

УДК 631.43

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТАЕЖНЫХ ПОЛУГИДРОМОРФНЫХ ПОЧВ: ВЗАИМОСВЯЗЬ С ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ И ТЕМПЕРАТУРНЫМИ УСЛОВИЯМИ

© 2024 г. Ю. В. Холопов^{a,*} (<http://orcid.org/0000-0002-5725-746X>),
Д. Д. Хайдапова^b, А. Б. Новаковский^a, Е. М. Лаптева^a

^aИнститут биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
ул. Коммунистическая, 28, Сыктывкар, 167982 Россия

^bФакультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, стр. 12, Москва, 119991 Россия

*e-mail: Yuraholopov@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.08.2023 г.

После доработки 12.01.2024 г.

Принята к публикации 13.01.2024 г.

Рассмотрены результаты реологических исследований почв нарушенного сложения, пасты, на модульном реометре MCR 302 методом амплитудной развертки, колебательный метод. Объектом исследования являются полугидроморфные почвы (Histic Albic Retisol, Histic Gleyic Stagnosols) таежной зоны северо-востока европейской части России, Республика Коми. Показано, что наиболее жесткие взаимодействия между частицами почвы формируются в горизонтах с высоким содержанием подвижных органических веществ фульватной природы и органо-минеральных альфегумусовых соединений ELhi,g–ELg–CRM. Повышенная жесткость конструкции обусловлена цементацией частиц почвы в результате поступления Al–Fe-гумусовых веществ с формированием прочных межчастичных связей в почвах. Не менее важную роль в реологическом поведении почв играют процессы промерзания–оттаивания. Влияние сезонного промерзания наиболее четко проявляется в профиле полугидроморфных вариантов светлоземов (Histic Gleyic Stagnosols) в их криометаморфических горизонтах CRM, где повышенная жесткость почвенных связей обусловлена конденсационным уплотнением частиц в условиях длительного периода температур около 0°C, “нулевая завеса”. При возрастании увлажнения почв наблюдается значительная дезагрегация минеральной массы почв. Об этом свидетельствует значительное увеличение диапазона пластичности – Crossover. Дезагрегированные почвы более склонны к процессам эрозии и смыва, однако мощный мохово-торфяной горизонт, формирующийся в верхней части профиля полугидроморфных почв, предохраняет их от негативных деформационных явлений. К северу, в направлении от текстурно-дифференцированных почв южной тайги к криометаморфическим почвам лесотундры наблюдается усиление жесткости и хрупкости межчастичных почвенных контактов. Это сопряжено с более активным поступлением в минеральную часть профиля органических веществ фульватной природы, в том числе комплексных альфегумусовых соединений, а также интенсивным и длительным промерзанием почв. Показано, что реологические параметры могут быть использованы в качестве дополнительных показателей при диагностике и классификации таежных почв.

Ключевые слова: реология, структура почв, гидроморфизм почв, Histic Albic Retisol, Histic Gleyic Stagnosols

DOI: 10.31857/S0032180X24060036 , EDN: YCCLLEN

ВВЕДЕНИЕ

Интенсификация техногенного воздействия на таежные экосистемы (вырубка лесов, проезд тяжелой техники, строительство инфраструктурных

объектов и др.) обуславливает активизацию и развитие эрозионных процессов, нарушающих строение и функционирование лесных почв. Особенно это актуально в отношении полугидроморфных почв, характеризующихся периодическим

или застойным переувлажнением. В силу климатических особенностей (значительного количества осадков, низких температур, слабого испарения) почвенный покров Республики Коми формируется в условиях повышенного увлажнения и длительного промерзания с проявлением разнообразных деформационных процессов: тиксотропии, пльвунности, солифлюкции, морозобойного растрескивания, пучения и др. Полугидроморфные почвы занимают более 30% (≈ 12 млн га) территории Республики Коми, они имеют большое лесохозяйственное значение [1]. Важнейшим биосферно-экологическим качеством таежных полугидроморфных почв является аккумуляция в биогеоценозе органического вещества в виде органогенного горизонта – оторфованной лесной подстилки. Учитывая возможность повышения количества осадков в условиях климатических изменений, которые прогнозируются в северном полушарии к концу XXI в. [26, 28], следует ожидать увеличения влажности почв, что отразится и на их физических свойствах. Для оценки физико-механических изменений необходимы реологические исследования почв, которые позволяют количественно и качественно оценить характер межчастичного взаимодействия почв, а также выявить механические свойства почв: упругость, вязкость, пластичность [15, 20]. Реологический подход хорошо зарекомендовал себя в работах многих исследователей [21–25, 27, 29–32, 37–39]. В почвоведении реологический метод широко используется как в практических целях, так и в вопросах теоретической направленности. В частности, реологический подход часто применяется при изучении деградации почвенной структуры под влиянием антропогенного воздействия [15, 34–36, 41]. Ранее были исследованы деформационные характеристики таежных подзолистых почв, формирующихся в хорошо дренируемых условиях [17]. Выявлены особенности реологических свойств подзолистых почв с разной степенью увлажнения, формирующихся в северной части таежно-лесной зоны [18]. Исследования показали, что подзолистые почвы северной части региона имеют некоторые особенности в физико-химических и реологических свойствах, которые обусловлены их длительным промерзанием и переувлажнением. Установлено, что наиболее прочные межчастичные контакты с упруго-хрупкими свойствами формируются в горизонтах профиля криометаморфических почв (Folic Albic Stagnosols, Histic Gleyic Stagnosols), отличающихся высоким содержанием гумусовых веществ и органо-минеральных альфегумусовых соединений. Настоящая работа является продолжением предыдущих исследований и направлена на изучение реологических свойств полугидроморфных подзолистых почв, формирующихся в зональном ряду от южной тайги до лесотундры. Эти исследования

позволят более полно оценить структурное состояние и устойчивость таежных полугидроморфных почв в условиях изменяющегося климата и возрастающего техногенного давления, а также более четко охарактеризовать специфические особенности подзолистых почв, выявить дополнительные диагностические показатели на основе характеристики их физических параметров.

Цель работы – определить методом амплитудной развертки (колебательный метод) особенности реологического поведения полугидроморфных почв, формирующихся под таежной растительностью на территории Республики Коми, во взаимосвязи с их физико-химическими свойствами и температурными условиями.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Территория исследований располагается в пределах северо-восточной части Восточно-Европейской равнины на территории Республики Коми. Климат региона умеренно-континентальный умеренно-холодный [1]. Активная циклоническая деятельность обуславливает выпадение достаточно большого количества атмосферных осадков (489–622 мм/год). К северу снижается среднегодовая температура воздуха (от $+1^{\circ}\text{C}$ в подзоне южной тайги до -4.1°C в лесотундре), значительно увеличивается количество дней с отрицательными температурами (от 172 до 221), возрастает коэффициент увлажнения (от 1.1–1.2 до 2.0–2.5).

Объектами исследования послужили текстурно-дифференцированные (Haplic Albic Retisol) и криометаморфические (Histic Gleyic Stagnosols) почвы, формирующиеся в полугидроморфных условиях под пологом еловых лесов на суглинистых и супесчаных почвообразующих породах. Для изучения реологических свойств таежных почв выбраны пять ключевых участков, расположенных в различных подзонах тайги, а также в лесотундре. На каждом участке заложено по два почвенных разреза. Всего в работе использовано 10 полнопрофильных почвенных разрезов и 60 образцов почв. Краткая характеристика ключевых участков представлена в табл. 1. Названия почв даны в соответствии с принципами диагностики и классификации почв России 2004 г. [9, 12] и системой классификации почв WRB [42].

Физико-химические свойства почв исследовали в соответствии с общепринятыми методами [3, 14]. Величину pH солевой (KCl) суспензии с соотношением почва : раствор 1 : 2.5 определяли потенциометрически со стеклянным электродом, содержание общего углерода и азота – газохроматографическим методом на CNHS-анализаторе EA-1100 Carlo Erba, обменных катионов (Ca^{2+} , Mg^{2+}) – вытеснением NH_4Cl с последующим атомно-абсорбционным определением на приборе Shimadzu

Таблица 1. Краткая характеристика объектов исследования

Зона/ подзона	Координаты ключевого участка	Номер разреза	Растительность	Тип, подтип почвы*	Тип, подтип почвы**
Южная тайга	KS-I 59°38'N 49°22'E	L-1	Ельник кислично-зеленомошный	Haplic Albic Retisol	Дерново-подзолистая слабоглееватая
		L-3	Ельник кустарничково-сфагновый	Haplic Albic Retisol	Дерново-подзолистая глееватая
Средняя тайга	KS-II 61°39'N 50°41'E	R-8-H	Ельник чернично-зеленомошный	Haplic Albic Retisol	Торфяно-подзолисто-глееватая торфянистая
		R-3-P	Ельник кустарничково-сфагновый	Haplic Albic Retisol	Торфяно-подзолисто-глееватая торфяная
Северная тайга	KS-III 64°51'N 57°37'E	R-3-H	Ельник кустарничково-сфагновый	Histic Gleyic Stagnosols	Светлозем торфянистый потечно-гумусовый глееватый
		R-2	Ельник осоково-сфагновый	Histic Gleyic Stagnosols	Светлозем торфяный потечно-гумусовый глееватый
Крайне-северная тайга	KS-IV 65°53'N 60°30'E	R-42	Ельник кустарничково-сфагновый	Histic Gleyic Stagnosols)	Светлозем торфянистый потечно-гумусовый глееватый
		R-71	Ельник кустарничково-сфагновый	Histic Gleyic Stagnosols	Светлозем торфяный потечно-гумусовый глееватый
Лесо-тундра	KS-V 66°39'N 62°29'E	R-4-H	Ельник кустарничково-сфагновый	Histic Gleyic Stagnosols	Светлозем торфянистый потечно-гумусовый глееватый
		R-4-2	Ельник кустарничково-сфагновый	Histic Gleyic Stagnosols	Светлозем торфяный потечно-гумусовый глееватый

* Название почвы приведено в соответствии с системой классификации WRB [42].

** Название почвы приведено в соответствии с классификацией почв России [9].

АА-6300, оксалатнорастворимых форм соединений железа и алюминия – по Тамму, дитиониторастворимых – по Мера–Джексону, гранулометрический состав – по Качинскому. Результаты аналитических исследований приведены в табл. 2.

Наблюдения за температурным режимом почв проводили с помощью цифровых логгеров НОВО-U12 (США). Температурные датчики устанавливали на глубину 0, 20, 50 и 100 см от поверхности почвы, период измерений – через каждые 3 ч с 2012 по 2013 гг.

Реологические исследования образцов почв нарушенного сложения (пасты) выполняли на базе модульного реометра MCR-302 Anton Paar (Австрия) методом амплитудной развертки (колебательный метод) с измерительными системами плита-плита на кафедре физики почв факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. Подробное описание методики проведения исследований представлено в работах [16, 17, 29, 34]. Для проведения измерений растертую и просеянную через сито с диаметром отверстий 1 мм почву массой 2 г капиллярно насыщали дистиллированной водой в

течение 24 ч до состояния влажности максимального капиллярного водонасыщения. Далее подготовленный образец загружали в прибор, помещая его между измерительными пластинами, верхняя из которых подвергала почвенный образец колебательным нагрузкам с постоянной частотой и увеличивающейся амплитудой. В каждом образце после проведения реологического испытания определяли влажность весовым способом, высушивая образец при 105°C. Испытания проводили при контроле нормальной силы $10H$. Технические режимы испытаний: расстояние между плато $h \sim 1-5$ мм, диаметр плато – 2.5 см, деформация сдвига $\gamma - 0.001-100\%$, угловая частота $f - 0.5$ Гц, количество измеряемых точек 30, температуру образца поддерживали элементами Пельтье на постоянном уровне 20°C. В ходе проведенных испытаний были получены следующие параметры, характеризующие реологические свойства почв (рис. 1а): G' (Па) – модуль запаса, является мерой энергии деформации, сохраненной образцом в процессе сдвига, (значения модуля запаса G' в начале деформационного сдвига использованы для характеристики

Таблица 2. Физико-химические свойства почв

Горизонт	Глубина, см	pH _{KCl}	C _{орг} , %	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fе ²⁺ O ₃ (о)*, %	Сумма частиц, %		Горизонт	Глубина, см	pH _{KCl}	C _{орг} , %	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fе ²⁺ O ₃ (о)*, %	Сумма частиц, %	
							< 0.001 мм	< 0.01 мм								< 0.001 мм	< 0.01 мм
KS-V. Лесотундра																	
Разрез R-4-Н. Светлозем-горфянистый потечно-гумусовый глееватый (Histic Gleyic Stagnosols)																	
T1	0-7	3.3	45.2	10.5	5.4	0.06	-	-	T1	0-5	3.4	45.9	11.7	6.4	-	-	-
T2	7-13	3.4	36.4	1.5	1.0	0.87	-	-	T2	5-20	3.1	44.2	6.7	5.6	-	-	-
ELhi,g	13-17	3.6	2.00	0.1	0.1	0.65	12	26	T3	20-25	3.4	42.4	3.5	2.7	-	-	-
ELhi,g	17-25	3.9	0.24	0.5	0.4	0.40	10	19	ELhi,g	25-29	3.6	1.02	0.4	0.2	0.63	9	22
Berm	25-41	3.9	0.55	0.1	0.1	0.52	8	16	Berm,g	29-40	3.6	0.29	0.9	0.7	0.59	12	23
CRMg	41-70	3.9	0.2	1.7	1.3	0.41	11	22	CRMg	40-65	3.4	0.21	5.4	4.1	0.69	25	38
BCg	70-90	3.9	0.22	1.3	1.1	0.46	9	20	Dg	65-80	3.6	0.27	6.4	4.9	0.92	25	32
KS-IV. Крайнесеверная тайга																	
Разрез R-42. Светлозем-горфянистый потечно-гумусовый глееватый (Histic Gleyic Stagnosols)																	
T1	0-4	3.2	42.7	0.3	0.1	-	-	-	T1	0-3	-	42.6	-	-	-	-	-
T2	4-8	3.4	42.7	0.2	0.1	-	-	-	T2	3-7	-	42.6	-	-	-	-	-
T3	8-18	3.6	41.0	0.1	0.04	-	-	-	T3	7-20	-	36.7	-	-	-	-	-
ELhi,g	18-20	3.9	1.38	0.1	0.02	0.5	14	25	ELhi,g	20-25	3.8	3.2	1.2	0.4	1.37	25	45
ELg,hi	20-30	4.0	0.41	0.1	0.04	0.73	15	26	ELg,hi	25-30	3.8	0.57	0.5	0.3	0.91	14	29
Berm	30-40	4.1	0.28	0.1	0.04	0.71	15	24	Berm	30-40	3.2	0.30	0.5	0.3	0.75	12	26
CRM1	40-50	4.5	0.27	-	-	0.41	16	33	Berm	40-50	3.8	0.29	1.0	0.9	0.96	18	34
CRM2	50-60	4.0	0.24	0.1	0.03	0.43	19	34	CRM1	50-60	3.8	0.23	2.8	1.3	1.07	20	36
BC	60-70	3.9	0.29	0.1	0.03	0.37	20	33	CRM2	60-70	3.8	0.20	4.1	2.2	0.96	20	38
C	70-80	3.9	0.27	0.1	0.03	0.37	22	38	CRM3	70-82	3.9	0.20	6.5	4.0	0.80	25	40
C	80-100	4.2	0.19	0.1	0.02	0.27	8	15	BCg	82-100	4.0	0.20	9.6	6.2	0.51	34	46
KS-III. Северная тайга																	
Разрез R-3-Н. Светлозем-горфянистый потечно-гумусовый глееватый (Histic Gleyic Stagnosols)																	
T1	0-8	2.9	44.4	1.9	1.7	0.04	-	-	O	0-7	2.6	44.9	-	-	-	-	-
T2	8-14	3.1	44.6	0.9	0.5	0.43	-	-	T1	7-14	2.5	45.6	-	-	-	-	-
T3	14-17	3.5	37.7	0.4	0.2	1.68	-	-	T2	14-20	2.8	45.1	-	-	-	-	-
ELhi,g	17-20	3.5	7.8	0.1	0.1	0.17	11	15	T3	20-25	3.1	46.1	-	-	-	-	-
ELg	20-30	4.0	0.47	0.1	0.1	0.46	10	15	ELhi,g	25-28	3.1	7.6	0.6	0.2	0.18	10	22
Berm,g	30-40	4.1	0.31	0.2	0.1	0.33	9	14	ELhi,g	28-30	3.4	3.0	0.5	0.2	0.26	13	21
Berm,g	40-50	4.1	0.24	0.2	0.2	0.38	9	15	Berm,g	30-40	3.7	0.56	0.6	0.2	0.41	8	14

KS-II. Средняя тайга																	
Разрез R-8-Н. Торфяно-подзолистая глееватая торфянистая (Histic Albic Retisol)						Разрез R-3-Р. Торфяно-подзолистая глееватая торфяная (Histic Albic Retisol)											
CRM1g	50-60	4.1	0.33	0.4	0.3	0.51	10	18	Всrm,g	40-50	3.8	0.38	0.6	0.2	0.5	7	13
CRM2g	60-80	3.9	<0.15	6.9	1.0	0.29	13	19	Всrm,g	50-60	3.8	0.37	0.6	0.2	0.45	8	15
CRM3g	80-96	3.8	<0.15	4.5	2.6	0.47	21	26	CRM1g	60-70	3.8	0.23	0.8	0.2	0.60	8	14
CRM3g	96-118	3.8	0.16	6.6	3.6	—	23	26	CRM2g	70-90	3.6	<0.15	1.2	0.4	0.38	8	14
CRM3g	118-150	3.9	0.17	7.9	4.5	0.44	20	27	BCg	90-110	3.6	<0.15	1.4	0.4	0.41	8	16
BCg	150-170	4.0	<0.15	8.5	5.1	0.45	21	30	BCg	110-130	3.5	<0.15	2.3	0.8	0.31	12	18
Cg	170-180	4.0	<0.15	8.3	5.0	0.46	21	30									
KS-I. Южная тайга																	
Разрез L-1. Дерново-подзолистая слабogleеватая (Histic Albic Retisol)									Разрез L-3. Дерново-подзолистая глееватая (Histic Albic Retisol)								
O1	0-2	4.5	38.7	6.2	2.91	—	—	—	T1	0-4	4.0	43.2	21.7	4.9	—	—	—
O2	2-4	3.5	21.0	1.4	0.84	—	—	—	T2	4-6	3.7	39.8	6.6	3.27	—	—	—
AYg	4-7	3.5	2.40	0.8	0.49	1.41	14	39	T3	6-12	3.8	22.0	36.9	17.3	—	—	—
ELg	7-14	3.8	0.30	1.2	1.06	0.70	8	27	AYg	12-15	3.5	9.2	1.5	1.21	1.82	—	—
BEL	14-27	3.7	0.26	4.2	2.66	1.01	9	32	ELg	15-23	3.8	0.71	2.5	2.56	0.54	18	37
BTel	27-40	3.7	0.16	10.3	6.3	0.47	12	31	BEL	23-36	3.8	0.25	10.3	6.3	1.00	21	40
BT1	40-60	3.8	0.22	12.3	7.8	0.61	27	43	BT	36-50	3.8	0.26	13.7	7.5	0.39	32	50
BT2	60-75	3.9	0.20	14.1	8.0	0.49	32	47	BT1	50-70	3.9	0.28	13.9	7.4	0.32	39	54
BT2	75-100	3.9	0.21	14.2	8.7	0.48	37	50	BT2	70-88	4.0	0.22	13.3	8	0.3	39	51
BT3	100-120	3.9	0.18	14.8	9.1	0.38	38	51	BT2	88-100	4.1	0.19	14.8	8.6	0.28	35	47
BC	120-135	4.0	—	14.6	8.9	0.33	—	—	BT3	100-114	4.1	0.19	14.6	8.7	0.39	38	53
C	135-140	4.0	—	7.4	1.86	0.38	—	—	BCg	114-135	4.2	0.20	14.1	8.5	0.39	36	51
									BCg	135-145	4.2	0.24	9.7	2.58	0.35	37	54

Примечание. Знак "—" указывает на то, что значение в этих образцах не было определено. * — по Тамму.

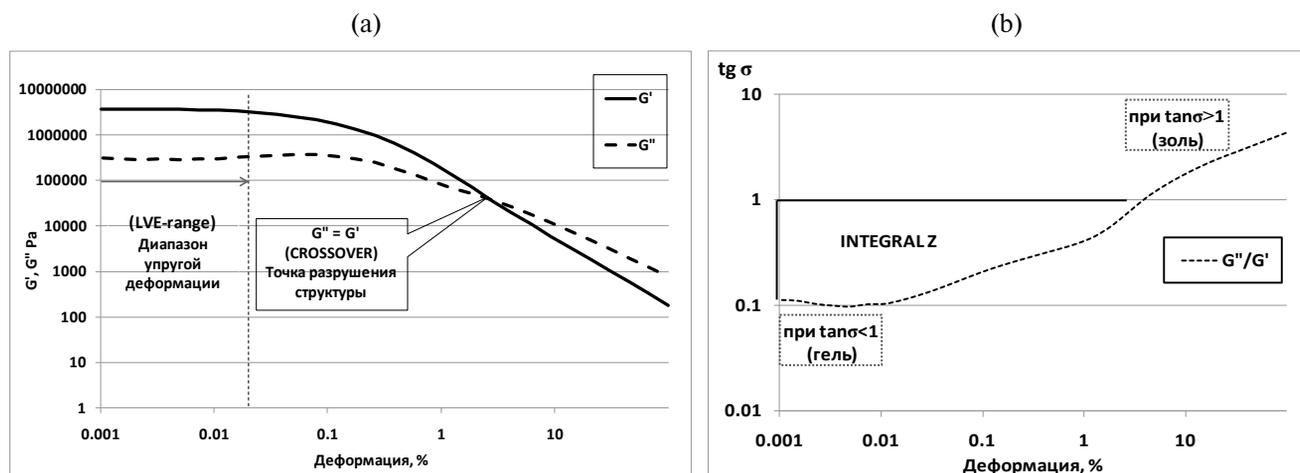


Рис. 1. Кривая зависимости модуля запаса (G') и потерь (G'') от величины деформации (а); кривая зависимости фактора потерь ($\text{tg } \delta$) от величины деформации (б).

жесткости межчастичных почвенных контактов), G'' (Па) – модуль потерь, является мерой энергии деформации, израсходованной во время процесса сдвига и потерянной для образца. Модули G' и G'' являются составной частью комплексного модуля сдвига G^* , модуль G' – представляет упругую составляющую поведения вязкоупругого материала, LVE-range (%) – линейный диапазон вязкоупругого поведения (отражает область с постоянными величинами или с незначительными изменениями модуля запаса G').

Crossover (%) – диапазон пластичной деформации (определяется по точке пересечения модулей запаса и потерь ($G' = G''$), которая фиксирует полное разрушение структурных связей с переходом системы из состояния гель в золь или из твердообразного в текучее). Величина $\text{tg } \delta = G''/G'$ – расчетная величина, необходимая для определения отношения вязкой и упругой частей вязкоупругого деформационного поведения. Величина Integral Z – интегральная зона фактора потерь, которая отражает величину межчастичного взаимодействия (рис. 1б).

Статистическую обработку данных проводили в программном пакете IBM SPSS Statistic.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Морфологическое строение и физико-химические свойства почв. Для выявления влияния биоклиматических факторов на реологические свойства полугидроморфных таежных почв подобраны объекты, сформированные на близких по составу почвообразующих породах. Почвы южной (KS-I) и средней (KS-II) тайги развиты на пылеватых средних суглинках, почвы северной (KS-III), крайне

северной тайги (KS-IV) и лесотундры (KS-V) – на пылеватых легких суглинках и пылеватых супесях.

Морфологическое строение почв (Haplic Albic Retisol) южной (KS-I) и средней тайги (KS-II) характеризуется наличием тяжелого текстурного горизонта ВТ в средней части профиля, с хорошо выраженной призматической структурой, глинистыми кутанами и белесыми скелетанами – текстурно-дифференцированные почвы. Общая мощность текстурных горизонтов достигает 90–100 см. Отличительным морфологическим признаком рассмотренных текстурно-дифференцированных почв, формирующихся в условиях периодического поверхностного переувлажнения, является, кроме текстурного горизонта, наличие в верхней части профиля серогумусового горизонта AYg (L-1, L-3) и элювиального потечно-гумусового горизонта ELhi,g (P-8-H, P-3-П), характеризующихся высоким содержанием гумуса и слабо разложившихся растительных остатков, а также признаками оглеения.

В профиле криометаморфических почв Histic Gleyic Stagnosols, формирующихся в полугидроморфных условиях в подзонах северной (KS-I), крайне северной (KS-IV) тайги и лесотундры (KS-V), имеются как морфологические признаки, сближающие их с почвами южной и средней тайги, так и некоторые отличительные признаки. К близким признакам следует отнести формирование под лесной торфянистой подстилкой элювиальных горизонтов (ELhi,g) с высоким содержанием гумуса иллювиальной природы (потечный гумус) и слабо разложившихся растительных остатков. Отличительной особенностью морфологического строения светлосемов (Histic Gleyic Stagnosols) является развитие в средней части профиля почв специфичной угловато-крупитчатой структуры (криометаморфическое оструктурирование – горизонт CRM)

при отсутствии или слабой выраженности текстурного горизонта (ВТ). Появление криометаморфических горизонтов в профиле светлосемов обусловлено усилением процессов промерзания почв к северу. Роль криогенного фактора в формировании такого типа CRM структуры отмечена в работах многих авторов [5, 8, 10]. Наиболее предрасположены по своим свойствам к мерзлотному оструктурированию почвообразующие породы легкосуглинистого гранулометрического состава. Присутствие в них фракции крупной пыли способствует более активному дроблению твердой фазы почвы при промораживании благодаря созданию системы достаточно крупных пор [4]. Именно в них в первую очередь начинает замерзать вода при температурах, близких к нулевым (чем тоньше поры, тем ниже температура замерзания воды). Общая мощность горизонтов с криометаморфическим оструктурированием (горизонт CRM) в исследуемых светлосемах достигает 120 см. В настоящее время в связи с глобальными климатическими изменениями [26], криометаморфические горизонты, не подверженные процессам длительного промерзания, являются своего рода реликтовыми образованиями, оставшимися от прошлых климатических периодов, характеризующихся более холодными температурными условиями [13].

Все рассмотренные почвы характеризуются повышенной кислотностью, с минимальными значениями величины рН КС1-вытяжки в верхних подстильно-торфяных (рН 2.48–3.60) горизонтах, что может быть связано с высоким содержанием здесь ненасыщенных низкомолекулярных органических кислот [19]. Почвы южной и средней тайги (Haplic Albic Retisol) характеризуются более четкой дифференциацией профиля по содержанию частиц илистой фракции и содержанию обменных оснований. В почвах северной части региона (Histic Gleyic Stagnosols) содержание обменных оснований низкое по всему профилю. Это может быть следствием специфики минералогического и химического составов почвообразующих пород. К северу вследствие более суровых климатических условий усиливается фульватный характер почвенного органического вещества, и возрастает потечность гумусовых соединений [1, 6]. Значительная часть высоко- и низкомолекулярных органических кислот, поступающих из подстилки, осаждается ниже по профилю в форме алюмо- и железо-гумусовых соединений, фиксируемых по высокому содержанию оксалатнорастворимых соединений железа по Тамму.

Реологические свойства почв. Данные реологических исследований представлены в табл. 3. Буквенные обозначения (а–е) отражают значимые ($p < 0.05$) различия между горизонтами почв на основе Post-hoc анализа по критерию Тьюки. Установлено, что в текстурно-дифференцированных

почвах (дерново-подзолистые слабogleеватые и глееватые) южной тайги (ключевой участок KS-I) наиболее жесткие межчастичные контакты (G' до 1.10 МПа) формируются в верхней части профиля почв (горизонты AYg, ELg, BELg), в области накопления гумуса, низкомолекулярных органических веществ и органо-минеральных альфегумусовых соединений. Это согласуется с данными работ [29, 33], отмечавших появление значительной жесткости в межчастичных взаимодействиях при накоплении в почвах дитионито-растворимых форм железа. Существенный вклад в повышение жесткости межчастичных контактов в рассмотренных дерново-подзолистых слабogleеватых и глееватых почвах может вносить сезонное промерзание. По данным температурных наблюдений, почвы на участке KS-I находятся в мерзлом состоянии до глубины 30 см в течение 100–128 сут [7]. Промораживание почв способствует уплотнению частиц и формированию более прочных конденсационных типов межчастичных контактов. Альфегумусовое иллювиирование, а также процессы промерзания способствуют созданию жестких, но более хрупких межчастичных связей, которые резко разрушаются при превышении механической нагрузки и долго восстанавливаются после снятия нагрузки. На это указывает узкий линейный диапазон вязкоупругого поведения в горизонтах AYg, ELg, BELg, фиксируемый по параллельному ходу кривой G' в области линейной вязкоупругости LVE-range. Исключением является гумусово-аккумулятивный (AYg) горизонт почвы L-3, в котором, несмотря на высокое содержание альфегумусовых соединений (железо по Тамму до 1.82%), отмечаются низкие значения жесткости контактов (G' 0.404 МПа) и высокие величины упругой (LVE-range $7.3 \times 10^{-3}\%$) и пластичной (Crossover 6.21%) деформации. Такой результат обусловлен повышенным содержанием слаборастворившихся органических остатков – количество общего углерода в горизонте AYg достигает 9.2%. Сцепленные органические компоненты действуют подобно пружине, увеличивая упругое сопротивление почвы. При этом значительно снижается общая жесткость межчастичных контактов (G'). Повышенные значения пластичности в элювиальных горизонтах ELg обеих почв до 5.18 (L-2) и 6.19% (L-1) обусловлены слабой агрегированностью данных горизонтов. Дезагрегированные горизонты имеют более высокое количество межчастичных контактов, что отражается на реологических показателях в виде высоких значений диапазона пластичности (Crossover). Высокая жесткость контактов (G') постепенно ослабляется вниз по профилю до 0.44 МПа. Величины пластичности (Crossover) при этом выходят на средние по профилю значения – 3.48%, в то время как значения упругой деформации (LVE-range), наоборот, увеличиваются до $7.26 \times 10^{-3}\%$ в горизонтах ВТ и

Таблица 3. Реологические свойства почв

Горизонт	Глубина, см	Линейный диапазон вязкоупругой деформации LVE-range, $x \times 10^{-3} \%$	Модуль запаса G', МПа	Предел пластичности Crossover, %	Integral Z	Горизонт	Глубина, см	Линейный диапазон вязкоупругой деформации LVE-range, $x \times 10^{-3} \%$	Модуль запаса G', МПа	Предел пластичности Crossover, %	Integral Z
KS-V. Лесотундра											
Разрез R-4-Н. Светлозем торфянистый потечно-гумусовый глееватый (Histic Gleyic Stagnosols)						Разрез R-4-2. Светлозем торфяный потечно-гумусовый глееватый (Histic Gleyic Stagnosols)					
ELhi,g	13–17	3.28 ± 0.40 ^a	1.08 ± 0.14 ^a	1.95 ± 0.23 ^a	1.10 ± 0.14 ^a	ELhi,g	25–29	1.5 ± 0.20 ^a	1.23 ± 0.16 ^a	3.06 ± 0.36 ^a	2.24 ± 0.29 ^a
ELhi,g	17–25	1.50 ± 0.20 ^b	1.26 ± 0.16 ^a	6.04 ± 0.71 ^b	4.50 ± 0.59 ^b	Verm,g	29–40	2.2 ± 0.30 ^a	1.26 ± 0.20 ^a	6.35 ± 0.74 ^b	4.44 ± 0.58 ^b
Verm,g	25–41	2.21 ± 0.29 ^b	1.38 ± 0.18 ^a	1.35 ± 0.16 ^a	1.02 ± 0.13 ^a	CRMg	40–65	3.3 ± 0.40 ^b	1.55 ± 0.20 ^a	1.85 ± 0.22 ^c	1.13 ± 0.15 ^a
CRMg	41–70	2.20 ± 0.29 ^b	2.10 ± 0.27 ^b	1.16 ± 0.14 ^a	0.93 ± 0.12 ^a	Dg	65–80	1.5 ± 0.20 ^a	1.71 ± 0.22 ^a	1.72 ± 0.20 ^c	1.09 ± 0.14 ^a
BCg	70–90	2.20 ± 0.29 ^b	2.16 ± 0.28 ^b	1.11 ± 0.13 ^a	0.73 ± 0.09 ^a						
KS-IV. Крайнесеверная тайга											
Разрез R-42. Светлозем торфянистый потечно-гумусовый глееватый (Histic Gleyic Stagnosols)						Разрез R-71. Светлозем торфяный потечно-гумусовый глееватый (Histic Gleyic Stagnosols)					
ELhi,g	18–20	2.21 ± 0.29 ^a	1.09 ± 0.14 ^{ab}	1.58 ± 0.18 ^{ab}	0.92 ± 0.12 ^{ab}	ELhi,g	20–25	3.28 ± 0.43 ^a	1.58 ± 0.20 ^a	0.76 ± 0.09 ^a	0.45 ± 0.06 ^a
ELg,hi	20–30	3.27 ± 0.43 ^a	1.59 ± 0.20 ^c	2.40 ± 0.28 ^c	1.63 ± 0.21 ^c	ELg,hi	25–30	2.20 ± 0.29 ^b	1.33 ± 0.17 ^{ab}	1.64 ± 0.19 ^a	1.02 ± 0.13 ^a
Verm	30–40	2.20 ± 0.29 ^a	1.38 ± 0.18 ^{bc}	1.95 ± 0.23 ^{ac}	1.45 ± 0.19 ^{cd}	Verm	30–40	3.28 ± 0.43 ^a	1.19 ± 0.15 ^{ac}	8.55 ± 1.00 ^b	6.72 ± 0.87 ^b
CRM	50–60	2.21 ± 0.29 ^a	1.22 ± 0.16 ^{bc}	1.49 ± 0.17 ^{ab}	1.14 ± 0.15 ^{ad}	Verm	40–50	1.49 ± 0.20 ^b	1.02 ± 0.13 ^{bc}	1.12 ± 0.13 ^a	0.72 ± 0.09 ^a
BC	60–70	3.28 ± 0.43 ^b	0.96 ± 0.12 ^b	1.23 ± 0.14 ^b	0.78 ± 0.10 ^{ab}	CRM1	50–60	1.49 ± 0.20 ^b	1.35 ± 0.17 ^{ab}	1.62 ± 0.19 ^a	1.05 ± 0.14 ^a
C	70–80	2.20 ± 0.29 ^a	1.50 ± 0.19 ^{ac}	1.41 ± 0.16 ^b	0.99 ± 0.13 ^{ab}	CRM2	60–70	2.21 ± 0.29 ^b	1.28 ± 0.16 ^{ac}	1.26 ± 0.15 ^a	0.80 ± 0.10 ^a
C	80–100	3.28 ± 0.43 ^b	1.18 ± 0.15 ^{bc}	1.23 ± 0.14 ^b	0.70 ± 0.09 ^b	CRM3	70–82	3.28 ± 0.43 ^a	1.14 ± 0.15 ^{ac}	1.33 ± 0.16 ^a	0.76 ± 0.10 ^a
						BCg	82–100	3.28 ± 0.43 ^a	0.84 ± 0.11 ^c	1.74 ± 0.20 ^a	1.02 ± 0.13 ^a
KS-III. Северная тайга											
Разрез R-3-Н. Светлозем торфянистый потечно-гумусовый глееватый (Histic Gleyic Stagnosols)						Разрез R-2. Светлозем торфяный потечно-гумусовый глееватый (Histic Gleyic Stagnosols)					
ELhi,g	17–20	4.88 ± 0.60 ^a	0.77 ± 0.99 ^{ab}	3.37 ± 0.39 ^a	1.78 ± 0.23 ^{ab}	ELhi,g	25–28	3.28 ± 0.40 ^a	0.62 ± 0.08 ^a	2.24 ± 0.26 ^a	1.27 ± 0.17 ^a
ELg	20–30	2.21 ± 0.30 ^{bc}	1.10 ± 0.14 ^{ab}	1.28 ± 0.15 ^{bc}	0.89 ± 0.12 ^{cd}	ELhi,g	28–30	2.21 ± 0.30 ^b	1.14 ± 0.15 ^b	1.16 ± 0.14 ^{ab}	0.27 ± 0.04 ^b
Verm,g	30–40	3.27 ± 0.40 ^c	1.58 ± 0.20 ^{ab}	1.14 ± 0.13 ^{bc}	0.66 ± 0.09 ^{cd}	Verm,g	30–40	1.50 ± 0.20 ^b	1.86 ± 0.24 ^c	0.58 ± 0.07 ^b	0.36 ± 0.05 ^b
Verm,g	40–50	1.50 ± 0.20 ^b	1.79 ± 0.23 ^{ac}	1.98 ± 0.23 ^c	1.85 ± 0.24 ^a	Verm,g	40–50	2.20 ± 0.30 ^b	1.33 ± 0.17 ^b	1.18 ± 0.14 ^{ab}	0.77 ± 0.10 ^{ab}

BCg. Такое изменение реологических свойств обусловлено постепенным ослаблением с глубиной педогенных процессов и проявлением в большей степени реологических свойств, связанных (опосредованно) с гранулометрическим и минералогическим составом почвообразующей породы. Текстурированный горизонт BT и материнская порода BCg отличаются более тяжелым гранулометрическим составом, высокой степенью насыщенности основаниями, способствующими повышенному накоплению влаги. Последняя увеличивает расстояние между почвенными частицами, ослабляя тем самым жесткость межчастичного взаимодействия [15, 40]. Таким образом, в профиле полугидроморфных почв южной тайги наиболее высокими показателями структурного взаимодействия (Integral Z) характеризуются иллювиальные текстурные горизонты BT за счет повышенной упругости и пластичности межчастичных контактов. В верхней части профиля почв структурная устойчивость почв к механическим нагрузкам ограничивается хрупкостью формирующихся контактов и слабыми внутриагрегатными связями.

В условиях средней тайги (ключевой участок KS-II) наиболее жесткие межчастичные взаимодействия (G 1.71 МПа) формируются в верхней части профиля полугидроморфных почв – в горизонтах ELhi,g и ELg (табл. 3). Аналогично почвам южной тайги повышенная жесткость почвенных контактов обусловлена здесь накоплением альфегумусовых соединений, а также процессами промерзания, которые способствуют формированию прочных конденсационных взаимодействий с низкими значениями упругого деформирования и пластичности. По данным наблюдений за динамикой температуры [11], промерзание почв на данном участке достигает 24 см. Исключением является верхний горизонт ELhi,g (24–32 см) профиля торфяно-подзолисто-глеевой почвы (R-3-P), где при низких величинах жесткости (G' 0.50 МПа) отмечаются повышенные значения упругой деформации (LVE-range $7.3 \times 10^{-3}\%$) и пластичности (Crossover 4.16%). Как отмечалось ранее, это обусловлено повышенным накоплением в данном горизонте слабаразложившихся органических веществ ($C_{\text{общ}}$ до 11.8%). Наиболее жесткие контакты в профиле этой почвы (R-3-P) формируются в горизонте BELg (43–56 см), который характеризуется высоким содержанием оксалатнорастворимых форм железа (Fe_2O_3 по Тамму до 0.98%). Аналогично почвам южной тайги вниз по профилю рассматриваемых почв участка KS-2 отмечается ослабление жесткости межчастичных контактов (G' 0.59 МПа) при возрастании линейного диапазона вязкоупругой деформации (LVE-range $4.88 \times 10^{-3}\%$). Последнее связано с постепенным утяжелением гранулометрического состава породы. Как можно заметить, профиль полугидроморфной почвы R-3-P

отличается более высокими показателями пластичности (Crossover до $-2.34-5.18\%$) и, соответственно, структурного взаимодействия (Integral Z 1.39–3.28). В почве R-8-H значения Crossover находятся в пределах 1.15–2.05%, значения Integral Z 0.67–1.16. Повышенный показатель пластичности и структурного взаимодействия Integral Z в профиле R-3-P, вероятно, обусловлен более слабыми внутриагрегатными связями вследствие более длительного переувлажнения. Переувлажнение, сопровождаемое активацией процессов оглеения, приводит к значительной деградации почвенных агрегатов. При механическом воздействии агрегаты легко разрушаются до более мелких частиц с возрастанием площади межчастичных контактов (аналогично ELg горизонтам южной тайги KS-1), что при механических испытаниях проявляется в виде увеличения диапазона пластичности и, соответственно, величины структурного взаимодействия Integral Z. Таким образом, с точки зрения почвоведения в данном случае высокие показатели Crossover и Integral Z отражают не повышение, а снижение качества и устойчивости структуры почв.

В реологическом поведении переувлажненных криометаморфических почв – светлосемов торфяных и торфянистых потечно-гумусовых глееватых (Histic Gleyic Stagnosols) северной тайги (участок KS-III), в отличие от аналогичных по характеру увлажнения почв южной и средней тайги (Haplic Albic Retisol), более значимую роль начинают играть глее-альфегумусовые процессы миграции и накопления органических веществ иллювиальной природы в комплексе с органо-минеральными соединениями железа и алюминия, а также более интенсивные процессы промерзания почв. В профиле разреза R-3-H максимально высокие значения жесткости межчастичных контактов (G' до 2.76 МПа) приурочены к горизонту CRMlg (50–60 см), отличающемуся наиболее высоким содержанием альфегумусовых комплексов (Fe_2O_3 по Тамму до 0.51%). Во второй исследованной на этом участке почве (разрез R-2) аналогичное повышение жесткости наблюдали в горизонте Bcm,g (30–60 см), что также сопряжено с активным накоплением здесь альфегумусовых соединений (Fe_2O_3 по Тамму до 0.50%). Отчасти, увеличение жесткости в средней части профилей почв R-3-H и R-2 (глубина 50–60 см) может быть связано с воздействием криогенного фактора. Подтверждением этому являются низкие значения линейного диапазона вязкоупругого поведения (LVE-range $2.22 \times 10^{-3}\%$) и пластичности (Crossover 0.54%), что свидетельствует о повышенной хрупкости этих контактов. По данным температурных наблюдений [17], промерзание почв на участке KS-III достигает глубины 20–30 см в течение 2.5 мес. с формированием “нулевой завесы” (продолжительный период с температурами около нуля в пределах $0 \pm 0.1^\circ C$) до

глубины 30–40 см. В верхних элювиальных потечно-гумусовых горизонтах ELhi,g низкая жесткость контактов (G' 0.77 МПа) при высоких показателях линейного диапазона вязкоупругого поведения (LVE-range – 3.28×10^{-3} – $4.88 \times 10^{-3}\%$) и пластичности (Crossover 3.36%) обеспечивается присутствием значительного количества слабо разложившихся органических остатков ($C_{\text{общ}}$ 7.6–7.8%). Вниз по профилю исследованных почв (R-3-Н и R-2) жесткость контактов постепенно снижается, достигая наименьших значений в материнской породе Cg (G' 0.70 МПа). Горизонт CRM2g (60–80 см) в профиле R-3-Н характеризуется резким увеличением значений пластичности (Crossover – 6.59%), что отражается и на высоких показателях структурного взаимодействия (Integral Z 4.84). В профиле R-2 аналогичное увеличение этих параметров (Crossover 6.10%, Integral Z 4.48) происходит в горизонте BCg (90–110 см). Однако, как указано ранее, повышенная пластичность этих горизонтов может быть обусловлена интенсивным распадом микроагрегатов вследствие активного разрушения и выноса пленок аморфного железа в результате усиления процессов оглеения при переувлажнении.

В полугидроморфных почвах (разрезы R-42 и R-71), формирующихся в подзоне крайне северной тайги (участок KS-IV), высокие показатели жесткости контактов характерны для всего профиля с наиболее высокими значениями в верхней и средней части профиля. В почве, вскрытой разрезом R-42, максимальные значения жесткости контактов (G' до 1.58 МПа) отмечены в горизонтах ELhi,g (20–30 см) и Bcgm (30–40 см), характеризующихся высоким накоплением оксиднорастворимых форм железа (Fe_2O_3 по Тамму до 0.73%). В профиле почвы R-71 аналогичное увеличение жесткости наблюдали в горизонтах ELhi,g (20–30 см) и CRM1 (50–60 см). Показатели линейного диапазона вязкоупругого поведения (LVE-range) и пластичности (Crossover) в почвах R-42 и R-71 не превышают соответственно 3.28×10^{-3} и 2.40%, что позволяет говорить о преобладании по всему профилю упруго-хрупких межчастичных взаимодействий. Наиболее высокие значения пластичности (Crossover – 8.55%) зафиксированы в горизонте BELg (30–40 см) профиля почвы R-71, что, вероятно, связано с интенсивным распадом почвенных микроагрегатов со слабыми внутриагрегатными связями. Этому может способствовать низкое содержание в данном горизонте илистой фракции – до 12%.

В полугидроморфных почвах, формирующихся в лесотундровой зоне (KS-V) – переходной зоне от тайги к тундре, профильное распределение величин жесткости (G') контактов идет от минимальных значений в верхней части профиля до максимальных в нижней части. Так же, как в полугидроморфных условиях северной и крайне северной

тайги, низкая жесткость верхних элювиальных горизонтов ELhi,g в профиле исследованных почв R-4-Н и R-4-2 обусловлена аккумуляцией органического вещества иллювиальной природы и слабо разложившихся растительных остатков ($C_{\text{общ}}$ до 2%). Накопление органо-минеральных соединений железа в нижней части профилей почв R-4-Н и R-4-2, в сочетании с более глубоким проникновением отрицательных температур в условиях лесотундры, способствует формированию в горизонтах CRMg, BCg и Dg почвенных контактов с более высокими значениями жесткости (G') – до 2.16 МПа. При этом зафиксированные практически почти по всему профилю рассмотренных почв крайне низкие значения предела пластичности (Crossover 1.11–1.95%) и линейного диапазона вязкоупругого поведения (LVE-range 1.5×10^{-3} – $2.2 \times 10^{-3}\%$) свидетельствуют о значительной хрупкости и слабой устойчивости к механическим нагрузкам формирующихся здесь почвенных контактов. Исключением являются элювиальный горизонт ELhi,g (17–20 см) в профиле почвы R-4-Н и криометаморфический горизонт Bcgm,g (29–40 см) в профиле почвы R-4-2, для которых отмечены повышенные значения пластичности (Crossover соответственно до 6.0 и 6.4%) и, как следствие, высокие показатели структурного взаимодействия (Integral Z 4.4–4.5). Как показано ранее, высокие значения Integral Z в данных условиях являются не свидетельством повышенной устойчивости микроструктуры, а результатом активного распада микроагрегатов со слабыми межчастичными связями. Процессы разрушения микроагрегатов обусловлены низким содержанием в данных горизонтах илстых частиц и обменных оснований, а также глеевой мобилизацией и выносом альфегумусовых пленок с поверхности микроагрегатов. Низкая прочность почвенных контактов в сочетании со слабой упругостью обуславливает быстрый переход горизонтов ELhi,g и Bcgm,g при механическом воздействии из твердообразного в текучее состояние. Подтверждением этому являются и полевые морфологические описания – в переувлажненном состоянии горизонты ELhi,g и Bcgm,g полугидроморфных почв лесотундры (R-4-Н и R-4-2) имеют студнеобразное состояние, при постукиваниях лопатой проявляют тиксотропность и текучесть.

Таким образом, проведенные исследования на примере широкого ряда полугидроморфных почв от южной тайги до лесотундры позволили выявить некоторые особенности реологического поведения почв, связанные со спецификой их водного режима (периодическое поверхностное переувлажнение), физико-химическими свойствами и температурными условиями. В разных подзонах тайги эти особенности имеют сходный характер. Наиболее жесткие межчастичные взаимодействия формируются в горизонтах с повышенным

накоплением иллювиальных органических веществ фульватной природы и органо-минеральных альфегумусовых соединений. В полугидроморфных почвах жесткость микроструктурных взаимодействий снижена в горизонтах с повышенным накоплением слаборазложившихся органических остатков. В то же время в условиях переувлажнения отдельные горизонты почв проявляют повышенные показатели пластичности (Crossover) и величины структурного взаимодействия (Integral Z). Однако это увеличение не отражает высокую структурную устойчивость полугидроморфных почв, а является, вероятно, результатом деградации почвенных микроагрегатов и более интенсивным их распадом при механическом воздействии. Этот вопрос требует дальнейших исследований.

Особенности реологических свойств почв разных подзон тайги. Анализ реологических данных выявил некоторые особенности в реологическом поведении исследуемых почв в ряду от южной тайги до лесотундры. Оценка реологического поведения в ряду рассмотренных полугидроморфных почв показала заметное снижение устойчивости почвенной микроструктуры при продвижении от южной до крайне северной тайги и лесотундры с формированием жестких, но более хрупких межчастичных

взаимодействий. Как видно из рис. 2 и 3, наиболее четко эта тенденция прослеживается в минеральной части, в текстурно-дифференцированных и криометаморфических (BT-CRM) горизонтах почв. Средние значения модуля запаса G' (рис. 2b) увеличиваются от 0.61–0.64 (южная тайга) до 1.55–2.10 МПа (лесотундра). Параллельно отмечается снижение значений линейного диапазона вязкоупругого поведения (LVE-range) до величин менее $2.20 \times 10^{-3}\%$ и пластичности (Crossover) – менее 1.16% (рис. 2a, 2c), что свидетельствует о повышенной хрупкости формирующихся к северу таежной зоны межчастичных почвенных взаимодействий. Наиболее высокие средние по профилю значения показателей структурного взаимодействия (Integral Z) отмечены для почв южной тайги – до 2.01–2.42, к северу данный показатель имеет тенденцию к снижению с наименьшим значением (0.87) в почве крайне северной тайги R-42. Усиление жесткости почвенных контактов к северу обусловлено активным поступлением в профиль почв подвижных органических веществ, в том числе комплексных альфегумусовых соединений, а также усилением процессов промерзания. К северу возрастает фульватный характер гумуса, усиливается его потечность, что в совокупности с более

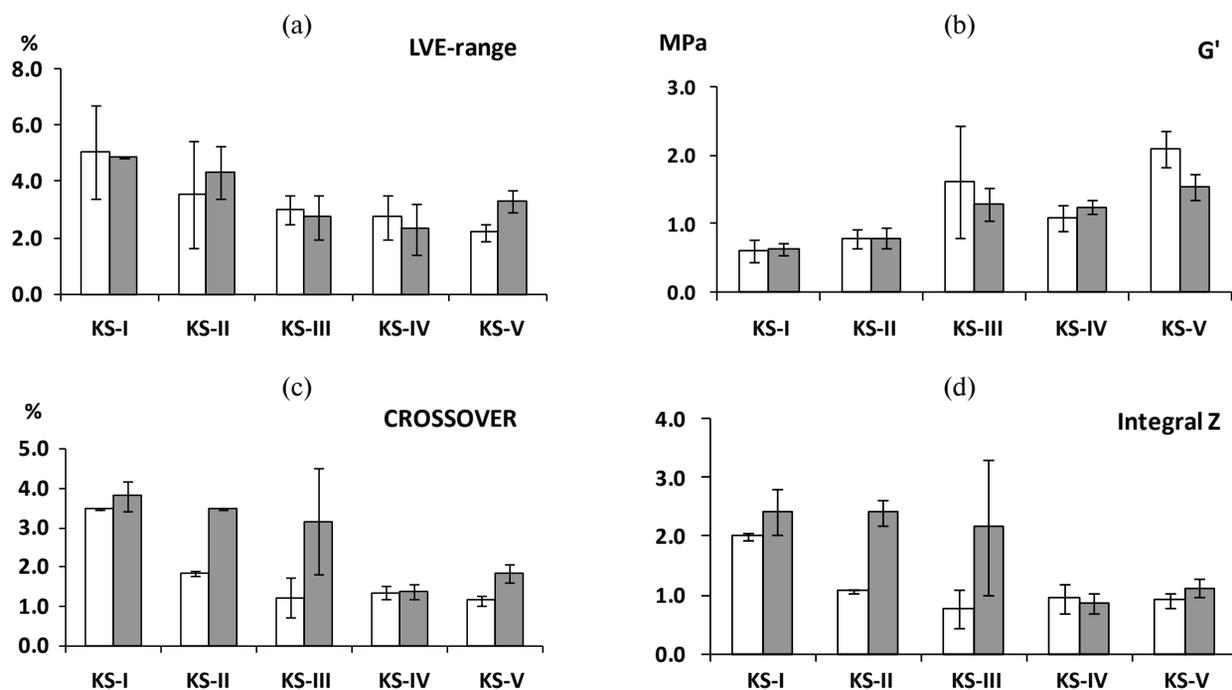


Рис. 2. Распределение реологических параметров (a – LVE-range, %, b – G' , МПа, c – Crossover, %, d – Integral Z) в текстурно-дифференцированных и криометаморфических горизонтах почв ключевых участков разных подзон: KS-I – южная тайга (горизонт BT), KS-II – средняя тайга (горизонт BT), KS-III – северная тайга (горизонт CRM), KS-IV – крайне северная тайга (горизонт CRM), KS-V – лесотундра (горизонт CRM).

□ – соответственно почвы L-1, R-8-H, R-3-H, R-42, R-4-H.

■ – соответственно почвы L-3, R-3-P, R-2, R-71, R-4-2.

“усы” – стандартное отклонение.

легким гранулометрическим составом почвообразующих пород способствует увеличению в профиле почв мощности слоя с более высокими показателями жесткости почвенных контактов. В серогумусовых (AYg) и потечно-гумусовых (ELhi,g) горизонтах изменение реологических параметров (рис. 3) в большей мере зависит от содержания органического вещества. В ряду почв L-3, R-3-P, R-2, R-71, R-4-2 средние значения модуля запаса G' (рис. 3b) увеличиваются от 0.40–0.99 (южная тайга) до 1.08–1.23 МПа (лесотундра). Значения линейного диапазона вязкоупругого поведения (LVE-range) снижаются до величин менее $1.50 \times 10^{-3}\%$ (лесотундра), величины пластичности (Crossover) и Integral Z – менее 0.76% и 0.45 (крайне северная тайга) (рис. 3a, 3c, 3d). В ряду почв L-1, R-8-H, R-3-H, R-42, R-4-H значения модуля запаса G' меняются в пределах 0.77–1.71 МПа, значения линейного диапазона вязкоупругого поведения (LVE-range) – от 2.20×10^{-3} до $4.88 \times 10^{-3}\%$.

В почвах южной (разрез L-1, L-3) и средней (R-8-H, R-3-P) тайги жесткие межчастичные контакты со значениями G' более 1.0 МПа приурочены только к верхней и средней части профиля (до глубины 53–56 см), в почве северной (R-3-H, R-2), крайне северной тайги (R-42, R-71) и лесотундры

(R-4-H, R-4-2) относительно повышенной прочностью межчастичных взаимодействий отличается весь профиль до глубины более 100 см. Результаты статистической обработки полученного массива данных, выполненные методом главных компонент, показали достаточно четкое разграничение по реологическим параметрам текстурно-дифференцированных ВТ горизонтов полугидроморфных почв южной и средней тайги от криометаморфических горизонтов CRM светлоземов торфяных и торфянистых, представленных в северной части таежной зоны и лесотундры (рис. 4). Видно, что особенности реологического поведения криометаморфических горизонтов (CRM) определяются величиной жесткости межчастичных почвенных контактов – G' . Напротив, реологические свойства текстурно-дифференцированных горизонтов (ВТ) в большей степени определяются значениями линейного диапазона вязкоупругого поведения (LVE-range) и пластичной деформации (Crossover). Как уже отмечалось выше, характер реологического поведения во многом обусловлен физико-химическими свойствами почвы и почвообразующей породы. Расчет коэффициента корреляции Пирсона (табл. 4) выявил наиболее высокую взаимосвязь линейного диапазона вязкоупругой деформации

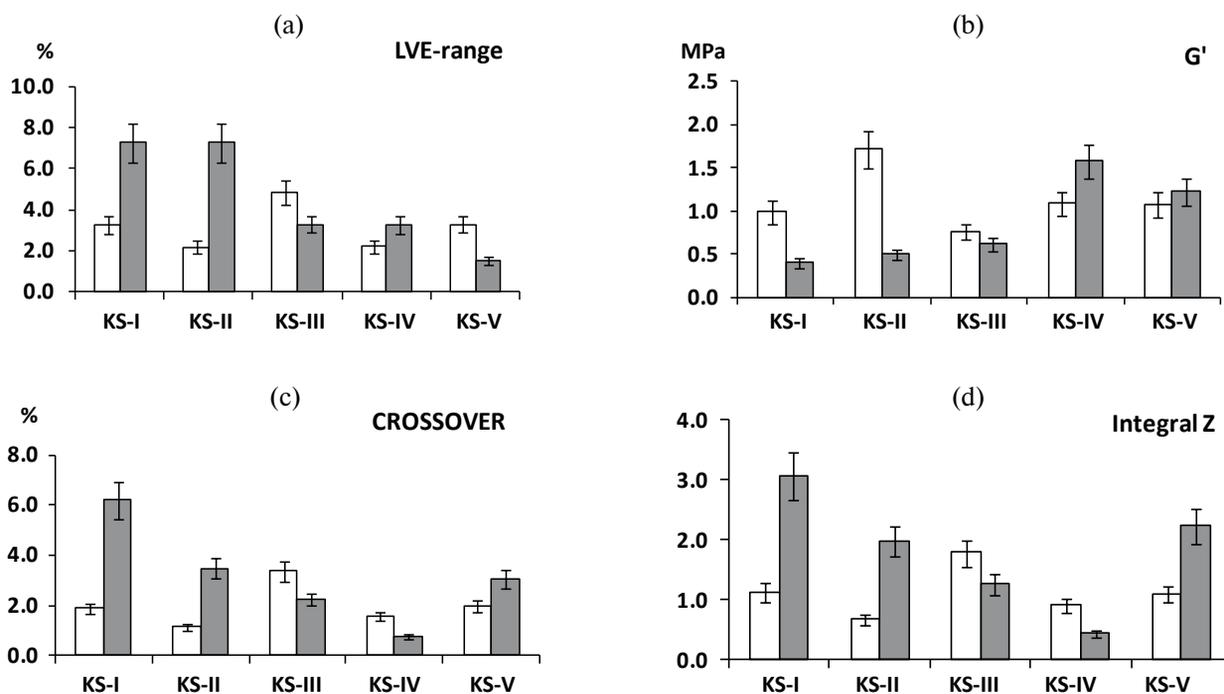


Рис. 3. Распределение реологических параметров (а – LVE-range, %, б – G' , МПа, в – Crossover, %, д – Integral Z) в гумусоаккумулятивных и потечно-гумусовых горизонтах почв ключевых участков разных подзон: KS-I – южная тайга (горизонт AYg), KS-II – средняя тайга (горизонт ELhi,g), KS-III – северная тайга (горизонт ELhi,g), KS-IV – крайне северная тайга (горизонт ELhi,g), KS-V – лесотундра (горизонт ELhi,g).

□ – соответственно почвы L-1, R-8-H, R-3-H, R-42, R-4-H.

■ – соответственно почвы L-3, R-3-P, R-2, R-71, R-4-2.

“усы” – стандартное отклонение.

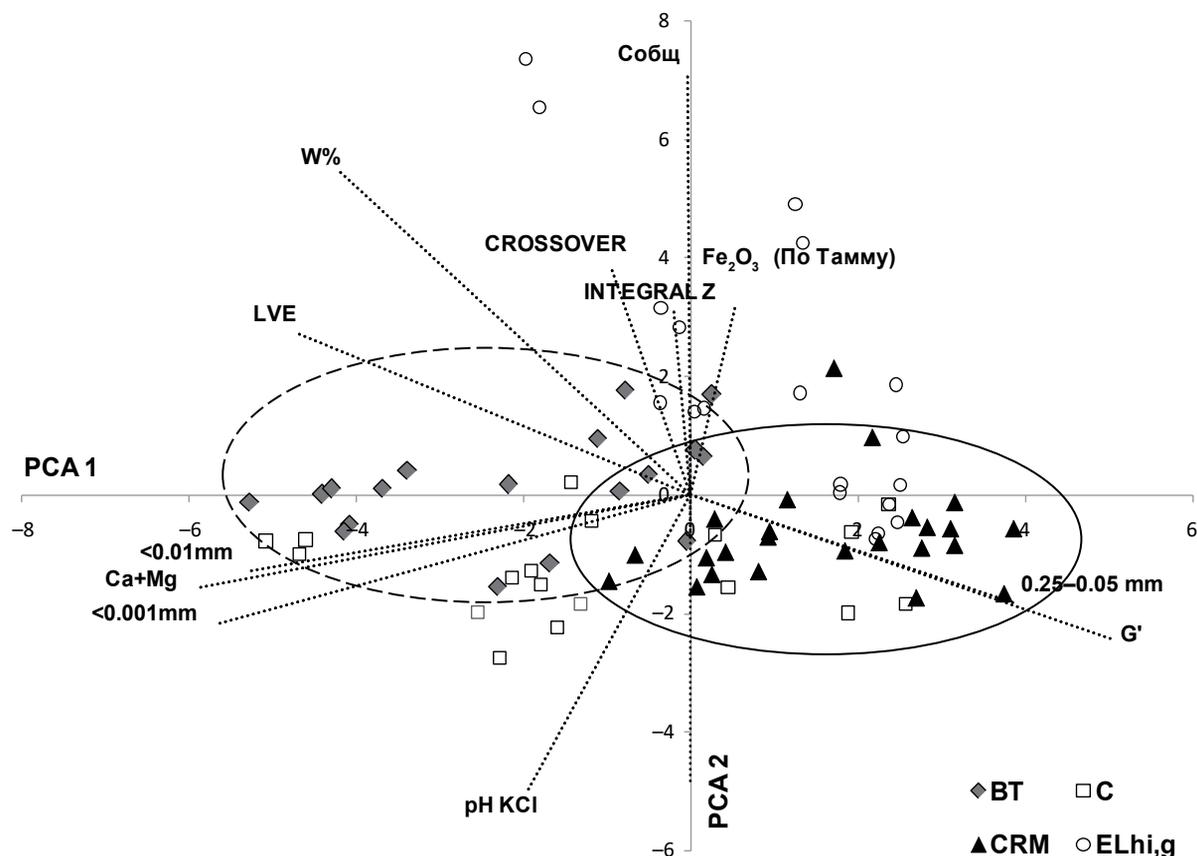


Рис. 4. Результаты PCA ординации основных диагностических почвенных горизонтов (ELhi.g, BT, CRM, C) с использованием матрицы парных корреляций. Доля объясненной дисперсии для PCA1 – 32%, для PCA2 – 19%. Вектор корреляции – указывает на реологический параметр (G' , Integral Z, Crossover, LVE), с которым наиболее тесно коррелируют физико-химические свойства исследуемых горизонтов почв, что визуально отражается на графике в виде их группировки в направлении вектора корреляции.

(LVE-range) с содержанием в почве обменных оснований ($r = 0.57, p < 0.001$), частиц илстой фракции ($r = 0.44, p < 0.001$) и величиной влажности ($r = 0.7, p < 0.001$).

Аналогичные тесные взаимосвязи, но уже с отрицательной связью, установлены для величины жесткости (G') межчастичных почвенных контактов с величиной влажности ($r = -0.63, p < 0.001$), содержанием обменных оснований ($r = -0.63, p < 0.001$) и частиц илстой фракции ($r = -0.53, p < 0.001$). Корреляция величины G' с фракцией мелкого песка ($r = -0.48, p < 0.01$), вероятно, обусловлены тем, что содержание частиц мелкого песка обратно взаимосвязано с количеством частиц илстой фракции.

Для величины предела пластичной деформации (Crossover) и показателя структурного взаимодействия (Integral Z) четко выраженной связи с какими-либо физико-химическими параметрами в исследуемых почвах не обнаружено, кроме слабой отрицательной корреляции с величиной pH_{KCl}

и фракцией мелкого песка. Статистический анализ показал, что более тяжелая по гранулометрическому составу почвообразующая порода с высоким содержанием обменных оснований способствует увеличению упругого сопротивления почвенной структуры в начале деформационного воздействия, при преодолении которого (по мере увеличения нагрузки) система переходит в упруго-вязкое или пластичное состояние. При этом такая почва характеризуется менее жесткими почвенными контактами. Более легкие по гранулометрическому составу криометаморфические горизонты отличаются более плотными и жесткими межчастичными контактами.

Таким образом, несмотря на близость полугидроморфных текстурно-дифференцированных и криометаморфических почв по морфологическому строению и физико-химическим характеристикам, они достаточно различаются по реологическим параметрам, особенно горизонты BT и CRM. Это может быть использовано при диагностике и классификации подзолистых и

Таблица 4. Расчет коэффициентов корреляции Пирсона для полученного массива данных о свойствах зонального ряда полугидроморфных таежных почв, $n = 79$

Реологический параметр	R							
	C _{общ.} , %	Fe ₂ O _{3(д)} , % ^a	ΣCa+Mg смоль(+)/кг ^b	pH _{KCl}	влажность, %	Σчастиц, %		
						0.25–0.05 мм	<0.001 мм	<0.01 мм
Модуль запаса G' , МПа	–0.23*	–0.3**	–0.63***	–0.12	–0.63***	0.5***	–0.53***	–0.48**
Линейный диапазон вязкоупругой деформации LVE-range, %	0.34**	0.32**	0.57***	0.14	0.7***	–0.31**	0.44***	0.38***
Диапазон пластичной деформации или точка Crossover, %	0.07	0.17	0.11	–0.31**	0.17	–0.26*	–0.06	0.01
Величина Integral Z	–0.03	0.11	0	–0.26*	0.02	–0.2*	–0.13	–0.04

* Уровень значимости ($p < 0.05$), ** – уровень значимости ($p < 0.01$), *** – уровень значимости ($p < 0.001$), без знака * корреляция не значима ($p > 0.05$),

^a По Джексону, %, ^b – сумма обменных оснований Ca²⁺ + Mg²⁺, смоль(+)/кг.

криометаморфических почв. В исследуемом ряду полугидроморфных таежных почв наиболее устойчивые к механическим нагрузкам межчастичные почвенные взаимодействия (с наиболее широким линейным диапазоном вязкоупругой и пластичной деформации) формируются в текстурно-дифференцированных почвах южной тайги, чему способствует более тяжелый гранулометрический состав почвообразующей породы, насыщенной обменными основаниями. Аналогичная закономерность выявлена ранее в исследованиях, выполненных на примере таежных почв от южной тайги до лесотундры, формирующихся в хорошо дренируемых условиях [18]. Однако почвенные контакты в автоморфных условиях отличаются еще более жестким характером – с менее высокими значениями упругости и пластичности и более высокими величинами жесткости.

В условиях севера при повышенной влажности и низкой насыщенности почв основаниями альфегумусовые соединения способствуют увеличению значительного запаса структурной прочности. Они – основной связующий материал для почвенных частиц в процессе микроагрегатобразования. Характерной чертой отдельных горизонтов полугидроморфных почв (AYg, ELg – KS-I, BELg – KS-II, CRM3g, BCg – KS-III, Bcrn – KS-IV, Bcrmg, ELhi,g – KS-V) можно считать наличие повышенного показателя пластичности, который отражается в значительной склонности

этих горизонтов к пластичности и плавунности. Высокие показатели пластичности обусловлены, вероятно, деградацией и более интенсивным разрушением почвенных микроагрегатов, что сопряжено с низким содержанием здесь илистых частиц и обменных оснований, а также глеевой мобилизации и выносом альфегумусовых пленок с поверхности микроагрегатов. Жесткие и слабоупругие контакты обладают узким пределом пластичного деформирования, быстро разрушаются при нагрузках, слабо восстанавливаясь в течение длительного времени после их снятия. Деагрегированные почвы более склонны к процессам эрозии и смыва, однако мощный мохово-торфяной горизонт, формирующийся в верхней части профиля полугидроморфных почв, предохраняет их от негативных деформационных явлений.

Полученные данные согласуются с результатами исследований реологических характеристик заболоченных почв в прибрежной зоне р. Эльбы [41]. Авторы отмечают положительную роль органических веществ, карбонатов и органично-минеральных соединений железа в сохранении устойчивости почв к механическим нагрузкам. К неблагоприятным факторам, снижающим прочностные и упругие свойства микроструктуры почв, исследователи относят переувлажненность и повышенное содержание в почвенно-поглощающем комплексе ионов натрия.

ВЫВОДЫ

1. Различия в характере межчастичных почвенных связей и механических свойствах (упругость, вязкость, пластичность) в верхних серогумусовых (AYg) и иллювиально-гумусовых (ELhi.g) горизонтах исследуемых почв связаны преимущественно с содержанием органических веществ. Реологические особенности диагностических горизонтов (BT и CRM) в средней части профиля почв обусловлены как физико-химическими свойствами, так и климатическими и гидрологическими условиями формирования почв.

2. Наиболее жесткие межчастичные контакты со значениями G' более 1.0 МПа формируются в горизонтах с высоким содержанием гумусовых веществ и органо-минеральных альфегумусовых соединений иллювиальной природы (ELhi.g–ELg–CRM). Повышенная жесткость структуры обусловлена цементацией почвенных частиц органо-минеральными соединениями с формированием слабоупругих межчастичных контактов, а также конденсационным уплотнением частиц в процессе промерзания–оттаивания. Устойчивость жесткого межчастичного взаимодействия ограничивается повышенной хрупкостью с узким пределом пластичности (Crossover <3.48%) и линейного диапазона вязкоупругого деформирования (LVE-range < $3.28 \times 10^{-3}\%$). Такие контакты резко разрушаются при механическом воздействии и долго восстанавливаются после снятия нагрузки.

3. В отдельных горизонтах полугидроморфных почв наблюдается значительное увеличение значений диапазона пластичности (AYg, ELg – KS-I, BELg – KS-II, CRM3g, BCg – KS-III, Bcrmg – KS-IV, ELhig – KS-V) до 6.5–8.5% и показателя структурного взаимодействия (Integral Z) почв до 4.84–6.72, которое является следствием деградации и более интенсивного разрушения микроагрегатов.

4. В направлении от полугидроморфных текстурно-дифференцированных почв южной и средней тайги к полугидроморфным криометаморфическим почвам северной, крайне северной тайги и лесотундры наблюдается усиление жесткости межчастичных почвенных контактов G' от 0.61 (южная тайга) до 2.10 МПа (лесотундра), что сопряжено с более активным поступлением органических веществ фульватной природы, в том числе комплексных альфегумусовых соединений, а также длительным промерзанием почв, охватывающим профиль почв на большую глубину.

5. Уменьшение в ряду полугидроморфных почв от южной тайги к лесотундре величины линейного диапазона вязкоупругой деформации (LVE-range) до значений < $2.20 \times 10^{-3}\%$ и пластичной деформации (Crossover) <1.16% свидетельствует о снижении общей структурной устойчивости северо-таежных

почв и почв лесотундры к механическим нагрузкам по сравнению с почвами южной и средней тайги.

6. Реологические параметры, наряду с физико-химическими свойствами и морфологическими признаками, могут быть использованы для диагностики таежных почв и установления их классификационной принадлежности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН: “Криогенез как фактор формирования и эволюции почв бореальных и арктических экосистем европейского Северо-Востока в условиях современных антропогенных воздействий, глобальных и современных региональных климатических трендов” (регистрационный номер: 12204060023-8).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас почв Республики Коми / Под ред. Добровольского Г.В. и др. Сыктывкар: Коми республиканская типография, 2010. 356 с.
2. Атлас Республики Коми по климату и гидрологии. М.: Дрофа, ДиК, 1997. 116 с.
3. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
4. Вершинин П.В. Почвенная структура и условия ее формирования. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 187 с.
5. Жангуров Е.В., Лебедева (Верба) М.П., Забоева И.В. Микростроение генетических горизонтов автоморфных таежных почв Тимана // Почвоведение. 2011. № 3. С. 288–299. <https://doi.org/10.1134/S1064229311030203>
6. Забоева И.В. Почвы и земельные ресурсы Коми АССР. Сыктывкар: Коми книжное издательство, 1975. 344 с.
7. Канев В.В. Параметры оглеения и подзолообразования в почвах на покровных суглинках северо-востока Русской равнины. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 221 с.
8. Конищев В.Н., Рогов В.В. Влияние криогенеза на глинистые минералы // Криосфера Земли. 2008. Т. 12. № 1. С. 51–58.
9. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
10. Лепорский О.Р., Седов С.Н., Шоба С.А., Бганцов В.Н. Роль промораживания в разрушении первичных

- минералов подзолистых почв // Почвоведение. 1990. № 6. С. 112–116.
11. Мокиев В.В. Промерзание почв как результативный признак метеорологических показателей холодного периода года (на примере промерзания освоенной и целинной суглинистых почв средне-таежной подзоны Республики Коми) // Вестник Ин-та биологии. 2009. № 5. С. 16–19.
 12. Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
 13. Русанова Г.В., Лантева Е.М., Пастухов А.В., Каверин Д.А. Современные процессы и унаследованные педогенные признаки в почвах на покровных суглинках южной тундры // Криосфера Земли. 2010. Т. 14. № 3. С. 52–60.
 14. Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Воробьевой Л.А. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
 15. Хайдапова Д.Д., Честнова В.В., Шеин Е.В., Милановский Е.Ю. Реологические свойства черноземов типичных (Курская область) при различном землепользовании // Почвоведение. 2016. № 8. С. 955–963.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X16080049>
 16. Хайдапова Д.Д., Милановский Е.Ю., Бутылкина М.А., Шеин Е.В., Дембовецкий А.В. Практикум по физике твердой фазы почв. М.: Буки Веди, 2022. 132 с.
 17. Холопов Ю.В., Хайдапова Д.Д., Лантева Е.М. Реологические свойства северотаежных автмоорфных и полугидроморфных криометаморфических почв европейского северо-востока России (Республика Коми) // Почвоведение. 2018. № 4. С. 439–450.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X18040056>
 18. Шамрикова Е.В., Пунегов В.В., Груздев И.В., Ванчикова Е.В., Ветошкина А.А. Индивидуальные органические соединения водных вытяжек из подзолистых почв Республики Коми // Почвоведение. 2012. № 10. С. 1066–1076.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X13060099>
 19. Шеин Е.В., Болотов А.Г., Хайдапова Д.Д., Милановский Е.Ю., Тюгай З.Н., Початкова Т.Н. Реологические свойства черноземов Алтайского Приобья // Вестник Алтайского гос. аграрного ун-та. 2014. № 8. С. 32–38.
 20. Baumgarten W. Soil microstructural stability as influenced by physicochemical parameters and its environmental relevance on multiple scales: Habilitation thesis, Kiel University, 2013. 263 p.
 21. Baumgarten W. Structural stability of Marshland soils of the riparian zone of the Tidal Elbe River // Soil Till. Res. 2012. V. 125. P. 80–88.
 22. Dealy J.M. Rheometers for Molten Plastics. A Practical Guide to Testing and Property Measurement. N.Y.: Van Nostrand Reinhold, 1982. 302 p.
 23. Ghezzehei T.A., Or D. Rheological Properties of Wet Soils and Clays under Steady and Oscillatory Stresses // Soil Sci. Soc. Am. J. 2001. V. 65. P. 624–637.
 24. Horn R., Smucker A. Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils // Soil Till. Res. 2005. V. 82. P. 5–14.
 25. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland. 151 p. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/YR_AR5_FINAL_full.pdf.
 26. Jeong S., Locat J., Leroueil S., Malet J., Locat J., Leroueil S., Malet J. Rheological properties of fine-grained sediment: the roles of texture and mineralogy // Can. Geotechn. J. 2010. V. 47. P. 1085–1100.
 27. Jones P.D., New M., Parker D.E., Martin S., Rigor I.O. Surface air temperature and its changes over the past 150 years // Reviews of Geophysics. 1999. V. 37. P. 173–200.
 28. Markgraf W., Horn R., Peth S. An approach to rheometry in soil mechanics – Structural changes in bentonite, clayey and silty soils // Soil Till. Res. 2006. V. 91. P. 1–14.
 29. Markgraf W., Watts C.W., Whalley W.R., Hrkac T., Horn R. Influence of organic matter on rheological properties of soil // Appl. Clay Sci. 2012. V. 64. P. 25–33.
 30. Markgraf W., Bellmann C., Caspari A., Horn R. Quantifying microstructural stability of South-Brazilian soils by the application of rheological techniques and zeta potential measurements // A Christian-Albrechts-University zu Kiel, Institute for Plant Nutrition and Soil Science. Kiel, 2010. P. 1778–1782.
 31. Markgraf W., Horn R. Rheological investigations in soil micro mechanics: Measuring stiffness degradation and structural stability on a particle scale // Progress in Management Engineering. N.Y.: Nova Science Publishers, 2009. P. 237–279.
 32. Markgraf W., Horn R. Scanning electron microscopy-energy dispersive scan analyses and rheological investigations of south-Brazilian soils // Soil Sci. Soc. Am. J. 2007. V. 71. P. 851–859.
 33. Mezger T.G. The Rheology Handbook. Hanover, 2011. 436 p.
 34. Micheli E., Tombacz E., Szegi T., Gal A. The Relationship of Rheological Parameters and Erodibility of Soils // 12th ISCO Conference Beijing. 2002. P. 111–115.
 35. Or D., Ghezzehei T.A. Modeling post-tillage structural dynamics: a review // Soil Till. Res. 2002. V. 64. P. 41–59.
 36. Pertile P., Reichert J.M., Gubiani P.I., Holthusen D., Costa A. Rheological Parameters as Affected by Water

- Tension in Subtropical Soils // *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2016. V. 40. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20150286>.
37. *Scherer G.W.* Viscous sintering with a pore-size distribution and rigid inclusions // *J. Am. Ceram. Soc.* 1988. V. 71. P. 447–448.
38. *Silva H.R.* Wetting-induced changes in near surface soil physical properties affecting surface irrigation. Ph.D. dissertation. Logan: Utah State Univ, 1995. 188 p.
39. *Stoppe N., Horn R.* How far are rheological parameters from amplitude sweep tests predictable using common physicochemical soil properties? // *IOP Conference Series: Journal of Physics: Conference Series*. 2017. V. 790. P. 012032.
40. *Stoppe N., Horn R.* Microstructural strength of tidal soils – a rheometric approach to develop pedotransfer functions // *J. Hydrol. Hydromech.* 2018. V. 66. P. 87–96. <https://doi.org/10.1515/johh-2017-0031>.
41. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2015.

Rheological Properties of Boreal Semihydromorphic Soils: Relationship with Physico-Chemical Properties and Temperature Conditions

Y. V. Kholopov^{1,*}, D. D. Khaydapova², A. B. Novakovskiy¹, and E. M. Lapteva¹

¹*Institute of Biology, Komi Science Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, 167982 Russia*

²*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: Yuraholopov@yandex.ru*

The results of rheological studies of soils on the modular rheometer MCR 302 (Anton Paar, Austria) by the amplitude sweep method (oscillatory method) are considered. Study objects are represented by semi-hydromorphic soils of taiga zone in the Northeast of European part of Russia. We found that the strongest interactions between soil particles are developed in the horizons with high content of mobile humus compounds (fulvic acids) and Al/Fe-humus complexes (EL_{hi,g}–EL_g–CRM horizons). Increased structural durability is due to the cementation of soil particles resulting from the intake of humus substances and Al/Fe-humus compounds with the development of strong interparticle bonds in the soils. Another important factor is the freezing-thawing processes. The impact of seasonal freezing on the soil rheology is clearest in the profile of semihydromorphic variants of light soils (Histic Gleyic Stagnosols), in their cryometamorphic (CRM) horizons, where increased rigidity of soil bonds is due to condensation compaction of soil particles as a result of development of freezing veil with long period of temperatures about 0°C (“zero curtain”). High values of structural interrelations – Integral Z in the soil profile may be due to weak aggregation of mineral mass caused by a constant surface moisture stagnation in the soil accompanied by an intensive gley process. Disaggregated soils are most at risk of erosion and washout processes, and yet thick moss-peat horizon forming in the upper part of the profile of semihydromorphic soils protects them from negative deformation phenomena. In the northward direction from the textural-differentiated soils of southern taiga to the cryomethamorphic soils of forest-tundra we observe an increasing of the strength or rigidity of interpartical soil bonds. At the latitudinal scale, the strength or durability of soil bonds in the cryometamorphic soils of northern, far northern taiga and forest-tundra is higher than that in the semihydromorphic texture-differentiated soils of southern and middle taiga. This pattern may be due to more active intake of fulvic acids, including complex Al-FA-humic substances, as well as longer freezing of northern soils. It is shown that rheological parameters can be used as additional indicators in the diagnosis and classification of taiga soils.

Keywords: rheology, soil structure, semihydromorphic soils, Histic Albic Retisol, Histic Gleyic Stagnosols