phi = k_\Phi / \sqrt{W} = 50 / \sqrt{43} = 7,6 \text{ мг/100 г почвы},$$

$$C'_K = k_K \sqrt{W'} = 70 / \sqrt{174} = 5,3;$$

$$C_K = k_K / \sqrt{W} = 70 / \sqrt{43} = 10,7 \text{ мг/100 г почвы},$$

$$C'_{AN} = 0,12W'^{0,8} = 0,12 \cdot 174^{0,8} = 7,4;$$

$$C_{AN} = 0,12W^{0,8} = 0,12 \cdot 43^{0,8} = 2,6 \text{ мг/100 г почвы}.$$

6. Для повышения надежности расчетных определений содержания C_Φ и C_K по формулам (27а), (27б) при значении коэффициента

k_t для теплого лета, равном 1,60, проводится их корректировка:

$$C'_\Phi = k_t C_\Phi^{0,5} = 1,60 \cdot 7,6^{0,5} = 3,7;$$

$$C_\Phi = k_t C'_\Phi^{0,5} = 1,60 \cdot 3,7^{0,5} = 5,2 \text{ мг/100 г почвы},$$

$$C'_K = (C'_\Phi / k_t)^2 = (3,7/1,60)^2 = 5,6;$$

$$C_K = (C_\Phi / k_t)^2 = (5,2/1,60)^2 = 22,6 \text{ мг/100 г почвы}.$$

7. Находятся средние значения величин C'_Φ, C_Φ и C'_K, C_K , рассчитанные в п. 5, 6:

$$C'_\Phi = (3,8 + 3,7)/2 = 3,7;$$

$$C_\Phi = (7,6 + 5,2)/2 = 6,4 \text{ мг/100 г почвы},$$

$$C'_K = (5,3 + 5,6)/2 = 5,5;$$

$$C_K = (10,7 + 22,6)/2 = 16,6 \text{ мг/100 г почвы}.$$

8. Равновесные величины отношений содержания органического углерода (C_C) и азота (C_N) для ненарушенной и нарушенной почвы определяются по уравнению (36а) или (36б):

$$C'_C / C'_N = 9,21 C_\Gamma^{0,2} = 9,21 \cdot 9,4^{0,2} = 14,4;$$

$$C_C / C_N = 9,21 C_\Gamma^{0,2} = 9,21 \cdot 1,6^{0,2} = 10,1$$

или

$$C'_C / C'_N = 18,35 \cdot C_N^{0,25} = 18,35 \cdot 0,39^{0,25} = 14,5;$$

$$C_C / C_N = 18,35 C_N^{0,25} = 18,35 \cdot 0,09^{0,25} = 10,0.$$

9. Равновесные значения отношений подвижных форм фосфора (C_Φ) и калия (C_K) для ненарушенной и нарушенной почвы находятся по формуле (37а) или (37б):

$$C'_\Phi / C'_K = k_t / C_K^{0,5} = 1,60 / 5,5^{0,5} = 0,68;$$

$$C_\Phi / C_K = k_t / C_K^{0,5} = 1,60 / 16,6^{0,5} = 0,40$$

или

$$C'_\Phi / C'_K = k_t^2 / C'_\Phi = 1,60^2 / 3,7 = 0,69;$$

$$C_\Phi / C_K = k_t^2 / C_\Phi = 1,60^2 / 6,4 = 0,40.$$

10. Расчетные величины надземной (живой) биомассы до (B'_H) и после (B_H) нарушений почвы определяются по формуле (32б):

$$B'_H = 11,1 \cdot C_T^2 = 11,1 \cdot 9,4^2 = 980,7 \text{ г/м}^2;$$

$$B_H = 11,1 \cdot C_T^2 = 11,1 \cdot 1,6^2 = 28,4 \text{ г/м}^2.$$

11. Интегральный показатель степени экологической опасности деградации (ΔB_H) определяется по соотношению (31):

$$\Delta B_H = 1 - B_H / B'_H = 1 - 28,4 / 980,7 = 0,97.$$

12. Степень деградации тундровой почвы оценивается по шкале (см. табл. 6). Величине $\Delta B_H = 0,97$ для нарушенной тундровой почвы соответствует “очень сильная” степень деградации и экологической опасности.

Значительное уменьшение надземной биомассы после нарушения данной тундровой почвы, несмотря на увеличение содержания подвижных форм фосфора и калия, обусловлено снижением содержания гумуса, приводящим к изменениям водных (количества доступной влаги) и тепловых (температуры почвы) условий, а также уменьшением содержания дефицитного для тундровых почв подвижного азота.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенная методика предлагается для приближенной расчетной оценки агрохимических свойств и агрохимических показателей экологической опасности деградации почв тундр по экспериментальным или расчетным определениям в слое 0–20 см содержания гумуса, общего азота, потери при прокаливании, гигроскопической влажности почвы и органической ее составляющей, а также с учетом погодных (водных и тепловых) условий. Методика, очевидно, применима для оценки степени динамики деградации и естественного или искусственного восстановления почвенно-растительного покрова тундр. Дальнейшие исследования водно-физических (водных констант, запасов влаги) и агрохимических свойств почв тундр, а также количественных показателей погодных условий (температуры воздуха и почвы, количества осадков) в вегетационный сезон позволят значительно повысить точность расчетного определения агрохимических характеристик почв тундр по рекомендуемой методике и расширить область практического ее применения вплоть до разработ-

ки приемов биологической рекультивации нарушенных почв тундр.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильевская В. Д., Григорьев В. Я. Эрозионные процессы Центрального Ямала // Эрозионные процессы Центрального Ямала. СПб., 1999. С. 54–89.
2. Васильевская В. Д., Григорьев В. Я. Биологические показатели деградации и самовосстановления почвенно-растительного покрова тундр // Сиб. экол. журн. 2002. № 3. С. 355–370.
3. Васильевская В. Д., Григорьев В. Я. Показатели устойчивости, деградации и самовосстановления почвенного покрова тундр // Криосфера Земли. 2004. Т. VIII, № 1. С. 53–63.
4. Васильевская В. Д., Григорьев В. Я., Погожева Е. А. Взаимосвязи характеристик почвенно-растительного покрова тундр как основа показателей его устойчивости, деградации и восстановления // Почвоведение. 2006. № 3. С. 352–362.
5. Поспелова Е. Б., Орлов М. В. Взаимосвязь морфологии и химии почв с фитомассой растительных сообществ в некоторых типах тундр Восточного Таймыра // Труды Государственного биосферного заповедника “Таймырский”. Красноярск. 2002. Вып. 2. С. 67–85.
6. Васильевская В. Д., Григорьев В. Я., Погожева Е. А. Экспертная оценка агрохимических свойств и степени деградации почв тундр // Материалы Международной научно-практической конференции “Интенсификация, ресурсосбережение и охрана почв в адаптивно-ландшафтных системах земледелия” ГНУ ВНИИС и ЗПЭ. 10–12 сентября 2008 г. Курск, 2008. С. 471–476.
7. Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 487 с.
8. Васильевская В. Д. Почвообразование в тундрах Средней Сибири. М.: Наука, 1980. 234 с.
9. Васильевская В. Д., Иванов В. В., Богатырев Л. Г. Почвы севера Западной Сибири. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 227 с.
10. Игнатенко И. В. Почвы восточно-европейской тундры и лесотундры. М.: Наука, 1979. 280 с.
11. Goldin A. Reassessing the use of loss-on-ignition for estimating organic matter content in noncalcareous soil // Commun. “Soil Sci. and Plant Anal.” 1987. Vol. 18, N 10. P. 1111–1116.
12. Богатырев Л. Г., Сапожникова В. А., Фомина Т. В., Захаров К. К. Трансформация органического вещества в почвах сосняков Присурского лесного массива на двучленных отложениях // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 1998. № 1. С. 3–12.

13. Сапожникова В. А. Особенности трансформации органического вещества в почвах сосновых биогеоценозов при различных экологических условиях: автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2000. 32 с.
14. Вадюнина А. Ф., Корчагина З. А. Методы исследования физических свойств почв и грунтов. М.: Высш. шк., 1973. 399 с.
15. Дмитриев Е. А. Математическая статистика в почвоведении. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1972. 320 с.

Procedure of the Calculation of Chemical Indicators of the Ecological Danger of Tundra Soil Degradation and Its Validation

V. D. VASIL'EVSKAYA, V. Ya. GRIGORIEV, E. Yu. POGOZHEV, E. A. POGOZHEVA

*M. V. Lomonosov Moscow State University
119992, Moscow, Vorobyevy Gory
E-mail: pogozhevae@rambler.ru*

On the basis of a brief review and detailed analysis of the results of investigations of the chemical and other characteristics of soil in the tundra zone of Russia, a procedure is developed for the calculative determination of important agrochemical properties of natural and disturbed soil cover in tundra, in order to make quantitative evaluations of the ecological danger of its degradation. The initial data for calculations are the values of humus content in soil layer 0–20 cm, established experimentally or calculated on the basis of correlations with soil annealing losses, hygroscopic humidity of the upper soil layer and its organic component, and also the qualitative characterization of wetting and thermal conditions during the vegetation period. To illustrate the sequence and relevance of calculative determinations, an example of calculation and application results are presented.

Key words: procedure, agrochemical indicators, soil degradation, tundra.