



УДК 631.4

Н.Л. Кураченко, С.В. Александрова

ПОДВИЖНЫЕ ГУМУСОВЫЕ ВЕЩЕСТВА В ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ АГРЕГАТНОГО УРОВНЯ СТРУКТУРНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ЧЕРНОЗЕМОВ

В статье представлены материалы, характеризующие участие подвижных гумусовых веществ в пространственной изменчивости структурно-агрегатного состава освоенных черноземов. Показано, что в однородных условиях почвообразования связь в системе «гумусовые вещества – почвенная структура» носит нелинейный характер.

Ключевые слова: почва, гумусовые вещества, структурный состав, агрегатный состав.

N.L. Kurachenko, S.V. Alexandrova

MOBILE HUMIC SUBSTANCES IN THE SPATIAL VARIABILITY OF THE CHERNOZEM STRUCTURAL ORGANIZATION AGGREGATE LEVEL

The data that characterize the mobile humic substance participation in the spatial variability of the cultivated chernozem structural and aggregate composition are given in the article. It is shown that link in the "humic substances – soil structure" system is not linear in the similar soil formation conditions.

Key words: soil, humic substances, structural composition, aggregate composition.

Согласно концепции иерархии уровней структурной организации почв [3, 7, 13] выделяют несколько уровней: молекулярно-ионный, элементарных почвенных частиц, агрегатный, горизонтный и почвенного индивидуума. Все структурные уровни организации почвы находятся в постоянном развитии и в тесной генетической связи как между собой, так и с факторами почвообразования.

Агрегатный уровень возникает в результате взаимодействия элементарных почвенных частиц между собой в процессе почвообразования. При этом образуются специфические для каждого типа почвообразования агрегаты. В их формировании принимают участие различные компоненты, составляющие органическое вещество почвы: органические соединения неспецифической природы и собственно гумусовые вещества [2, 9, 10, 16]. В последнее время все чаще высказывается мнение о том, что образование почвенных агрегатов происходит главным образом под влиянием гумусовых веществ, формирующихся в процессе гумификации свежего органического вещества. Однако участие таких соединений в образовании агрономически ценной и водопрочной структуры еще недостаточно изучено и оценивается неоднозначно.

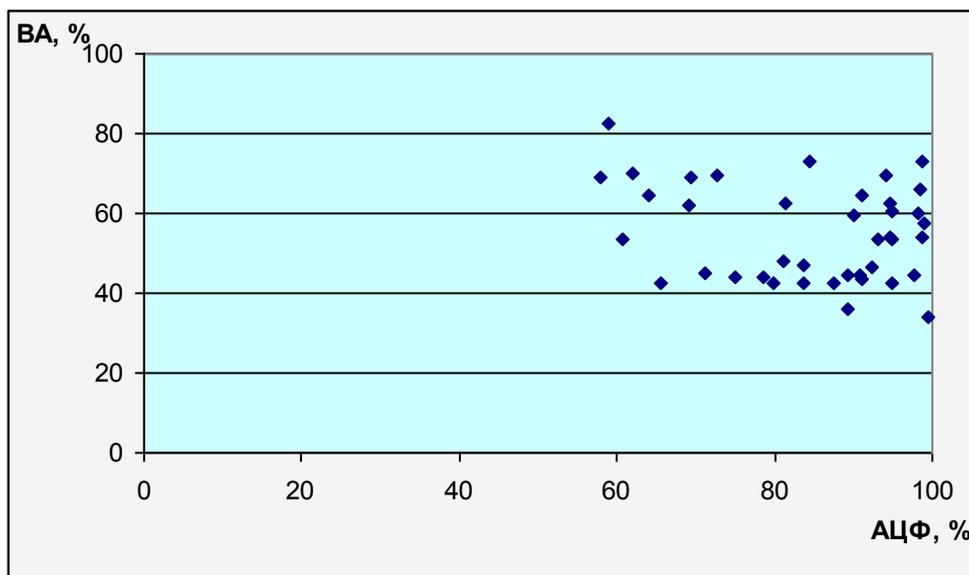
Цель исследований. Определить участие гумуса и его подвижных соединений в пространственной изменчивости агрегатного уровня структурной организации чернозема выщелоченного.

Объекты и методы исследований. Исследования проведены в Красноярской лесостепи на черноземе выщелоченном мощном легкоглинистого гранулометрического состава. Изучаемый элементарный вариационный ареал чернозема выщелоченного сформировался в однородных литолого-геоморфологических условиях (плоская однородная поверхность). Исследования по взаимосвязи гумусовых веществ и структурно-агрегатного состава проведены в 40-кратной повторности методом случайных чисел [8]. Отбор образцов проведен в посевах пшеницы на глубину пахотного слоя. Структурный состав определяли по Н.И. Саввинову, водопрочность структуры – на приборе И.М. Бакшеева [11]; углерод гумуса (Сгумуса) – по И.В. Тюрину; водорастворимый гумус (С_{H2O}) – методом бихроматной окисляемости по И.В. Тюрину [1]; щелочегидролизующий гумус (С_{NaOH} и в его составе С_{гк} и С_{фк}) – по И.В. Тюрину в модификации В.В. Пономаревой и Т.А. Плотниковой [12].

Результаты аналитических определений обработаны статистическими методами [4, 5].

Результаты и их обсуждение. Потенциальное плодородие черноземов Красноярской лесостепи – результат функционирования луговых и степных биогеоценозов в течение нескольких тысячелетий. За это время накопились запасы гумуса и сформировалась агрономически ценная структура гумусового горизонта. Современный уровень реального плодородия черноземов ограничивается рядом деградационных процессов, обусловленных влиянием антропогенных факторов, и в частности их высокой сельскохозяйственной освоенностью.

Исследованиями установлено, что структурно-агрегатный состав чернозема выщелоченного образует систему, сочетающую хорошую и отличную оструктуренность по содержанию агрономически ценных фракций (АЦФ) с водопрочностью агрегатов (ВА) от неудовлетворительного до отличного уровня (рис.).



Распределение структурно-агрегатного состава чернозема выщелоченного в пространстве, %

Статистические характеристики структурного состава чернозема выщелоченного в предельно однородных условиях почвообразования указывают на его отличную оструктуренность. Среднее содержание агрономически ценной фракции в пахотном слое достигает 84%. Количество глыбистой фракции составляет 12%, пыли – 4%. Среди ценных агрегатов преобладают зернистые отдельности размером 2–1 мм (32%). Структурный состав по содержанию агрономически ценных фракций варьирует в небольшой степени ($V = 15\%$). Среднестатистическая величина агрегатного состава в элементарном вариационном ареале чернозема выщелоченного оценивается на удовлетворительном уровне. Среднее содержание водопрочных агрегатов в выборке составляет 55%. При агрегатном анализе выявлена низкая водопрочность структурных агрегатов >1 мм (0,2–5%). При средней величине изменчивости признака ($V = 22\%$) установлен широкий интервал варьирования водопрочных агрегатов (min-max). Их количество изменяется от 34 до 82%.

Признавая важность всех компонентов гумуса в формировании почвенной структуры [6, 15], следует подчеркнуть особую роль его активной, разлагающейся части. При одном и том же уровне содержания гумуса почва может иметь совершенно разное структурное состояние в зависимости от количества легкоминерализуемой фракции. Подвижные формы легкоминерализуемой фракции (ПОВ) объединяют органические продукты почвенного гумуса, легко переходящие в растворимое состояние ($C_{H_2O} + C_{NaOH}$). Водорастворимые соединения, выщелачиваемые из растительных остатков в процессах разложения, представлены смесью органических кислот, аминокислот, углеводов. Вещества, извлекаемые слабыми растворами щелочи, содержат большое количество фенольных гидроксидов, амино- и амидогрупп, обогащены водородом и азотом. Эти соединения, составляющие периферическую часть гумуса, довольно быстро подвергаются минерализации и служат основным источником для синтеза гумусовых веществ.

Исследованиями установлено, что при небольшой величине изменчивости признака ($V = 13\%$) содержание гумуса в черноземе выщелоченном изменяется от среднего (3090 мгС/100г) до высокого уровня (5140 мгС/100г) (табл.). Пространственная изменчивость подвижных гумусовых соединений не одинакова. При небольшом содержании водорастворимого гумуса (19 мгС/100г) эта фракция ПОВ отличается средней измен-

чивостью в пространстве ($V = 28\%$). Молодые гумусовые кислоты, извлекаемые 0,1 н NaOH, варьируют в целом в небольшой степени. Заметим, что изменчивость гуминовых и фульвокислот в выборке более существенная ($V = 20\text{--}26\%$). Значительных отклонений по форме статистического распределения стабильных гумусовых веществ и их подвижных компонентов в пахотном слое чернозема выщелоченного не обнаружено.

Статистические характеристики гумусовых веществ в черноземе выщелоченном ($n = 40$), мгС/100г

Показатель	Сгумуса	Спов	С _{H₂O}	С _{NaOH}			Сстаб. гумуса	Сгк/Сфк
				Собщ	Сгк	Сфк		
<i>X</i>	3990	519	19,4	500	279	221	3470	1,3
<i>S</i>	511	73	5,4	68	73	44	445	0,5
<i>min</i>	3090	393	10,5	379	164	144	2697	0,6
<i>max</i>	5140	655	31,5	628	425	346	4485	2,5
<i>min-max</i>	2050	262	21,0	249	261	202	1788	1,9
<i>V</i>	13	14	28	14	26	20	13	39
<i>A</i>	0,50	0,12	0,35	0,10	0,51	0,69	0,55	0,61
<i>E</i>	-0,19	-0,62	-0,18	-0,64	-0,43	0,42	-0,20	-0,75

Примечание: *X* – среднее арифметическое; *S* – стандартное отклонение; *min*, *max* – предельные значения; *min-max* – интервал варьирования; *V* – коэффициент вариации; *A* – коэффициент асимметрии; *E* – коэффициент эксцесса.

Агрегатная структура, формирующаяся в дисперсных системах, подвержена длительному и интенсивному воздействию продуктов разложения органического вещества, почвенной биоты и различных гидротермических режимов. На этом фоне в агрегатах постоянно протекают процессы, связанные с перемещением и переориентацией глинистых минералов и других высокодисперсных частиц почвы. Эти явления во многом определяют образование адгезионной связи между элементами, составляющими водоустойчивую агрегатную структуру почв.

Исследованиями не доказана прямая роль гумусовых соединений в пространственном распределении структурно-агрегатного состава чернозема выщелоченного в предельно однородных условиях почвообразования:

$$\begin{aligned}
 \text{АЦФ} &= 0,924(\text{Сгумуса}) - 0,624(\text{СН}_2\text{O}) + 6,413(\text{С}_{\text{NaOH}}) - 7,112(\text{Сгк}) - \\
 &\quad - 4,259(\text{Сфк}), \text{ при } R = 0,350; R^2 = 0,122; p = 0,949; \\
 \text{ВА} &= - 0,528(\text{Сгумуса}) + 0,696(\text{СН}_2\text{O}) + 10,275(\text{С}_{\text{NaOH}}) - 11,035(\text{Сгк}) - \\
 &\quad - 6,369(\text{Сфк}), \text{ при } R = 0,386; R^2 = 0,149; p = 0,336.
 \end{aligned}$$

Прямолинейные связи представляют собой один из наиболее простых видов связей, к тому же далеко не самый распространенный. Гораздо чаще в исследованиях приходится сталкиваться со связями криволинейными. По современным представлениям [14], в основе устойчивости наземных экосистем лежит комплекс взаимодействий между почвой и биогеоценозом, осуществляющихся по принципу нелинейных обратных связей. Нелинейность взаимодействий в системе почва-биогеоценоз определяет самоорганизацию биогеоценозов, высокую чувствительность к начальным условиям, множественность возможных стационарных состояний, общую устойчивость системы в широком диапазоне варьирования внешних нагрузок. При построении моделей нелинейной зависимости структурно-агрегатного состояния чернозема выщелоченного от уровня содержания гумусовых веществ в пределах элементарного вариационного ареала был применен метод сплайнов. Под сплайном понимают агрегатную функцию, совпадающую с функциями более простой природы на каждом элементе разбиения своей области определения. С использованием этого метода нами установлены интервалы содержания гумуса и его подвижных соединений, в пределах которых выявлена их достоверная связь с уровнем агрономически ценных и водопрочных агрегатов. Для содержания фракции агрономически ценного размера и гумуса эта зависимость описывается следующим уравнением:

$$\text{АЦФ} = \begin{cases} 4E-10x^5-6E-06x^4+0,0404x^3-135,34x^2+226254x-2E+0,8, \\ \text{при } R^2=1, \text{ если } 3090 \leq C_{\text{гумуса}} \leq 3590; \\ -2E-12x^6+4E-08x^5-0,0004x^4+1,8219x^3-5239,1x^2+8E+06x- \\ 5E+09, \text{ при } R^2=0,96, \text{ если } 3590 \leq C_{\text{гумуса}} \leq 4090; \\ 2E-14x^6-5E-10^5+6E-06x^4-0,0371x^3+127,57x^2-233929x+2E+08, \\ \text{при } R^2=0,90, \text{ если } 4090 \leq C_{\text{гумуса}} \leq 5140. \end{cases}$$

Для водорастворимых соединений гумуса выделены два интервала значений, достоверно сопряженных с содержанием АЦФ:

$$\text{АЦФ} = \begin{cases} 0,0018x^6-0,1966x^5+8,8637x^4-208,71x^3+2705,3x^2-18292x+50468, \\ \text{при } R^2=0,97, \text{ если } 10,5 \leq C_{\text{H}_2\text{O}} \leq 22,5; \\ 0,1603x^4-17,672x^3+727,07x^2-132,27x+89844, \\ \text{при } R^2=1, \text{ если } 22,5 \leq C_{\text{H}_2\text{O}} \leq 31,5. \end{cases}$$

Модели зависимости содержания структурных агрегатов размером 10 – 0,25 мм и щелочегидролизующих соединений гумуса имеют следующий вид:

$$\text{АЦФ} = \begin{cases} 2E-08x^6-6E-05x^5+0,0596x^4-33,625x^3+10661x^2-2E+06x+1E+08, \\ \text{при } R^2=0,97, \text{ если } 379 \leq C_{\text{NaOH}} \leq 474; \\ 1E-07x^6-0,0004x^5+0,4716x^4-322,41x^3+123915x^2-3E+07x+2E+09, \\ \text{при } R^2=1, \text{ если } 474 \leq C_{\text{NaOH}} \leq 545; \\ 0,0007x^3-1,2676x^2+733,22x-141263, \\ \text{при } R^2=1, \text{ если } 545 \leq C_{\text{NaOH}} \leq 593; \\ -0,0064x^3+11,753x^2-7224,6x+1E+0,6, \\ \text{при } R^2=1, \text{ если } 593 \leq C_{\text{NaOH}} \leq 628. \end{cases}$$

$$\text{АЦФ} = \begin{cases} -5E-11x^6+8E-08x^5-5E-05x^4+0,0177x^3-3,2312x^2+307,66x-11826, \\ \text{при } R^2=0,97, \text{ если } 164 \leq C_{\text{гк}} \leq 354; \\ 0,0007x^3-0,778x^2+298,8x-3811, \\ \text{при } R^2=1, \text{ если } 354 \leq C_{\text{гк}} \leq 425. \end{cases}$$

$$\text{АЦФ} = \begin{cases} -3E-08x^6+4E-05x^5-0,0172x^4+4,281x^3-595,17x^2+43901x-1E+06, \\ \text{при } R^2=0,97, \text{ если } 155 \leq C_{\text{фк}} \leq 227; \\ -0,0261x^2+12,65x-1450,1, \\ \text{при } R^2=0,88, \text{ если } 227 \leq C_{\text{фк}} \leq 274; \\ -0,0222x^2+14,176x-2155,4, \\ \text{при } R^2=0,93, \text{ если } 274 \leq C_{\text{фк}} \leq 346. \end{cases}$$

Множественный коэффициент детерминации показывает долю вариации зависимой переменной, обусловленную регрессией или изменчивостью объясняющих переменных. Его можно рассматривать как меру качества уравнения регрессии, характеристику прогностической силы анализируемой модели: чем ближе R^2 к единице, тем лучше регрессия описывает зависимость между зависимыми переменными. Как видим, все коэффициенты детерминации, полученные для моделей, близки к единице. Они лежат в интервале от 0,87 до 1,00.

Модели, описывающие количественные зависимости содержания водорасщепляемых агрегатов и гумусовых веществ, представлены ниже:

$$\text{ВА} = \begin{cases} -8E-09x^4+0,0001x^3-0,5168x^2+1151,4x-960287, \\ \text{при } R^2=0,97, \text{ если } 3090 \leq C_{\text{гумуса}} \leq 3590; \\ 3E-12x^6-6E-08x^5+0,0006x^4-2,9887x^3+8528x^2-1E+0,7x+8E+09, \\ \text{при } R^2=0,96, \text{ если } 3590 \leq C_{\text{гумуса}} \leq 4030; \\ 9E-13x^6-2E-08x^5+0,0002x^4-1,3935x^3+4494,5x^2-8E+06x+6E+09, \\ \text{при } R^2=0,98, \text{ если } 4030 \leq C_{\text{гумуса}} \leq 4580, \\ 3E-08x^4-0,0006x^3+4,2151x^2-13637x+2E+07, \\ \text{при } R^2=1, \text{ если } 4580 \leq C_{\text{гумуса}} \leq 5140. \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
 \text{BA} = & \left\{ \begin{array}{l} -0,6741x^3 + 27,977x^2 - 376,06x + 1687,1, \\ \text{при } R^2 = 0,98, \text{ если } 10,5 \leq C_{H_2O} \leq 18,0; \\ -0,0019x^6 + 0,2785x^5 - 17,097x^4 + 554,96x^3 - 10045x^2 + 961223 - \\ 37981, \text{ при } R^2 = 0,95, \text{ если } 18,0 \leq C_{H_2O} \leq 31,5. \end{array} \right. \\
 \text{BA} = & \left\{ \begin{array}{l} -5E-08x^6 + 0,0001x^5 - 0,1215x^4 + 68,007x^3 - 21393x^2 + 4E+06x - 3E+0,8, \\ \text{при } R^2 = 1, \text{ если } 379 \leq C_{NaOH} \leq 462; \\ 1E-07x^6 + 0,0004x^5 - 0,4425x^4 + 292,15x^3 - 108435x^2 + 2E+07x - 2E+09, \\ \text{при } R^2 = 1, \text{ если } 462 \leq C_{NaOH} \leq 533; \\ 0,0002x^3 - 0,3683x^2 + 228,48x - 46678, \\ \text{при } R^2 = 1, \text{ если } 533 \leq C_{NaOH} \leq 581; \\ -3E-05x^4 + 0,0724x^3 - 66,98x^2 + 27532x - 4E+06, \\ \text{при } R^2 = 1, \text{ если } 581 \leq C_{NaOH} \leq 628. \end{array} \right. \\
 \text{BA} = & \left\{ \begin{array}{l} -2E-08x^5 + 2E-05x^4 - 0,0099x^3 + 1,9228x^2 - 183,71x + 6930,8, \\ \text{при } R^2 = 1, \text{ если } 164 \leq C_{\Sigma k} \leq 283; \\ 3E-0,5x^2 - 0,153x + 97,117 \\ \text{при } R^2 = 1, \text{ если } 283 \leq C_{\Sigma k} \leq 330; \\ 1E-05x^4 - 0,0178x^3 + 10,089x^2 - 2527x + 236676, \\ \text{при } R^2 = 1, \text{ если } 330 \leq C_{\Sigma k} \leq 425. \end{array} \right. \\
 \text{BA} = & \left\{ \begin{array}{l} 1E-05x^6 + 0,0088x^4 - 3,0783x^3 + 534,42x^2 - 46215x + 2E+06, \\ \text{при } R^2 = 1, \text{ если } 144 \leq C_{\text{фк}} \leq 203; \\ -2E-06x^5 + 0,0019x^4 - 0,9023x^3 + 216,79x^2 - 25958x + 1E+06, \\ \text{при } R^2 = 1, \text{ если } 203 \leq C_{\text{фк}} \leq 274; \\ 0,0153x^2 - 9,9904x + 1169,8, \\ \text{при } R^2 = 0,96, \text{ если } 274 \leq C_{\text{фк}} \leq 346. \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

Высокие коэффициенты детерминации в полученных моделях ($R^2 = 0,95-1,00$) также доказывают наличие нелинейной связи между гумусовыми веществами и водопрочностью структурных агрегатов чернозема выщелоченного.

Выводы

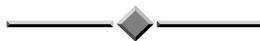
1. В предельно однородных условиях почвообразования величина варьирования агрономически ценных, водоустойчивых агрегатов и гумусовых веществ не превышает 28%, что позволяет судить об однородности их пространственного распределения в пределах элементарного вариационного ареала чернозема выщелоченного.

2. Взаимосвязь системы «гумусовые вещества – почвенная структура» носит нелинейный характер и подтверждает роль подвижных гумусовых соединений в процессах возникновения, развития, стабилизации и деградации структурных элементов в агрегатах.

Литература

1. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. – М.: Изд-во МГУ, 1970. – 487 с.
2. Воронин А.Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв. – М.: Изд-во МГУ, 1984. – 204 с.
3. Воронин А.Д. Основы физики почвы. – М.: Изд-во МГУ, 1986. – 244 с.
4. Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении. – М.: Изд-во МГУ, 1995. – 319 с.
5. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.
6. Кирюшин В.И. Экологизация земледелия и технологическая политика. – М.: Изд-во ТСХА, 2000. – 473 с.
7. Корнблюм Э.А. Основные уровни морфологической организации почвенной массы // Почвоведение. – 1975. – № 9. – С.36–48.
8. Липкина Г.С. Изучение параметров почв в полевых и приближенных к полевым условиям // Теоретические основы и методы определения оптимальных параметров почв. – М., 1980. – С.29–42.

9. Масютенко Н.П., Дубовик Е.В. Связь содержания и состава органического вещества чернозема типичного с размером почвенных агрегатов и их водопрочностью // *Фундаментальные физические исследования в почвоведении и мелиорации*. – М.: Изд-во МГУ, 2003. – С.78–80.
10. Органическое вещество агрегатов черноземов: содержание, состав, природа / Н.П. Масютенко [и др.] // *Почвы – национальное достояние России*. – Новосибирск, 2004. – С.535.
11. Методическое руководство по изучению почвенной структуры. – Л.: Колос, 1969. – 430 с.
12. Пономарева В.В., Плотникова Т.А. Гумус и почвообразование. – Л.: Наука, 1980. – С.119–121.
13. Розанов Б.Г. Морфология почв. – М.: Изд-во МГУ, 1983. – 320 с.
14. Рьжова И.М. Анализ устойчивости почв на основе теории нелинейных динамических систем // *Почвоведение*. – 2003. – № 5. – С.583–590.
15. Фокин А.Д. Почва, биосфера и жизнь. – М.: Наука, 1986. – 176 с.
16. Хан Д.В. Органоминеральные соединения и структура почвы. – М.: Наука, 1969. – 140 с.



УДК 631.4:622.691.4 (282.256.66)

М.В. Оконешникова

ПОЧВЕННЫЙ ПОКРОВ НА УЧАСТКЕ ПЕРЕХОДА МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА ЧЕРЕЗ р. ВИЛЮЙ (ЯКУТИЯ)

В статье представлены результаты детального изучения почвенного покрова на южной части трассы газопровода в Центрально-Якутской равнине, охватывающей бассейн среднего течения реки Вилюй. Показано, что структура почвенного покрова и свойства почв изученного участка являются типичными для подзоны средней тайги в отличие от почв северной части трассы, где доминируют криоземы.

Ключевые слова: бассейн Вилюя, средняя тайга, почвенный покров, палевые почвы.

M.V. Okoneshnikova

SOIL COVER ON THE PLOT WHERE MAIN GAS PIPELINE GETS OVER THE VILYUI RIVER (YAKUTIA)

The detailed study results of soil cover in the southern part of the gas pipeline route in the Central Yakut plain that covers the basin of the Vilyui river middle reach are given in the article. It is shown that the soil cover structure and soil properties on the researched plot are typical for the middle taiga subzone as opposed to the route northern part soils where cryozems dominate.

Key words: the Vilyui basin, middle taiga, soil cover, pale-yellow soils.

Введение. Изучение почвенного покрова проведено в связи с разработкой раздела «Оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС) для строительства магистрального газопровода от Среднетюнгского газоконденсатного месторождения (ГКМ) до с. Тамалакан Верхневиллюйского района Республики Саха (Якутия)». Трасса газопровода по почвенно-геоморфологическому районированию относится к Вилюйскому бассейну Центрально-Якутской равнины [1]. Тянется длинной узкой полосой на север от р. Вилюй по нерасчлененным и слаборасчлененным участкам междуречья рек Тюнг и Тюкян, включая переходы через р. Вилюй в южной части и через р. Тюнг в северной части.

Участок газопровода на линии перехода через р. Вилюй расположен в пределах 63°26' с.ш., и формирующиеся здесь типы почв по своим свойствам и составу являются типичными для подзоны средней тайги в отличие от ранее рассмотренных нами почв на северной части трассы газопровода [2].

Методы и объекты исследования. Почвенные исследования проводились в августе 2005 г. в составе полевого отряда Института биологических проблем криолитозоны СО РАН. При изучении почвенного покрова использовались сравнительно-географические, морфологические, картографические методы исследования почв. Почвенные разрезы закладывались на основных элементах рельефа и растительных группи-