

УДК 631.44: 631.43

doi: 10.17223/19988591/42/2

Ю.В. Холопов¹, Д.Д. Хайдапова², Е.М. Лаптева¹

¹Институт биологии Коми научного центра УрО РАН, г. Сыктывкар, Россия
²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Физико-механические свойства автоморфных таежных почв Республики Коми (по данным реологических исследований)

Работа выполнена в рамках госзадания № АААА-А17-117122290011-5 «Выявление общих закономерностей формирования и функционирования торфяных почв на территории Арктического и Субарктического секторов Европейского Северо-Востока России», при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-04-01111 «Реология почв: исследование межчастичных структуроформирующих взаимосвязей и их устойчивости к деформациям».

Рассмотрены особенности физико-механических свойств в ряду автоморфных почв Республики Коми – дерново-подзолистых и подзолистых текстурно-дифференцированных (*Folic Albic Retisol*) южной и средней тайги, светлосемов иллювиально-железистых (*Folic Albic Stagnosols*) северной, крайнесеверной тайги и лесотундры. Установлено, что наиболее прочные межчастичные контакты формируются в горизонтах, отличающихся высоким содержанием подвижных гумусовых веществ фульватной природы и органоминеральных альфегумусовых соединений. Воздействие сезонного промерзания на реологические свойства почв наиболее четко проявляется в профиле светлосемов, где повышенная прочность межчастичных взаимодействий в средней части профиля (на глубине 40–60 см) обусловлена конденсационным уплотнением частиц в результате формирования фронта промерзания с длительным периодом околонулевых температур. К северу отмечается усиление прочности межчастичных почвенных взаимодействий вследствие интенсификации процессов оглеения, а также увеличения глубины промерзания почв. В этом же направлении снижаются значения предела пластичной деформации и диапазона упругой деформации почвенной структуры, что свидетельствует о повышении хрупкости межчастичных взаимодействий. Прочные, но хрупкие межчастичные почвенные контакты обладают низкой структурной устойчивостью, быстро разрушаясь и медленно восстанавливаясь при превышении предельных механических нагрузок.

Ключевые слова: реология; структурообразование; светлосемы иллювиально-железистые; подзолистые текстурно-дифференцированные почвы; *Folic Albic Retisol*; *Folic Albic Stagnosols*.

Введение

Многолетними почвенными исследованиями на территории Республики Коми установлены закономерности образования, функционирования и про-

дуктивности подзолистых почв, получен обширный материал, характеризующий особенности протекания в них почвенных процессов [1]. Общими свойствами подзолистых почв являются: высокая кислотность почвенного профиля, выщелоченность обменных оснований, фульватный тип гумуса, обеднение подзолистого горизонта илистой фракцией и полуторными оксидами. В результате заторможенности биохимических процессов в условиях Севера гумусовые вещества таежных почв отличаются агрессивностью, подвижностью, высоким содержанием ненасыщенных низкомолекулярных органических кислот [2]. Эти соединения могут мигрировать по профилю почвы на значительную глубину за счет образования органоминеральных комплексных соединений с железом и алюминием [3–5]. Основная роль в формировании подзональных подтипов таежных подзолистых почв принадлежит биоклиматическому фактору. Наиболее ярко подзональные особенности в строении и свойствах проявляются в ряду автоморфных подзолистых почв, формирующихся на пылевато-суглинистых почвообразующих породах [3]. К северу от территории распространения типичных подзолистых почв становятся более выраженными процессы поверхностного оглеения, усиливается потечность гумуса. В южном направлении в результате развития травяного яруса под пологом леса в профиле почв отмечается дерново-аккумулятивный процесс, сопровождающийся образованием менее агрессивного гуматно-фульватного типа гумуса с возрастанием содержания фракции гуминовых кислот, связанных с кальцием [6]. В соответствии с этим в рамках классификации почв 1977 г. [7] и региональной классификации [1, 3] в типе подзолистых почв, приуроченных к автоморфным позициям рельефа, исследователи традиционно выделяли подтипы дерново-подзолистых почв, представленных в подзоне южной тайги, типичных подзолистых – средней тайги, глееподзолистых – северной тайги.

Как показали исследования последних лет [8, 9], генезис и распространение подзолистых почв имеют более сложный характер. На их подзональные особенности может накладываться определенный отпечаток специфика распространения водно-ледниковых отложений пылевато-суглинистого гранулометрического состава. В условиях Севера на таких почвообразующих породах формируются почвы, в профиле которых отсутствуют признаки текстурной дифференциации. Таким образом, с позиций новой классификации почв России [10, 11] таежные автоморфные почвы, формирующиеся под влиянием подзолистого процесса, подразделяются на более высоком таксономическом уровне. Почвы, развитые на тяжелых покровных суглинках под пологом южно- и среднетаежных еловых лесов, в соответствии со спецификой их морфологического строения относятся к отделу текстурно-дифференцированных почв (дерново-подзолистые и подзолистые). Почвы северной, крайнесеверной тайги и лесотундры, приуроченные к более легким суглинистым отложениям, – к отделу криометаморфических почв (светлоземы иллювиально-железистые). Профиль текстурно-дифференцированных почв

характеризуется наличием элювиального (EL) горизонта в верхней части и текстурного с хорошо выраженной призматической структурой (BT) – в средней части профиля. Профиль светлоземов формируется под влиянием подзолистого процесса в сочетании с криометаморфическим оструктурированием минеральной массы, в ходе которого образуется специфичная угловато-крупитчатая структура (CRM-горизонт). Текстуальный горизонт может быть либо слабо выражен, либо вообще отсутствовать [8]. Текстуально-дифференцированные почвы в отличие от светлоземов характеризуются более значимой дифференциацией профиля по содержанию илистой фракции и полуторных оксидов. Следует отметить, что диагностика и классификация криометаморфических почв (светлоземов), в частности CRM-горизонта, являются достаточно сложной задачей в силу отсутствия четких физико-химических признаков их выделения. Таким образом, несмотря на достаточно хорошую изученность, проблемы генезиса подзолистых почв не теряют своей актуальности. В этой связи исследование физико-механических свойств текстурно-дифференцированных почв (дерново-подзолистых, подзолистых) и криометаморфических (светлоземов иллювиально-железистых) позволит более четко охарактеризовать их специфические особенности и выявить дополнительные диагностические показатели. Физико-механические свойства почв предлагается исследовать с помощью реологического подхода, который хорошо зарекомендовал себя в работах многих авторов [12–19]. Реологические исследования позволяют оценить характер межчастичных взаимодействий в почвах, а также выявить их деформационные свойства – прочность, упругость, пластичность, вязкость.

Цель настоящей работы – оценить с помощью реологических методов физико-механические свойства дерново-подзолистых и подзолистых текстурно-дифференцированных почв, а также светлоземов иллювиально-железистых, формирующихся в хорошо дренированных условиях под пологом еловых лесов на пылевато-суглинистых почвообразующих породах.

Материалы и методики исследований

Территория исследований располагается в пределах северо-восточной части Восточно-Европейской равнины на территории Республики Коми. Климат региона исследований умеренно континентальный умеренно холодный [20]. Активная циклоническая деятельность в регионе обуславливает выпадение достаточно большого количества атмосферных осадков (489–622 мм в год), основная часть которых (338–440 мм) поступает в теплый период [20, 21]. Значительная протяженность территории с юго-запада на северо-восток, а также близость Арктического бассейна определяют возрастание при продвижении в направлении от южной тайги к лесотундре холодности и влажности климата. К северу снижается среднегодовая температура воздуха (от +1°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 почвы, формирующиеся в автоморфных условиях под пологом еловых лесов на пылевато-суглинистых почвообразующих породах. Для изучения реологических свойств таежных почв выбраны 5 ключевых участков, расположенных в различных подзонах тайги, а также в лесотундре. Краткая характеристика ключевых участков представлена в табл. 1, морфологическое строение почв – на рис. 1. Таким образом, на ключевом участке, выделенном в подзоне южной тайги, исследовали свойства дерново-подзолистой текстурно-дифференцированной почвы, средней – подзолистой текстурно-дифференцированной с микропрофилем подзола, северной – светлосема иллювиально-железистого поверхностно-глееватого, крайнесеверной тайги и лесотундры – светлосемов иллювиально-железистых потечно-гумусовых глееватых. Названия почв даны в соответствии с принципами диагностики и классификации почв России 2004 г. [10] и системой классификации WRB [22].

Физико-химические свойства почв исследовали стандартными методами [23]. Величину рН солевой (KCl) суспензии определяли потенциометрически со стеклянным электродом, содержание общего углерода и азота – газохроматографическим методом на CNHS-анализаторе EA-1100 «Carlo Erba», обменных катионов – вытеснением NH_4Cl с последующим атомно-абсорбционным определением на Shimadzu AA-6300, оксалатрастворимых форм соединений железа и алюминия – по Тамму, дитионитрастворимых – по Джексону, гранулометрический состав – методом Качинского. 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 г.

Реологические исследования образцов почв выполняли на базе модульного реометра MCR-302 «Anton Paar» (Австрия) методом амплитудной развертки (колебательный метод) с измерительными системами «плита-плита». Подробное описание методики проведения исследований представлено в работах [12, 13, 15, 17, 19]. В ходе проведенных испытаний получены следующие параметры (рис. 2), характеризующие реологические свойства почв: G' (Pa) – модуль упругости (мера энергии деформации, сохраненной образцом в процессе сдвига); G'' (Pa) – модуль вязкости (мера энергии деформации, израсходованной во время процесса сдвига и потерянной для образца); LVE-range (%) – диапазон упругой деформации (отражает область с постоянными величинами или с незначительными изменениями модуля упругости G''); CROSSOVER (%) – диапазон пластичной деформации, определяемый по точке пересечения модулей упругости и вязкости ($G' = G''$), которая фиксирует полное разрушение структурных связей с переходом системы из состояния гель в золь или из твердого в текучее.



Рис. 1. Морфологическое строение дерново-подзолистой почвы южной тайги (а), подзолистой с микропрофилем подзола средней тайги (б), светлосево иллювиально-железистых северной (с), крайнесеверной (д) тайги и лесотундры (е).

Авторы фото: а, б, с, д – Е.М. Лаптева; е – Ю.В. Холопов

Fig. 1. Morphological structure of sod-podzolic soils in the southern taiga (a), podzolic with podzol microprofile in the middle taiga (b), ferrous-illuvial svetlozem in the northern taiga (c), and far northern taiga (d) and forest tundra (e) (Photos a, b, c, d by EM Lapteva; e by YV Holopov)

Значение модуля упругости G' в начале деформационного процесса отражает величину прочности межчастичных почвенных контактов. Статистическую обработку данных проводили в программном пакете «IBM SPSS Statistic».

Т а б л и ц а 1 [Table 1]

Краткая характеристика объектов исследования
[Brief description of the research objects]

Показатель [Parameter]	Ключевой участок [Key site]				
	КУ-I	КУ-II	КУ-III	КУ-IV	КУ-V
Зона, подзона [Zone, subzone]	Южная тайга [Southern taiga]	Средняя тайга [Middle taiga]	Северная тайга [North- ern taiga]	Крайнесеверная тайга [Far north- ern taiga]	Лесотундра [Forest tundra]
Координаты [Coordinate system]	59°38'N 49°22'E	66°39'N 50°41'E	64°51'N 57°37'E	65°53'N 60°30'E	66°39'N 62°29'E
Бассейн реки [River basin]	р. Луза [Luza river]	р. Вычегда [Vycheгда river]	р. Печора [Pechora river]	р. Уса [Usa river]	р. Уса [Usa river]
Рельеф [Relief element]	Водно-ледниковая равнина [Fluvio-glacial plain]	Моренная равнина [Morainic plain]	Водно-ледниковая равнина [Fluvio-glacial plain]	Водно-ледниковая равнина [Fluvio-glacial plain]	Моренная равнина [Morainic plain]
Абсолютная высота (м над ур.м.) [Altitude above sea level]	183	170	224	160	153
Растительность [Vegetation]	Ельник кислично-зелено-мошный [Oxalis green moss spruce forest]	Ельник чернично-зелено-мошный [Myrtillus green moss spruce forest]	Ельник чернично-зелено-мошный [Myrtillus green moss spruce forest]	Ельник чернично-зелено-мошный [Myrtillus green moss spruce forest]	Ельник лишайниково-зелено-мошный [Lichen-green moss spruce forest]
Состав древостоя [Stand composition]	8Е2Б+Ос+П	8Е2Б+Ос+П	8Е2Б+К+П	8Е2Б	8Е2Б
Бонитет [Bonitet]	III-II	III	III	IV-V	V
Номер почвенного разреза [No. of soil pit]	Л-2	Р-1-П	Р-3	Р-39	Р-4-1

Окончание табл. 1 [Table 1 (end)]

Ключевой участок [Key site]					
Показатель [Parameter]	КУ-I	КУ-II	КУ-III	КУ-IV	КУ-V
Тип, подтип почвы* [Soil type, soil subtype]*	Дерново-подзолистая текстурно-дифференцированная тяжело-суглинистая [Folic Albic Retisol]	Подзолистая с микропрофилем подзола текстурно-дифференцированная средне-суглинистая [Folic Albic Retisol]	Светлозем иллювиально-железистый поверхностно-глееватый легко-суглинистый [Folic Albic Stagnosol]	Светлозем иллювиально-железистый потечно-гумусовый глееватый среднесуглинистый [Folic Albic Stagnosol]	
Тип, подтип почвы** [Soil type, soil subtype]**	Folic Albic Retisol		Folic Albic Stagnosols		
Формула строения профиля [Structure of the soil profile]	Oao-AY-EL-BEL-BT-BC-C	O-EL[e-hf]-ELf-BEL-BT-BC-C	O-Eg-BHF-BF-Bcrn-CRM-BC-C	O-Eg,hi-BHF-CRM-CRMg-Dg	O-Eg,hi-BF-Bcrn-CRM-BCg-Cg

Примечание. * Название почвы приведено в соответствии с классификацией почв России [10]; ** название почвы приведено в соответствии с системой классификации WRB [22].
 Note. * [The name of the soil is given in accordance with the classification of soils of Russia [10]; ** the name of the soil is given in accordance with the WRB classification system [22].

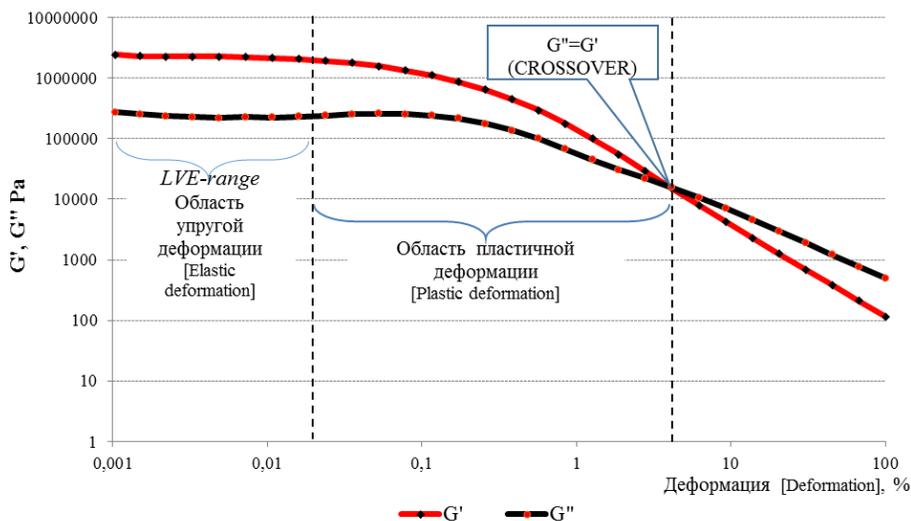


Рис. 2. Кривая зависимости модуля упругости (G') и вязкости (G'') от величины деформации на примере данных, полученных для элювиального горизонта Eg светлозема иллювиально-железистого поверхностно-глееватого северной тайги (разрез P-3)

Fig. 2. Elastic (G') and viscosity (G'') modulus versus deformation curve (horizon Eg of soil profile P-3)
 On the Y-axis - Strain value; on the X-axis - Energy of shear (Deformation)

Т а б л и ц а 2 [Table 2]

Физико-химические показатели почв
[Physico-chemical properties of soils]

Горизонт [Horizon]	Глубина, см [Depth, cm]	pH (KCl)	Собщ., %, мас. [C _{total} , %, mas]	C/N	Обменные катионы [Exchangeable bases]		Fe ₂ O ₃ Тамм [According to Tamm], %	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ Джексон [According to Jackson], %	Содержание частиц [Sum of particles], %	
					Ca ²⁺ смоль/кг [cmol/kg]	Mg ²⁺				< 0,01 мм	< 0,01 мм
Лесотундра. Разрез Р-4-1. Светлозем иллювиально-железистый потечно-гумусовый глееватый среднесуглинистый [Forest tundra. Profile P-4-1. Follic Albic Stagnosols]											
O1	0-3	3,48±0,10*	42,7±1,4*	33,0	15,8±1,2*	3,64±0,27*	—	—	—	—	—
O2	3-5	3,34±0,10	36,2±1,2	32,0	7,3±0,5	2,87±0,21	—	—	—	—	—
Eg _{hi}	5-10(15)	3,71±0,10	1,03±0,18	21,5	0,40±0,07	0,206±0,021	0,55±0,08*	0,29±0,07*	0,71	13	24
BF	10(15)-14(27)	4,00±0,10	0,87±0,20	15,9	0,40±0,07	0,20±0,04	1,10±0,16	0,52±0,12	1,19	17	28
Berm	14(27)-45	3,86±0,10	0,43±0,13	11,1	0,40±0,07	0,263±0,026	0,64±0,10	0,41±0,10	0,69	20	27
CRM	45-80	3,89±0,10	0,30±0,09	8,3	0,46±0,08	0,34±0,03	0,58±0,09	0,41±0,10	0,68	20	31
BCg	80-110	3,79±0,10	0,23±0,07	8,1	0,97±0,17	0,85±0,09	0,57±0,09	0,39±0,09	0,67	23	35
Dg	110-140	3,87±0,10	0,17±0,05	6,6	0,80±0,14	0,64±0,06	0,64±0,10	0,22±0,05	0,75	7	15
Крайнесеверная тайга. Разрез Р-39. Светлозем иллювиально-железистый потечно-гумусовый глееватый среднесуглинистый [Far northern taiga. Profile P-39. Follic Albic Stagnosols]											
O1	0-1	3,80±0,10	43,8±1,4	24,7	0,57±0,10	0,143±0,029	—	—	—	—	—
O2	1-4	3,46±0,10	41,8±1,3	22,5	0,43±0,07	0,100±0,020	—	—	—	—	—
Eg _{hi}	4-8(14)	3,60±0,10	2,0±0,4	15,2	—	—	0,45±0,07	0,35±0,08	0,52	15	29
BHF	7-14	3,98±0,10	2,6±0,5	13,5	0,18±0,03	0,040±0,008	1,32±0,20	0,71±0,17	1,96	21	38
BF	14-17(19)	4,22±0,10	1,47±0,26	12,1	0,16±0,03	0,036±0,007	0,95±0,14	0,93±0,22	1,42	23	38
Berm	17(19)-30	4,25±0,10	1,58±0,13	26,0	0,110±0,019	0,039±0,008	0,39±0,13	0,65±0,16	0,85	21	35
CRM1	33-46	4,15±0,10	0,36±0,11	7,2	0,090±0,015	0,021±0,004	0,39±0,13	0,52±0,13	0,86	21	34
CRM2	46-60	4,06±0,10	0,29±0,09	6,5	0,105±0,018	0,026±0,005	0,39±0,13	0,46±0,11	0,91	23	37
CRM3	70-83	3,90±0,10	0,28±0,08	5,2	0,132±0,023	0,052±0,010	0,45±0,07	0,45±0,11	1,13	28	46
Dg	83-87	3,92±0,10	0,20±0,06	5,2	0,18±0,03	0,069±0,014	0,46±0,07	0,26±0,06	0,81	20	36
Северная тайга. Разрез Р-3. Светлозем иллювиально-железистый поверхностно-глееватый легкосуглинистый [Northern taiga. Profile P-3. Follic Albic Stagnosols]											

Продолжение табл. 2 [Table 2 (continuation)]

Горизонт [Horizon]	Глубина, см [Depth, cm]	рН (KCl)	Собщ., %, мас. [C _{total} , %, mas]	C/N	Обменные катионы [Exchangeable bases]		Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Содержание частиц [Sum of particles], %	
					Ca ²⁺	Mg ²⁺				Джексон [According to Jackson], %	< 0,001 мм
					смоль/кг [cmol/kg]		Тамм [According to Tamme], %				
O1	0-4	3,49±0,10	46,1±1,5	36,8	—	—	—	—	—	—	—
O2	4-8	2,55±0,10	44,8±1,4	40,5	—	—	—	—	—	—	—
Eg	8-13	2,76±0,10	1,54±0,28	22,5	0,71±0,12	0,250±0,025	0,070±0,024	0,20±0,05	0,13	10	20
BHF	13-15	3,46±0,10	2,20±0,40	23,3	0,71±0,12	0,210±0,021	1,38±0,021	0,67±0,16	1,42	15	24
BF	15-18	3,82±0,10	1,09±0,20	21,2	0,61±0,10	0,17±0,03	1,11±0,17	0,86±0,21	1,00	12	22
Berm	18-33	3,81±0,10	0,71±0,16	13,8	0,64±0,11	0,200±0,020	0,83±0,12	0,68±0,16	0,96	17	24
CRM1	33-40	3,82±0,10	0,39±0,12	11,4	0,66±0,11	0,240±0,024	0,65±0,10	0,54±0,13	0,89	15	23
-2-	40-50	3,82±0,10	0,30±0,09	11,7	0,76±0,13	0,31±0,03	0,56±0,08	0,47±0,11	0,81	15	21
-2-	50-60	3,82±0,10	0,27±0,08	10,5	0,75±0,13	0,37±0,04	0,53±0,08	0,49±0,12	0,86	15	23
CRM2	60-70	3,80±0,10	0,24±0,07	9,3	0,90±0,15	0,44±0,04	0,41±0,06	0,45±0,11	0,66	15	22
CRM3	70-80	3,81±0,10	0,21±0,06	8,2	1,10±0,10	0,57±0,06	0,35±0,12	0,41±0,10	0,62	15	21
-2-	80-90	3,81±0,10	0,19±0,06	7,4	1,28±0,12	0,64±0,06	0,31±0,11	0,35±0,08	0,61	14	19
-2-	93-115	3,77±0,10	0,16±0,05	6,2	1,60±0,14	0,83±0,08	0,3±0,10	0,32±0,08	0,60	14	20
BC	115-130	3,72±0,10	0,16±0,05	6,2	2,10±0,19	1,06±0,11	0,41±0,06	0,33±0,08	0,68	19	23
C	130-145	3,74±0,10	0,16±0,05	6,2	2,18±0,20	1,14±0,11	0,38±0,13	0,29±0,07	0,69	15	20
Средняя тайга. Разрез Р-1-П. Подзолистая с микропрофилем подзола текстурно-дифференцированная среднесуглинистая [Middle taiga. Profile P-1-P. Folic Albic Retisol]											
O	0-5	4,50±0,10	33,50±1,40	25,2	30,5±2,3	19,1±1,4	—	—	—	—	—
EL[e]	7-10	3,94±0,10	0,31±0,07	18,1	0,60±0,10	1,10±0,10	0,31±0,10	0,15±0,04	0,36	5	17
EL[hf]	10-15	3,87±0,10	0,70±0,16	16,0	0,60±0,10	0,200±0,020	0,56±0,08	0,23±0,05	0,58	9	18
ELf	15-25	3,86±0,10	0,16±0,04	10,4	0,90±0,15	0,60±0,06	0,37±0,13	0,14±0,03	0,54	5	20
BEL	35-42	3,64±0,10	0,14±0,03	7,8	1,80±0,16	0,80±0,08	0,46±0,07	0,17±0,04	0,69	14	28
-2-	45-60	3,53±0,10	0,38±0,09	7,6	4,7±0,4	2,40±0,18	0,76±0,11	0,39±0,09	1,08	34	51
BT1	62-80	3,72±0,10	0,20±0,05	6,7	9,0±0,7	2,60±0,20	0,41±0,06	0,28±0,07	0,81	34	40
BT2	80-100	4,00±0,10	0,16±0,04	5,8	11,3±0,8	2,20±0,17	0,33±0,11	0,24±0,06	0,75	31	37
BT3	100-120	4,50±0,10	0,18±0,04	7,5	11,3±0,8	3,20±0,24	0,41±0,06	0,26±0,06	0,81	27	34
BC	130-150	5,75±0,10	0,17±0,04	6,6	11,2±0,8	3,70±0,28	0,24±0,08	0,17±0,04	0,66	26	36

О к о н ч а н и е т а б л. 2 [Table 2 (end)]

Горизонт [Horizon]	Глубина, см [Depth, cm]	pH (KCl)	Собщ., %, мас. [C _{total} , %, mas]	C/N	Обменные катионы [Exchangeable bases]		Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Содержание частиц [Sum of particles], %	
					Ca ²⁺	Mg ²⁺				Джексон [According to Jackson], %	< 0,001 мм
-2-	150-170	6.63±0.10	0.17±0.04	6.6	Ca ²⁺ смоль/кг [cmol/kg]	Mg ²⁺	0.20±0.07	0.18±0.04	0.71	22	34
Южная тайга. Разрез Л1-2 Дерново-подзолистая текстурно-дифференцированная тяжелосуглинистая [Southern taiga. Profile Л1-2. Folic Albic Retisol]											
O	0-1	4.80±0.10	42.3±1.5	34.0	33.7±2.5	6.0±0.5	-	-	-	-	-
Oa0	1-4	4.33±0.10	32.7±1.2	34.7	30.0±2.2	3.81±0.29	-	-	-	-	-
AY	4-12	3.55±0.10	1.17±0.27	16.2	0.82±0.14	0.38±0.04	1.39±0.21	0.29±0.07	1.81	11	30
EL	12-23	3.81±0.10	0.30±0.07	11.3	0.63±0.11	0.38±0.04	0.55±0.08	0.23±0.05	0.76	9	27
BEL	23-34	3.78±0.10	0.25±0.06	9.4	1.81±0.16	1.57±0.16	0.38±0.13	0.29±0.07	0.86	14	33
-2-	34-47	3.64±0.10	0.23±0.05	8.7	7.1±0.5	4.8±0.4	0.43±0.06	0.36±0.09	1.20	29	41
BT1	47-62	3.59±0.10	0.24±0.06	7.8	10.2±0.8	7.2±0.5	0.31±0.11	0.37±0.09	1.30	36	50
-2-	62-75	3.58±0.10	0.20±0.04	6.9	11.8±0.9	8.2±0.6	0.27±0.09	0.30±0.07	1.28	38	50
BT2	75-92	3.63±0.10	0.19±0.04	6.3	12.4±0.9	8.6±0.6	0.26±0.09	0.31±0.08	1.23	39	49
-2-	92-110	3.69±0.10	0.22±0.05	7.8	13.6±1.1	9.6±0.7	0.21±0.07	0.24±0.06	1.35	37	50
-2-	110-120	3.79±0.10	0.19±0.04	6.2	14.5±1.1	10.2±0.8	0.22±0.08	0.24±0.06	1.30	37	53
BC	120-130	3.83±0.10	-	-	13.0±1.0	9.1±0.7	0.25±0.09	0.24±0.06	1.22	-	-
C	135-145	3.97±0.10	-	-	6.6±0.5	3.81±0.29	0.21±0.07	0.13±0.03	1.15	-	-

Примечание. * Здесь и далее приведены средние арифметические значения показателя и границы доверительного интервала погрешности его определения (p=0,05). Знак «-» показывает, что показатель в данных пробах не определяли.

[Note. * Hereinafter, the mean values and the limits of the confidence interval of its determination error are given (p = 0.05). - indicates that the value in these samples was not determined].

Результаты исследования и обсуждение

Реологические свойства почв зависят от нескольких базовых составляющих: гранулометрического и минералогического состава почв, содержания органических веществ, насыщенности почвенно-поглощающего комплекса основаниями [19, 24–26]. Для выявления влияния биоклиматических факторов на реологические свойства почв нами подобраны объекты, сформированные на крупнопылеватых суглинистых отложениях водно-ледникового (КУ-I, КУ-III, КУ-IV) и моренного (КУ-II, КУ-V) происхождения. Почвы южной и средней тайги развиты на тяжелых и средних крупнопылеватых суглинках, почвы северной, крайнесеверной тайги и лесотундры – на средних и легких крупнопылеватых суглинках (см. табл. 2). Некоторое облегчение гранулометрического состава исследуемых почв в направлении к северу может быть обусловлено особенностями седиментации водно-ледниковых и переотложения моренных пород [8, 9].

Морфологическое строение текстурно-дифференцированных почв южной (КУ-I) и средней (КУ-II) тайги характеризуется наличием тяжелого текстурного горизонта ВТ в средней части профиля с хорошо выраженной призматической структурой, глинистыми кутанами и белесыми скелетанами. Общая мощность текстурных горизонтов в исследуемых почвах достигает 70–75 см. Отличительным морфологическим признаком дерново-подзолистой почвы, кроме текстурного горизонта, является наличие в верхней части профиля гумусо-аккумулятивного горизонта АУ (4–12 см) с хорошо выраженной зернисто-порошистой структурой, переходящего в белесый листоватый элювиальный горизонт ЕL без признаков оглеения. К специфической особенности морфологического строения среднетаежной почвы следует отнести формирование вложенного микропрофиля подзола в верхней части профиля, что характерно для хорошо дренированных подзолистых почв [8].

Профиль почв ключевых участков, выделенных в подзонах северной (КУ-III), крайнесеверной (КУ-IV) тайги и лесотундры (КУ-V), отличается по морфологическому строению от вышеописанных почв. В их профиле под подзолистым горизонтом ЕLg(hi), как правило, диагностируется иллювиально-гумусово-железистый горизонт ВНF (или ВF), образующийся в результате глее-альфегумусовых процессов [8, 27, 28]. Усиление процессов промерзания почв к северу сопряжено с развитием в средней части профиля почв специфичной угловато-крупитчатой структуры (криометаморфическое оструктуривание) при отсутствии или слабой выраженности текстурного горизонта ВТ. Это позволяет отнести почвы участков КУ-III, КУ-IV, КУ-V к отделу криометаморфических, типу светлосезмов иллювиально-железистых [10, 11]. Роль криогенного фактора в формировании такого типа структуры (CRM) отмечена в работах многих авторов [27, 29–32]. Наиболее предрасположены по своим свойствам к мерзлотному оструктуриванию легкосуглинистые почвообразующие породы [8]. Присутствие в них фракции крупной

пыли способствует более активному дроблению твердой фазы почвы при промораживании, благодаря созданию системы достаточно крупных пор [33]. 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 в исследуемых светлоземах достигает 95 см. Поверхностный застой влаги, усиливающийся в направлении к северу, определяет развитие в светлоземах процессов оглеения и потечности гумуса, диагностируемых по соответствующим морфохроматическим признакам в горизонтах E_g (серо-сизые пятна, ржаво-коричневые мелкие конкреции), E_gh_i (серо-сизые пятна, конкреции, буровато-коричневое прокрашивание на контакте с органомным горизонтом), и процессов оглеения в нижней части профиля – на контакте с подстилающей породой (КУ-IV, КУ-V).

Физико-химические свойства исследованных почв во многом близки (см. табл. 2), однако имеют некоторые особенности, связанные с влиянием биоклиматических зональных и подзональных условий. Почвы характеризуются повышенной кислотностью, минимальные значения величины рН КСl-вытяжки отмечаются в подстильно-торфяном (2,55–3,80 ед. рН) и подзолистом (2,76–3,60 ед. рН) горизонтах светлоземов (разрезы Р-3, Р-39, Р-4-1), что может быть связано с высоким содержанием здесь ненасыщенных низкомолекулярных органических кислот [3]. В дерново-подзолистой почве (разрез Л-2) эти соединения частично нейтрализуются зольными элементами, поступающими при разложении травянистой растительности напочвенного покрова, поэтому кислотность здесь немного ниже (4,33–4,80 ед. рН).

Дерново-подзолистая (Л-2) и подзолистая почвы (Р-1-П) характеризуются четкой дифференциацией профиля по содержанию частиц илстой фракции и содержанию обменных оснований (см. табл. 2). В светлоземах содержание обменных оснований крайне низкое по всему профилю, что может быть следствием специфики минералогического и химического состава почвообразующих пород. К северу, вследствие более суровых климатических условий, усиливается фульватный характер почвенного органического вещества и возрастает потечность гумусовых соединений [1, 3]. Значительная часть высоко- и низкомолекулярных органических кислот, поступающих из подстилки, осаждается ниже по профилю в форме алюмо- и железо-гумусовых соединений. Это диагностируется по максимальному содержанию оксалат- и дитионитрастворимых соединений железа в горизонте ВНФ микропрофиля подзола.

Данные реологических исследований представлены в табл. 3. В дерново-подзолистой текстурно-дифференцированной почве южной тайги наиболее прочные межчастичные контакты со значениями G^1 до $1,23 \cdot 10^6$ Па формируются в верхнем гумусово-аккумулятивном горизонте АУ (4–12 см), отличающемся повышенным содержанием гумусовых веществ и органоминеральных альфегумусовых соединений (см. табл. 2).

Таблица 3 [Table 3]

Реологические свойства почв [Rheological properties of soils]

Горизонт [Horizon]	Глубина, см [Depth, cm]	Влажность максимального набухания [Maximum swelling humidity], %	Диапазон упругой деформации LVE-range [Elastic deformation range LVE-range], %	Модуль упругости G [Modulus of elasticity G], Pa	Предел пластичной деформации CROSSOVER [Limit of plastic deformation CROSSOVER], %
Лесотундра. Разрез Р-4-1. Светлозем иллювиально-железистый потечно-гумусовый глееватый среднесуглинистый [Forest tundra. Profile P-4-1. Folic Albic Stagnosols]					
Eg,hi	5-10(15)	24,2±2,9	0,00149±0,00020	2,6·10 ⁶ ±0,3·10 ⁶	0,97±0,11
BHf	10(15)-14(27)	23,1±2,8	0,00151±0,00020	1,65·10 ⁶ ±0,21·10 ⁶	2,6±0,3
Bcm	14(27)-45	22,3±2,6	0,00147±0,00019	1,85·10 ⁶ ±0,24·10 ⁶	2,44±0,28
CRM	45-80	20,0±2,4	0,00220±0,00029	1,28·10 ⁶ ±0,16·10 ⁶	2,8±0,3
BCg	80-110	19,1±2,3	0,00220±0,00029	1,44·10 ⁶ ±0,18·10 ⁶	3,7±0,4
Dg	110-140	16,2±1,9	0,00151±0,00020	1,25·10 ⁶ ±0,16·10 ⁶	1,74±0,20
Крайнесеверная тайга. Разрез Р-39. Светлозем иллювиально-железистый потечно-гумусовый глееватый среднесуглинистый [Far northern taiga. Profile P-39. Folic Albic Stagnosols]					
Eg,hi	4-8(14)	33±4	0,0033±0,0004	1,15·10 ⁶ ±0,15·10 ⁶	2,34±0,27
BHf	7-14	34±4	0,00149±0,00020	1,84·10 ⁶ ±0,24·10 ⁶	1,01±0,12
BF	14-17(19)	31±4	0,00150±0,00020	1,52·10 ⁶ ±0,19·10 ⁶	1,22±0,14
Bcm	17(19)-30	29±3	0,00220±0,00029	2,24·10 ⁶ ±0,29·10 ⁶	1,03±0,12
CRM1	33-46	26±3	0,00148±0,00019	1,74·10 ⁶ ±0,22·10 ⁶	1,19±0,14
CRM2	46-60	26±3	0,00151±0,00020	2,29·10 ⁶ ±0,29·10 ⁶	1,30±0,15
CRM3	70-83	27±3	0,00220±0,00029	1,37·10 ⁶ ±0,18·10 ⁶	1,27±0,15
Dg	83-87	24,2±2,9	0,00220±0,00029	1,16·10 ⁶ ±0,15·10 ⁶	1,49±0,17
Северная тайга. Разрез Р-3. Светлозем иллювиально-железистый поверхностно-глееватый легкосуглинистый [Northern taiga. Profile P-3. Folic Albic Stagnosols]					
Eg	8-13	51±6	0,0033±0,0004	2,28·10 ⁶ ±0,29·10 ⁶	4,2±0,5
BHf	13-15	47±6	0,0033±0,0004	3,7·10 ⁶ ±0,5·10 ⁶	2,7±0,3
BF	15-18	38±5	0,00148±0,00019	2,5·10 ⁶ ±0,3·10 ⁶	2,03±0,24
Bcm	18-33	40±5	0,00149±0,00020	1,94·10 ⁶ ±0,25·10 ⁶	2,9±0,3
CRM1	33-40	39±5	0,00149±0,00020	1,53·10 ⁶ ±0,20·10 ⁶	2,17±0,25
- ²	40-50	37±4	0,00221±0,00029	2,08·10 ⁶ ±0,27·10 ⁶	3,1±0,4
- ²	50-60	36±4	0,00221±0,00029	1,96·10 ⁶ ±0,25·10 ⁶	1,85±0,22
CRM2	60-70	37±4	0,00221±0,00029	1,59·10 ⁶ ±0,20·10 ⁶	3,8±0,4
CRM3	70-80	36±4	0,00221±0,00029	4,3·10 ³ ±0,5·10 ³	3,4±0,4

О к о н ч а н и е т а б л. 3 [Table 3 (end)]

Горизонт [Horizon]	Глубина, см [Depth, cm]	Влажность максимального набухания [Maximum swelling humidity], %	Диапазон упругой деформации LVE-range [Elastic deformation range LVE-range], %	Модуль упругости G [Modulus of elasticity G], Pa	Предел пластичной деформации CROSSOVER [Limit of plastic deformation CROSSOVER], %
-2-	80-90	34±4	0,00148±0,00019	6,5·10 ⁵ ±0,8·10 ⁵	2,09±0,24
-2-	93-115	34±4	0,00328±0,0004	1,30·10 ⁶ ±0,17·10 ⁶	2,8±0,3
BC	115-130	37±4	0,00148±0,00019	1,13·10 ⁵ ±0,14·10 ⁶	2,03±0,24
C	130-145	33±4	0,00148±0,00019	2,6·10 ⁵ ±0,3·10 ⁵	3,1±0,4
Средняя тайга. P-1-П. Подзолистая с микропрофилем подзола текстурно-дифференцированная среднесуглинистая [Middle taiga. Profile P-1-П. Folic Albic Retisol]					
EL[e]	7-10	8,2±1,0	0,0033±0,0004	1,29·10 ⁶ ±0,17·10 ⁶	2,8±0,3
EL[hf]	10-15	28±3	0,0033±0,0004	1,36·10 ⁶ ±0,17·10 ⁶	2,8±0,3
BEL	35-42	25±3	0,0033±0,0004	9,34·10 ⁵ ±1,20·10 ⁵	2,34±0,27
-2-	45-60	33±4	0,0049±0,0006	8,79·10 ⁵ ±1,13·10 ⁵	2,34±0,27
BT1	62-80	33±4	0,0049±0,0006	6,7·10 ⁵ ±0,9·10 ⁵	2,34±0,27
BT2	80-100	32±4	0,0049±0,0006	5,8·10 ⁵ ±0,7·10 ⁵	2,34±0,27
BT3	100-120	31±4	0,0049±0,0006	4,7·10 ⁵ ±0,6·10 ⁵	2,34±0,27
Южная тайга. Разрез Л1-2. Дерново-подзолистая текстурно-дифференцированная тяжелосуглинистая [Southern taiga. Profile Л1-2. Folic Albic Retisol]					
AY	4-8	32±4	0,0033±0,0004	1,23·10 ⁶ ±0,16·10 ⁶	1,57±0,18
EL	8-18	27±3	0,0033±0,0004	1,13·10 ⁶ ±0,14·10 ⁶	5,2±0,6
BEL	18-34	30±4	0,0033±0,0004	1,16·10 ⁶ ±0,15·10 ⁶	3,5±0,4
-2-	34-47	33±4	0,0033±0,0004	7,8·10 ⁵ ±1,0·10 ⁵	4,2±0,5
BT1	47-62	38±5	0,0049±0,0006	6,3·10 ⁵ ±0,8·10 ⁵	4,2±0,5
-2-	62-75	38±5	0,0049±0,0006	6,4·10 ⁵ ±0,8·10 ⁵	4,2±0,5
BT2	75-92	36±4	0,0049±0,0006	6,0·10 ⁵ ±0,8·10 ⁵	4,2±0,5
-2-	92-110	39±5	0,0073±0,0010	5,2·10 ⁵ ±0,7·10 ⁵	4,2±0,5
-2-	110-120	39±5	0,0073±0,0010	4,7·10 ⁵ ±0,6·10 ⁵	4,2±0,5

Содержание железа по Тамму в горизонте АУ достигает 1,39%, общего углерода – до 1,17%. Подвижные формы альфегумусовых соединений обволакивают частицы почв, способствуя формированию прочных и жестких «мостиков» в местах контактов между минеральными частицами. Кроме того, существенный вклад в повышение прочности межчастичных контактов в исследуемой почве может вносить сезонное промерзание [34]. Промораживание способствует уплотнению частиц и формированию более прочных конденсационных типов межчастичных контактов в почвах. По данным температурных наблюдений, выполненных в период с 1987 по 1989 г. [6], максимальная глубина промерзания почв на участке КУ-I достигала 10–55 см, продолжительность периода с отрицательными температурами почв составляла 101–128 дней. В условиях происходящих глобальных климатических изменений [35] потепление климата, несомненно, будет сказываться на изменении гидротермического режима почв [36, 37]. Не исключено, что в настоящее время глубина промерзания исследуемой дерново-подзолистой почвы меньше, тем не менее влияние фактора промерзания на ее реологические свойства не следует исключать.

Альфегумусовая пропитка, а так же процессы промерзания способствуют созданию прочных, но более хрупких конденсационных связей, которые легко разрушаются и слабо восстанавливаются при механическом воздействии. На это указывают низкие значения предела пластичной деформации при повышенной прочности межчастичных почвенных связей. Серо-гумусовый горизонт АУ почвы участка КУ-I при максимальных значениях модуля упругости ($G' = 1,23 \cdot 10^6$ Па) характеризуется наиболее низким значением предела пластичности (величина показателя CROSSOVER составляет 1,57%). В нижележащем горизонте ЕL (12–23 см) происходит резкое увеличение значений предела пластичной деформации (CROSSOVER = 5,18%), что может быть обусловлено повышенным трением выветрелых и диспергированных минеральных частиц в процессе оподзоливания и промораживания [29, 38].

В средней и нижней части профиля дерново-подзолистой почвы реологические показатели прочности и пластичности выравниваются и становятся менее динамичными (см. табл. 3). Высокая прочность контактов (G') постепенно ослабляется книзу до $4,7 \cdot 10^5$ Па, величины предела пластичной деформации (CROSSOVER) при этом выходят на средние по профилю значения 4,2%. В то же время значения диапазона упругой деформации (LVE-range), наоборот, увеличиваются от верхней к нижней части профиля с 0,003% (горизонт АУ) до 0,0073% (ВС). Такое изменение реологических свойств обусловлено постепенным ослаблением вниз по профилю Л-2 педогенных факторов и проявлением реологических свойств, в большей степени связанных с гранулометрическим и минералогическим составом почвообразующей породы. Эта связь носит опосредованный характер, так как минеральные глинистые частицы более тяжелого по гранулометрическому

составу текстурного горизонта (ВТ) и материнской почвообразующей породы (С) способствуют повышенному накоплению влаги, которая обволакивает почвенные частицы, увеличивая расстояние между ними и ослабляя тем самым межчастичное взаимодействие [18]. Однако при этом значительно теряется общая жесткость структуры или прочность межчастичных контактов (G'). Не исключено, что повышенный диапазон упругой деформации (LVE-range) в нижней части профиля Л-2 может быть обусловлен различной формой глинистых частиц. Последнее создает дополнительное упругое сопротивление при деформации [39].

В подзолистой с микропрофилем подзола текстурно-дифференцированной почве, формирующейся в условиях средней тайги (КУ-II, разрез Р-1-П), наиболее прочные межчастичные контакты ($G' = 1,29 \cdot 10^6 - 1,36 \cdot 10^6$ Па) зафиксированы в подгоризонтах микропрофиля подзола – EL[e] (5–10 см) и EL[hf] (10–15 см). Повышенная прочность здесь также обусловлена иллювиальной пропиткой и цементацией почвенной массы высоко- и низкомолекулярными органическими веществами в сочетании с влиянием альфегумусовых соединений (см. табл. 2). В этих горизонтах (EL[e]–EL[hf]) выявлено наиболее высокое для минеральной части профиля содержание $C_{\text{общ}}$ (0,31–0,70%) и повышенное – оксалатрастворимых форм соединений железа по Тамму (Fe_2O_3 0,31–0,56%). Повышенная жесткость подгоризонтов микропрофиля подзола может быть обусловлена также дилатантным упрочнением частиц в начале деформационного процесса вследствие низкого содержания здесь частиц илистой фракции. Дополнительным фактором, определяющим формирование контактов с повышенной прочностью в верхних горизонтах почвы участка КУ-II, могут служить процессы промерзания. В зимний период почвы на данном участке промерзают до глубины 40 см [40]. Воздействие всех этих факторов приводит к образованию очень прочных конденсационных взаимодействий с низким диапазоном упругого деформирования (величина LVE-range составляет 0,0033%). Такие контакты, как отмечено ранее, быстро разрушаются при механическом воздействии, медленно и слабо восстанавливаясь впоследствии.

В направлении к нижней части профиля наблюдается ослабление прочности межчастичных контактов с минимальными значениями G' ($4,65 \cdot 10^5$ Па) в нижней части текстурно-дифференцированного горизонта ВТ (100–120 см). При этом значения диапазона упругой деформации, наоборот, несколько увеличиваются (LVE-range 0,0049%), что аналогично поведению реологических свойств почвы южной тайги (разрез Л-2). Ослабление прочности контактов обусловлено постепенным утяжелением гранулометрического состава породы и более гидрофильными свойствами минеральных глинистых частиц. В срединной части профиля, а именно в горизонте BEL (45–60 см), зафиксированы максимальные значения содержания оксалатрастворимых форм железа по Тамму (0,76%) и органического углерода (0,38%). Однако в связи с максимально высоким содержанием здесь илистых (34%) и глини-

стых (51%) частиц эти соединения на усиление прочности контактов уже не оказывают влияния.

Значения предела пластичной деформации (CROSSOVER) практически не меняются по профилю. Наиболее высокие показатели этого параметра характерны для подгоризонтов микропрофиля подзола EL[e]-EL[hf] (2,8%). Механизм увеличения предела пластичной деформации в этой части профиля подзолистой текстурно-дифференцированной почвы скорее всего аналогичен механизму возрастания этой величины в элювиальном горизонте EL (12–23 см) дерново-подзолистой почвы.

При переходе от текстурно-дифференцированных почв южной и средней тайги к криометаморфическим почвам северной, крайнесеверной тайги и лесотундры набор факторов, влияющих на их реологическое поведение, остается практически неизменным. Однако появляются некоторые особенности, связанные с изменением гидротермического режима почв в условиях более холодного с избыточным увлажнением климата. В криометаморфических почвах значимую роль начинают играть глее-альфегумусовые процессы миграции и аккумуляции подвижных органических веществ и органо-минеральных соединений железа и алюминия, а также более интенсивные процессы промерзания почв. В почве, формирующейся в биоклиматических условиях северной тайги (участок КУ–III), наиболее прочные межчастичные контакты формируются в системе горизонтов Eg–ВНФ–BF ($2,28 \cdot 10^6$ – $3,66 \cdot 10^6$ Па). Подзолистый горизонт Eg (8–13 см) при сравнительно высокой прочности контактов ($G' = 2,28 \cdot 10^6$ Па) характеризуется наиболее высокими значениями предела пластичной деформации (величина CROSSOVER составляет 4,2%) и диапазона упругой деформации (LVE-range 0,0033%). Такие свойства обусловлены сравнительно высоким содержанием здесь органических веществ ($C_{\text{общ}} = 1,54\%$) при незначительном количестве альфегумусовых соединений (Fe_2O_3 , по Тамму, 0,07%). В нижележащем горизонте ВНФ (13–15 см) активное накопление иллювиальных органических веществ ($C_{\text{общ}} = 2,20\%$) и альфегумусовых соединений (Fe_2O_3 , по Тамму, 1,38%) обеспечивает наиболее высокие показатели прочности ($G' = 3,66 \cdot 10^6$ Па) и диапазона упругой деформации (0,0033%). В то же время значения предела пластичной деформации снижаются здесь почти в два раза (2,7%), что говорит о появлении упругохрупких свойств в межчастичных взаимодействиях. Минеральная масса горизонта BF, который генетически является продолжением горизонта ВНФ, при достаточно высокой прочности контактов ($2,51 \cdot 10^6$ Па) отличается низкими величинами диапазона упругой деформации (0,00148%) и предела пластичной деформации (2,03%), что указывает на повышение хрупкости межчастичных контактов. Такой результат обусловлен снижением доли иллювиальных подвижных органических веществ ($C_{\text{общ}} = 1,09\%$) при сохранении высокого уровня аккумуляции оксалатрастворимых форм соединений железа (Fe_2O_3 , по Тамму, 1,11%). Это согласуется с данными В.В. Аbruковой, А.С. Манучарова [34] и Л.П. Аbruковой [41], отмечавших

связь между прочностью почвенных контактов и содержанием подвижных форм полуторных оксидов, а также с работами Н.А. Азовцевой с соавт. [42], подтверждающими значимую роль гумусовых веществ в повышении прочности контактов между глинистыми частицами. На появление значительной жесткости в межчастичных взаимодействиях при накоплении в почвах дитионитрастворимых форм железа указывают исследования W. Markgraf et al. [12], N. Stoppe и R. Horn [19].

Повышение прочности контактов в северотаежной почве помимо влияния альфегумусовых соединений определяется более выраженным воздействием криогенного фактора. Проведенные нами наблюдения за температурным режимом почвы участка КУ-III показали следующее. В зимний период устойчивые отрицательные температуры фиксировались до глубины 20–30 см. Так называемая «нулевая завеса» (продолжительный период с околонулевыми температурами в пределах $0 \pm 0,1^\circ\text{C}$), с которой связывают формирование специфичного CRM-горизонта [8], приурочена к глубине 30–50 см. Наиболее вероятно, что именно этим обстоятельством (промерзание и формирование фронта промерзания с длительным периодом «нулевой завесы») определяется некоторое повышение в профиле величин прочности G' до $2,08 \cdot 10^6$ Па на глубине 40–60 см (горизонт CRM1). Как отмечено ранее [34], повышение прочности почвенных контактов при промораживании почв обусловлено дегидратацией и уплотнением почвенных частиц с формированием прочных конденсационных межчастичных взаимодействий. Криометаморфическое оструктурирование в рассматриваемом светлоземе иллювиально-железистом (разрез Р–3) охватывает минеральную часть профиля до глубины 115 см. Не исключено, что горизонты CRM2 (60–70 см) и CRM3 (70–115 см) являются своего рода реликтовыми образованиями, оставшимися от прошлых климатических периодов, характеризующихся более холодными температурными условиями [31]. В настоящее время, в условиях возможного потепления климата, при отсутствии стабильно низких температур в профиле почвы может начаться деградация CRM-горизонтов.

Вниз по профилю разреза Р–3 прочность контактов постепенно снижается, достигая минимальных значений величины G' ($2,50 \cdot 10^5$ Па) в материнской породе С. Значения диапазона упругой деформации и предела пластичной деформации варьируют в пределах 0,00148–0,0033% (LVE-range) и 1,85–3,8% (CROSSOVER) без общей тенденции к понижению или повышению, как это наблюдалось в профиле почв южной (Л–2) и средней (Р–1–П) тайги. Такое поведение реологических свойств почвы Р–3 обусловлено более легким составом породы и низким содержанием обменных оснований в сравнении с текстурно-дифференцированными почвами. Таким образом, активное накопление подвижных органических веществ и альфегумусовых соединений, а также более длительные и мощные процессы промерзания смещают микроструктурные контакты в профиле северотаежного светлозема в сторону более прочных, но хрупких взаимодействий.

Аналогичная картина отмечена и для светлосема иллювиально-железистого почечно-гумусового глееватого крайнесеверной тайги (участок КУ-IV, разрез Р-39). В его профиле при величинах прочности G' до $1,15 \cdot 10^6$ Па, наиболее высокие показатели диапазона упругой деформации (LVE-range 0,0033%) и предела пластичной деформации (CROSSOVER 2,34%) отмечены для верхнего подзолистого горизонта Eg,hi (4–7 см), что сопряжено с высоким содержанием здесь органических веществ ($C_{\text{общ}} = 2,0\%$) и незначительным – альфегумусовых соединений (Fe_2O_3 , по Тамму, 0,45%). В системе иллювиально-(гумусово)-железистых горизонтов микропрофиля подзола ВНФ–ВФ повышенная прочность межчастичных контактов (значения модуля упругости G' $1,84 \cdot 10^6$ – $1,52 \cdot 10^6$ Па) также сочетается с минимальными значениями предела пластичной деформации (CROSSOVER 1,01–1,22%) и более низкими по сравнению с горизонтом Eg,hi показателями диапазона упругой деформации (LVE-range = 0,00149–0,00150%). Как и в профиле северотаежного светлосема, полученные для почвы крайнесеверной тайги данные сопряжены с аккумуляцией в горизонтах ВНФ–ВФ органических веществ ($C_{\text{общ}} 2,6$ – $1,47\%$) и комплексных альфегумусовых соединений железа (Fe_2O_3 , по Тамму, 1,32–0,95%). Максимальные значения прочности межчастичных контактов (G' до $2,29 \cdot 10^6$ Па) при незначительных величинах диапазона упругой деформации (0,00150%) и предела пластичной деформации (CROSSOVER = 1,30%) зафиксированы здесь в средней части профиля – в криометаморфических горизонтах Всrm (17–30 см), CRM1 (33–46 см) и CRM2 (46–60 см). Наиболее вероятно, что это повышение прочности обусловлено процессами промерзания с формированием зоны «нулевой завесы», так как в этих горизонтах, с одной стороны, не происходит накопления железа, а с другой – высокое содержание илистых и глинистых частиц (см. табл. 2) должно, наоборот, приводить к снижению жесткости контактов. Результаты почвенно-температурных наблюдений [37] подтверждают значимость криогенного фактора. Глубина промерзания (включая зону с околонулевыми температурами $0 \pm 0,1^\circ C$) достигает в почве крайнесеверной тайги 50 см. Длится этот период в течение 3,5 месяца. Вниз по профилю величины прочности G' убывают до $1,16 \cdot 10^6$ Па вследствие снижения (или отсутствия) влияния педогенных факторов. Показатели предела пластичной (1,01–1,49%) и диапазона упругой (0,00148–0,0033%) деформации находятся постоянно на низком уровне, что, видимо, обусловлено слабой гидрофильностью глинистых минералов почвообразующих пород аналогично почве участка КУ-III.

В биоклиматических условиях лесотундры (участок КУ-V) отмечается некоторое ослабление миграции по профилю альфегумусовых соединений (см. табл. 2). Формирующийся под подзолистым горизонтом Eg,hi иллювиально-железистый горизонт ВФ (15–27 см) характеризуется незначительной аккумуляцией оксалат- и дитионитрастворимых форм железа по сравнению с горизонтами ВНФ–ВФ в северо- (КУ-III) и крайнесеверотаежном (КУ-IV) светлосемах. Наиболее прочные контакты с максимальными значениями мо-

дуля упругости G' ($2,64 \cdot 10^6$ Pa) в профиле P–4–1 также зафиксированы в верхнем подзолистом горизонте Eg_{hi} (5–15 см). Однако крайне низкие значения предела пластичной (CROSSOVER 0,97%) и диапазона упругой (LVE–range 0,00147%) деформации, полученные для этого горизонта, свидетельствуют о значительной хрупкости этих контактов. Как отмечает Л.П. Аbruкова [41], органические вещества фульватной природы отрицательно влияют на процессы структурообразования, являясь не коагуляторами, а стабилизаторами коллоидной части почв, и, таким образом, способствуют проявлению пылинно-дилатантных свойств при их переувлажнении.

Низкие значения упругости межчастичных контактов сохраняются по всему профилю разреза P–4–1. Некоторое повышение прочности G' (до $1,85 \cdot 10^6$ Pa), отмеченное в горизонте B_{cm} (27–45 см), наиболее вероятно обусловлено процессами промерзания с формированием на данной глубине фронта промерзания, существующего в течение трех-четырех месяцев [37]. Вниз по профилю прочность контактов G' постепенно убывает (до $1,25 \cdot 10^6$ Pa) с резким снижением величины предела пластичной деформации в подстилающей породе (гор. D, глубина 110–140 см), отличающейся более легким опесчаненным гранулометрическим составом (см. табл. 2). Полученные данные (сравнительно высокие значения прочности контактов практически по всему профилю почвы в сочетании с крайне низкими значениями диапазона упругой деформации и невысокими величинами предела пластичной деформации) свидетельствуют о слабой устойчивости данной почвы к механическим нагрузкам.

Согласно результатам статистической обработки полученных данных, показатель диапазона упругой деформации (LVE-range) положительно коррелирует с содержанием обменных оснований ($p = 0,000001$) и частиц физической глины ($p = 0,007$), отрицательно – с содержанием дитионитрастворимых форм железа ($p = -0,07$). Аналогичная зависимость от содержания обменных оснований ($p = 0,0008$) и частиц физической глины ($p = 0,004$) выявлена и для величины предела пластичной деформации (CROSSOVER). То есть более тяжелая по гранулометрическому составу 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 упруговязкое или пластичное состояние [17]. Для величины прочности (G') межчастичных почвенных контактов отрицательная корреляционная связь выявлена с содержанием обменных оснований ($p = -0,01$) и положительная – с показателем соотношения общего углерода и общего азота C/N ($p = 0,03$). Получается, что чем шире величина C/N, тем выше прочностные характеристики межчастичных почвенных взаимодействий. В то же время увеличение в породе обменных оснований снижает жесткость почвенных контактов. Известно, что широкие показатели соотношения C/N в подзолистых почвах обусловлены слабой трансформацией органического вещества

с преобладанием фульватного типа гумуса, а также высоким содержанием низкомолекулярных органических веществ [43]. Кроме того, снижению содержания азота в составе почвенного органического вещества способствуют процессы оглеения [44]. К северу возрастает фульватный характер гумуса, усиливается его потечность, что способствует увеличению в профиле почв мощности слоя с более высокими показателями прочности почвенных контактов. В условиях Севера альфегумусовые соединения – основные элементы, принимающие участие в процессе микроагрегатообразования при повышенной влажности и ненасыщенности почв основаниями [45, 46].

Таким образом, реологические исследования таежных почв показали, что при продвижении к северу таежной зоны заметно снижается устойчивость почвенной микроструктуры к механическим воздействиям с формированием прочных, но более хрупких межчастичных взаимодействий. В почвах южной (разрез Л–2) и средней (Р–1–П) тайги жесткие межчастичные контакты со значениями G' более $1,00 \cdot 10^6$ Па приурочены только к верхней части профиля (до глубины 15–34 см), в почве северной тайги (Р–3) – до глубины 70 см, в почвах крайнесеверной тайги (Р–39) и лесотундры (Р–4–1) повышенной прочностью межчастичных взаимодействий отличается весь профиль до глубины более 100 см. В светлоземах интенсивное поступление подвижных органических веществ наряду с активным протеканием глее-альфегумусовых процессов, длительным промерзанием почв, а также более легким гранулометрическим составом почвообразующих пород способствует формированию прочных, но более хрупких межчастичных взаимодействий. Хрупкие слабоупругие контакты с низкой пластичностью обладают узким пределом деформирования, быстро разрушаются при нагрузках, слабо восстанавливаясь в течение длительного времени после их снятия. Этим объясняется склонность северных почв к пльвунности и солифлюкции. В исследуемом нами ряду таежных почв наиболее устойчивые (с наиболее широким диапазоном упругой и пластичной деформации) к механическим нагрузкам межчастичные почвенные взаимодействия формируются в дерново-подзолистых текстурно-дифференцированных почвах южной тайги, чему способствует менее агрессивный состав поступающих из подстилки органических веществ, в состав которых входят гуматы кальция [6]. Полученный вывод согласуется с результатами исследований черноземов Курской области [17] и Алтайского Приобья [15]. Авторы этих работ отмечают рост устойчивости к механическим нагрузкам в почвах, более богатых органическим веществом, а также с высоким содержанием карбонатов в породе. Ими показано, что органическое вещество черноземов выполняет основную структурирующую роль в межчастичных взаимодействиях, повышая устойчивость (водоустойчивость в насыщенном состоянии) и препятствуя переходу почвы в текучее состояние. При уменьшении влажности органическое вещество препятствует формированию прочных (кристаллизационных) связей меж-

ду минеральными частицами почв, обеспечивая тем самым благоприятное агрегатное строение и не позволяя почвенным частицам цементироваться в глыбы [17].

Выводы

Впервые определены реологические характеристики почвенных паст автоморфных таежных подзолистых почв, выполненные при влажности максимального набухания методом амплитудной развертки на реометре MCR-302 («Anton Paar», Австрия).

Реологические особенности автоморфных таежных и лесотундровых почв, обусловленные гидрологическими и климатическими факторами их формирования, наиболее четко проявляются в верхних горизонтах профиля почв, в нижней части профиля в большей мере сохраняются реологические параметры, определяемые физико-химическими и литологическими свойствами почвообразующих пород.

Наиболее прочные межчастичные контакты со значениями G' более $1,00 \cdot 10^6$ Па формируются в горизонтах с высоким содержанием гумусовых веществ и органоминеральных альфегумусовых соединений. В дерново-подзолистой текстурно-дифференцированной почве южной тайги (Л2) – это гумусово-аккумулятивный горизонт АУ, в подзолистой с микропрофилем подзола текстурно-дифференцированной почве средней тайги (Р–1–П) – иллювиальный горизонт микропрофиля подзола EL[hf], в светлоземах иллювиально-железистых северной (Р–3), крайнесеверной (Р–39) тайги и лесотундры (Р–4–1) – горизонты микропрофиля подзола (Eg–BHF–BF). Повышенная прочность структуры обусловлена цементацией почвенных частиц в результате поступления альфегумусовых соединений с формированием жестких межчастичных контактов, а также влиянием процессов промерзания. Воздействие промораживания на реологические свойства почв наиболее четко проявляется в профиле светлоземов, где в области формирования нулевой завесы ($0 \pm 0,1^\circ\text{C}$), т.е. на глубине 30–50 см от поверхности почвы, зафиксирована повышенная прочность межчастичных взаимодействий, обусловленная конденсационным уплотнением частиц в процессе промерзания.

К северу (в направлении от южной тайги к лесотундре) наблюдается усиление прочных, но хрупких межчастичных почвенных взаимодействий вследствие более интенсивных процессов оглеения, а также более мощного промерзания почв. В автоморфных почвах среднее по профилю значение модуля упругости (G') увеличивается от $7,95 \cdot 10^5$ Па в почве южной тайги (Л–2) до $1,69 \cdot 10^6$ Па в почве лесотундры (Р–4–1). К северу снижаются значения предела упругости (со значениями LVE-range менее 0,00328%) и пластичности (CROSSOVER менее 3,48%), что свидетельствует о повышении хрупкости прочных межчастичных взаимодействий. Прочные, но хрупкие межчастичные почвенные контакты обладают низкой структурной устойчи-

востью к механическим нагрузкам, что при повышении влажности может обуславливать проявление тиксотропности или плывуности почв.

Литература

1. Атлас почв Республики Коми / под ред. Г.В. Добровольского, А.И. Таскаева, И.В. Забоевой. Сыктывкар : ООО «Коми республиканская типография», 2010. 356 с.
2. Шамрикова Е.В., Груздев И.В., Пунегов В.В., Хабибуллина Ф.М., Кубик О.С. Водорастворимые низкомолекулярные органические кислоты в автоморфных суглинистых почвах тундры и тайги // Почвоведение. 2013. № 6. С. 691–697. doi: [10.7868/S0032180X13060099](https://doi.org/10.7868/S0032180X13060099).
3. Забоева И.В. Почвы и земельные ресурсы Коми АССР. Сыктывкар, 1975. 343 с.
4. Структурно-функциональная организация почв и почвенного покрова европейского Северо-Востока. СПб. : Наука, 2001. 224 с.
5. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты и общая теория гумусообразования. М. : Изд-во МГУ, 1990. 325 с.
6. Канев В.В. Параметры оглеения и подзолообразования в почвах на покровных суглинках северо-востока Русской равнины. Екатеринбург : УрО РАН, 2001. 221 с.
7. Классификация и диагностика почв СССР / сост.: В.В. Егоров, В.М. Фридланд, Е.Н. Иванова, Н.И. Розов, В.А. Носин, Т.А. Фриев. М. : Колос, 1977. 224 с.
8. Тонконогов В.Д. Автоморфное почвообразование в тундровой и таежной зонах Восточно-Европейской и Западно-Сибирской равнин. М. : Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2010. 304 с.
9. Пастухов А.В. О генезисе и классификационном положении автоморфных почв на покровных суглинках в микроэкотоне тундра-лесотундра // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2008. Сер. 3. Вып. 3. С. 117–126.
10. Классификация и диагностика почв России / под ред. Л.Л. Шишова, В.Д. Тонконогова, И.И. Лебедевой, М.И. Герасимовой. Смоленск : Ойкумена, 2004. 342 с.
11. Полевой определитель почв России. М. : Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
12. Markgraf W., Horn R., Peth S. An approach to rheometry in soil mechanics: Structural changes in bentonite, clayey and silty soils // Soil Tillage Res. 2006. Vol. 91. PP. 1–14.
13. Mezger T.G. The Rheology Handbook / 3-rd Revised Edition. Hanover, Germany, 2011. PP. 436.
14. Хайдапова Д.Д., Холопов Ю.В., Забоева И.В., Лаптева Е.М. Реологические особенности коагуляционной структуры северотаежных торфянисто-подзолистоглееватых почв Европейского Северо-Востока // Вестник Московского университета. Сер. 17. Почвоведение. 2014. №1. С. 20–25.
15. 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 государственного аграрного университета. 2014. № 8. С. 32–38.
16. Болотов А.Г. Методика измерения реологических свойств почвы с помощью реометра // Дальневосточный аграрный вестник. 2015. № 3. С. 13–17.
17. 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. doi: [10.7868/S0032180X16080049](https://doi.org/10.7868/S0032180X16080049)
18. 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. Vol. 40(0). doi: [10.1590/18069657rbcS20150286](https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20150286)

19. Stoppe N., Horn R. Microstructural strength of tidal soils – a rheometric approach to develop pedotransfer functions // J. Hydrol. Hydromech. 2018. Vol. 66. PP. 87–96. doi: [10.1515/johh-2017-0031](https://doi.org/10.1515/johh-2017-0031)
20. Атлас Республики Коми по климату и гидрологии / под ред. А.И. Таскаева. М. : ДиК; Дрофа, 1997. 116 с.
21. СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная версия СНиП 23-01-99. М., 2012. 109 с.
22. IUSS Working Group WRB. 2015. 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.
23. Теория и практика химического анализа почв / под ред. Л.А. Воробьевой. М. : ГЕОС, 2006. 400 с.
24. Фукс Г.И., Аbruкова Л.П., Бурибаев Я.Б. Влияние поглощенных оснований на реологические свойства почвообразующих глин // Почвоведение. 1973. № 10. С. 70–90.
25. Горбунов Н.И., Аbruкова Л.П. Реологические свойства и минералогический состав слитых почв // Почвоведение. 1974. № 8. С. 74–85.
26. Манучаров А.С., Аbruкова В.В., Черноморченко Н.И. Методы и основы реологии в почвоведении. М. : Изд-во МГУ, 1990. 97 с.
27. Русанова Г.В., Денева С.В., Шахтарова О.В. Особенности генезиса автоморфных почв северной лесотундры (юго-восток Большеземельской тундры) // Почвоведение. 2015. № 2. С. 145–155. doi: [10.7868/S0032180X15020100](https://doi.org/10.7868/S0032180X15020100)
28. Пастухов А.В. Микроморфологическое строение мерзлотных и длительно сезонно-промерзающих суглинистых почв Европейского Северо-Востока // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2012. Вып. 4(12). С. 30–39.
29. 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.
30. Конищев В.Н., Рогов В.В. Влияние криогенеза на глинистые минералы // Криосфера Земли. 2008. Т. XII, № 1. С. 51–58.
31. Русанова Г.В., Лаптева 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. XIV, № 3. С. 52–60.
32. Жангуров Е.В., Лебедева (Верба) М.П., Забоева И.В. Микростроение генетических горизонтов автоморфных таежных почв Тимана // Почвоведение. 2011. № 3. С. 288–299. doi: [10.1134/S1064229311030203](https://doi.org/10.1134/S1064229311030203)
33. Вершинин П.В. Почвенная структура и условия ее формирования. М. : Изд-во Академии наук СССР, 1958. 187 с.
34. Аbruкова В.В., Манучаров А.С. Реологическая характеристика тундровой поверхностно-глеевой почвы // Почвоведение. 1986. № 9. С. 44–52.
35. 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 [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (ads.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. 151 p.
36. Дымов А.А., Старцев В.В. Изменение температурного режима подзолистых почв в процессе естественного лесовозобновления после сплошнолесосечных рубок // Почвоведение. 2016. № 5. С. 599–608. doi: [10.7868/S0032180X16050038](https://doi.org/10.7868/S0032180X16050038)
37. Каверин Д.А., Пастухов А.В., Жангуров Е.В. Особенности температурного режима светлосемов северотаежных ландшафтов (европейский Северо-Восток России) // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2016. № 1 (25). С. 23–29.
38. Соколова Т.А., Шоба С.А., Бганцов В.Н., Чернова Г.Н. Преобразования минеральной массы в подзолистых почвах на озерно-ледниковых глинах // Почвоведение. 1983. № 1. С. 101–112.

39. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов: учебное пособие для строительных вузов. М. : Высшая школа, 1978. 447 с.
40. Мокиев В.В. Промерзание почв как результативный признак метеорологических показателей холодного периода года (на примере промерзания освоенной и целинной суглинистых почв среднетаежной подзоны Республики Коми) // Вестник Института биологии. 2009. № 5. С. 16–19.
41. Абукурова Л.П. Кинетика процессов тиксотропного структурообразования в почвенных суспензиях // Почвоведение. 1970. № 3. С. 104–114.
42. Азовцева Н.А., Лазарева Е.В., Парфенова А.М., Хайдапова Д.Д., Ключева В.В. Влияние органических веществ на реологическое поведение почв и модельных почвенных систем при различных режимах увлажнения // Современные проблемы изучения почвенных и земельных ресурсов. М. : Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2017. С. 66–67.
43. Кононова М.М. Органическое вещество почвы. Его природа, свойства и методы изучения. М. : Изд-во АН СССР, 1963. 314 с.
44. Зайдельман Ф.Р. Генезис и экологические основы мелиорации почв и ландшафтов : учебник. М. : КДУ, 2009. 448 с.
45. Тюлин А.Ф. Органоминеральные коллоиды в почве, их генезис и значение для корневого питания высших растений. М. : Изд-во АН СССР, 1958. 52 с.
46. Антипов-Каратаев И.Н. Вопросы физикохимии почв и методы исследования. М. : Изд-во АН СССР, 1959. 157 с.

*Поступила в редакцию 15.02.2018; повторно 15.05.2018 г.;
принята 17.05.2018 г.; опубликована 15.06.2018 г.*

Авторский коллектив:

Холопов Юрий Владимирович – инженер-исследователь отдела почвоведения Института биологии Коми научного центра УрО РАН (Россия, 167982, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28).

E-mail: Yuraholopov@yandex.ru

Хайдапова Долгор Доржиевна – доцент, канд. биол. наук, доцент кафедры физики и мелиорации почв факультета почвоведения Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1-12).

E-mail: dkhaydapova@yandex.ru

Лаптева Елена Морисовна – доцент, канд. биол. наук, зав. отделом почвоведения Института биологии Коми научного центра УрО РАН (Россия, 167982, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28).

E-mail: lapteva@ib.komisc.ru

For citation: Kholopov YuV, Khaydapova DD, Lapteva EM. Physico-mechanical properties of automorphic taiga soils of the Komi Republic (according to rheological studies). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2018;42:24-53. doi: 10.17223/19988591/42/2 In Russian, English Summary

Yuriy V. Kholopov¹, Dolgor D. Khaydapova², Elena M. Lapteva¹

¹*Institute of Biology, Komi Scientific Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, Russian Federation.*

²*Department of Soil Science, Moscow State University, Moscow, Russian Federation.*

Physico-mechanical properties of automorphic taiga soils of the Komi Republic (according to rheological studies)

We carried out rheological studies of automorphic taiga soils formed at silty-loamy rocks in spruce forests to assess their structural-mechanical features determining soil

resistance to the mechanical impact. Soil pits were made at five model sites located in taiga and forest-tundra zones (Table 1 and Fig. 1). Rheological measurements were performed using a module rheometer MCR 302 “Anton Paar” (Austria) by the method of amplitude sweep (oscillating method) using measurement systems plate-by-plate. Rheological properties were assessed according to the following parameters (Fig. 2): the modulus of elasticity (G'), the elastic deformation range - LVE-range (Linear viscoelastic), the modulus of viscosity (G''), and plastic deformation range - CROSSOVER (Flow point) measured using the point of modulus crossover ($G'=G''$). We also investigated the main physico-chemical properties of soils: pH, content of organic carbon, exchangeable bases, oxalate- and dinitro-soluble forms of ferrum, and granulometric composition. Temperature regime of soils was studied using loggers “HOBO-U12” (USA) set at the depth of 0-20-50-100 cm.

The clearest rheological features of taiga soils due to their hydrological and climate environment were observed in the upper mineral horizons. In the lower part of the soil profile, rheological parameters determined by physico-chemical and lithological soil properties were clearer. The most stable interparticle contacts with G' over $1.00 \cdot 10^6$ Pa were noticed in the horizons with a high content of labile humic substances of fulvic origin and organic-mineral alphehumic compounds (Table 3 and 4). At site CS-I with soil Folic Albic Retisol, this was humus accumulative horizon AY. In the podzolic soil with podzol microprofile texture-differentiated soil of the middle taiga (site CS-II Folic Albic Retisol), it was illuvial horizon of podzol microprofile EL[hf]. In illuvial ferrous svetlozems (Folic Albic Stagnosols) of the northern (CS-III), far northern taiga (CS-IV) and forest-tundra (CS-V), these were horizons of podzol microprofile (Eg-BHF-BF). An increased stability of the structure was due to the cementation of soil particles as a result of alphehumic compounds intake with the following formation of strong interparticle contacts. Another reason was the seasonal freezing. The impact of freezing on rheological properties of soils was the clearest in svetlozems (Folic Albic Stagnosols). An increased stability of interparticle contacts was found in the area of zero veil ($0 \pm 0.1^\circ\text{C}$) at the depth of 30-50 cm due to condensation sealing of the particles caused by freezing. Moving to the north (from southern taiga to forest tundra), the stability of soil microstructure against mechanical damages decreased due to the formation of strong but fragile interparticle contacts. The mean value of the modulus of elasticity (G') increased from $7.95 \cdot 10^5$ Pa (southern taiga, soil L-2) to $1.69 \cdot 10^6$ Pa (forest tundra, soil P-4-1). LVE-range values decreased when moving to the north (less than 0.00328%). Plastic deformation range CROSSOVER was less than 3.48%, which indicated an increased fragility of strong interparticle contacts. These strong but fragile contacts have low structural stability and demonstrate rapid destruction and slow recovering under extreme mechanical influences.

The paper contains 2 Figures, 3 Tables and 46 References.

Key words: rheology; structurization; cryometamorphic soils; ferrous-illuvial svetlozems; podzolic texture-differentiated soils; Folic Albic Retisol; Folic Albic Stagnosols.

Funding: This work was partially supported by the Project “Revealing the general patterns in the formation and functioning of peat soils in the Arctic and Subarctic sectors of the Russian European Northeast” (No AAAA-A17-117122290011-5), and the RFBR grant No 16-04-01111.

References

1. *Atlas pochv Respubliki Komi* [Soil Atlas of the Komi Republic]. Dobrovol'skiy GV, Taskaev AI, Zaboeva IV editors. Syktyvkar: OOO Komi respublikanskaya tipografiya Publ.; 2010. 356 p. In Russian
2. Shamrikova EV, Gruzdev IV, Punegov VV, Khabibullina FM, Kubik OS. Water-soluble low-molecular-weight organic acids in automorphic loamy soils of the tundra and taiga zones. *Eurasian Soil Science*. 2013;46(6):654-659. doi: [10.7868/S0032180X13060099](https://doi.org/10.7868/S0032180X13060099)
3. Zaboeva IV. Pochvy i zemel'nye resursy Komi ASSR [Soils and land resources of the Komi ASSR]. Syktyvkar: Komi knizhnoe izdatelstvo Publ.; 1975. 375 p. In Russian
4. *Strukturno-funktsional'naya organizatsiya pochv i pochvennogo pokrova evropeyskogo Severo-Vostoka* [Structural-functional organization of soils and soil cover of the European North-East]. Zaydel'man FR and Zaboeva IV, editors. St. Petersburg: Nauka Publ.; 2001. 224 p. In Russian
5. Orlov DS. Gumusovye kisloty i obshchaya teoriya gumusobrazovaniya [Humic acids and general theory of humification]. Moscow: Moscow State University Publ.; 1990. 325 p. In Russian
6. Kanev VV. Parametry ogleeniya i podzoloobrazovaniya v pochvakh na pokrovnykh suglinkakh severo-vostoka Russkoy ravniny [Parameters of gleying and podzol formation of soils on loams in the North-East of the Russian plain]. Yekaterinburg: UrO RAN Publ.; 2001. 221 p. In Russian
7. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR* [Classification and diagnostics of soils of the USSR]. Egorov VV, Fridland VM, Ivanova EN, Rozov NI, Nosin VA and Frieve TA, editors. Moscow: Kolos Publ.; 1977. 224 p. In Russian
8. Tonkonogov VD. Avtomorfnoe pochvoobrazovanie v tundrovoy i taezhnoy zonakh Vostochno-Evropeyskoy i Zapadno-Sibirskoy ravnin [Automorphic soil formation in the tundra and taiga zones of the East European and West Siberian plains]. Moscow: VV Dokuchaev Soil Institute Publ.; 2010. 304 p. In Russian
9. Pastukhov AV. On genesis and classification position of Automorphic soils in silty loams in tundra-forest-tundra microecotone. *Vestnik Sankt-Peterburskogo universiteta. Biologiya = Vestnik of Saint-Petersburg University. Biology*. 2008;3(3):117-126. In Russian
10. Shishov LL, Tonkonogov VD, Lebedeva II, Gerasimova MI. Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii [Classification and diagnostics of soils of Russia]. Smolensk: Oykumena Publ.; 2004. 342 p. In Russian
11. *Polevoy opredelitel' pochv Rossii* [Field guide of soils in Russia]. Moscow: VV Dokuchaev Soil Institute Publ.; 2008. 182 p. Available at: http://soils.narod.ru/download/field_guide_int.pdf (accessed 11.04.2017). In Russian
12. Markgraf W, Horn R, Peth S. An approach to rheometry in soil mechanics: Structural changes in bentonite, clayey and silty soils. *Soil and Tillage Research*. 2006;91:1-14.
13. Mezger TG. The Rheology Handbook. 3-rd Revised Edition. Hanover: Vincentz Network Publ.; 2011. 436 p.
14. Khaydapova DD, Kholopov YuV, Zaboeva IV, Lapteva EM. Rheological features of coagulative structure north taiga peaty podzolic semi-gley soils of the European North East. *Moscow University Soil Science Bulletin*. 2014;69(1):17-22.
15. Shein YV, Bolotov AG, Khaydapova DD, Milanovskiy YY, Tyugay ZN, Pochatkova TN. Rheological properties of the chernozems of the Altai Priobye (the Ob River area)]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2014;8:32-38. In Russian
16. Bolotov AG. Method of measurement soil rheological properties with a rheometer. *Dal'nevostochnyy agrarnyy vestnik = Far East Agrarian Herald*. 2015;3(35):13-17. In Russian

17. Khaidapova DD, Chestnova VV, Shein EV, Milanovskii EY. Rheological properties of typical chernozems (Kursk oblast) under different land uses. *Eurasian Soil Science*. 2016;49(8):890-897. doi: [10.7868/S0032180X16080049](https://doi.org/10.7868/S0032180X16080049)
18. Pertile P, Reichert JM, Gubiani PI, Holthusen D, Costa A. Rheological parameters as affected by water tension in subtropical soils. *Revista Brasileira de ciência do solo*. 2016;40:e0150286. doi: [10.1590/18069657rbcs20150286](https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20150286)
19. Stoppe N, Horn R. Microstructural strength of tidal soils - a rheometric approach to develop pedotransfer functions. *J. Hydrol. Hydromech*. 2018;66:87-96. doi: [10.1515/johh-2017-0031](https://doi.org/10.1515/johh-2017-0031)
20. *Atlas Respubliki Komi po klimatu i gidrologii* [Atlas of the Komi Republic on climate and hydrology]. Taskaev AI, editor. Moscow: DiK, Drofa Publ.; 1997. 116 p. In Russian
21. *SP 131.13330.2012 Stroitel'naya klimatologiya. Aktualizirovannaya versiya* [Building climatology. Updated version. SNiP 23-01-99]. Moscow: Minregion of the Russia, ZAO "Kodex"; 2012. 109 p. In Russian
22. *IUSS Working Group WRB*. 2015. 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. [Electronic resource]. Available at: <http://www.fao.org/3/a-i3794e.pdf> (assessed 29.12.2017)
23. *Teoriya i praktika khimicheskogo analiza pochv* [Theory and practice of soil chemical analysis]. Vorob'eva LA, editor. Moscow: GEOS Publ.; 2006. 400 p. In Russian
24. Fuks GI, Abrukova LP, Buribaev YaB. Vliyanie pogloshchennykh osnovaniy na reologicheskie svoystva pochvoobrazuyushchikh glin [The influence of absorbed bases on rheological properties of soil-forming clays]. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 1973;10:70-90. In Russian
25. Gorbunov NI, Abrukova LP. Reologicheskie svoystva i mineralogicheskij sostav slityh pochv [Rheological properties and mineralogical composition of compact soils]. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 1974;8:74-85. In Russian
26. Manucharov AS, Abrukova VV, Chernomorchenko NI. Metody i osnovy reologii v pochvovedenii [Methods and the basics of rheology in soil science]. Moscow: Moscow State University Publ.; 1990. 97 p. In Russian
27. Rusanova GV, Deneva SV, Shakhtarova OV. Specific features of the genesis of automorphic soils of the northern forest-tundra (southeast of the Bol'shezemel'skaya tundra). *Eurasian Soil Science*. 2015;48(2):128-138. doi: [10.7868/S0032180X15020100](https://doi.org/10.7868/S0032180X15020100)
28. Pastukhov AV. Micromorphological structure of permafrost - affected and seasonally long-term freezing loamy soils of the European northeaste. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN = Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Division of the Russian Academy of Sciences*. 2012;4(12):30-39. Russian
29. Leporskii OR, Sedov SN, Shoba SA, Bgantsov VN. Rol' promorazhivaniya v razrushenii pervichnykh mineralov podzolistykh pochv [Impact of freezing on destroying primary minerals in podzolic soils]. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 1990;6:112-116. In Russian
30. Konishchev VN, Rogov VV. The influence of cryogenesis on clay - type minerals. *Earth's Cryosphere*. 2008;12(1):51-58. In Russian
31. Rusanova GV, Lapteva EM, Pastukhov AV, Kaverin DA. Modern processes and inherited pedogenic features in soils on mantle loams, southern tundra. *Earth's Cryosphere*. 2010;14(3):52-60. In Russian
32. Zhangurov EV, Zaboeva IV, Lebedeva MP. Microstructure of genetic horizons in automorphic soils of the Timan Ridge. *Eurasian Soil Science*. 2011;44(3):261-271. doi: [10.1134/S1064229311030203](https://doi.org/10.1134/S1064229311030203)
33. Vershinin PV. Pochvennaya struktura i usloviya ee formirovaniya [Soil structure and conditions of its formation]. Moscow: Akademiy nauk SSSR Publ.; 1958. 187 p. In Russian

34. Abrukova VV, Manucharov AS. Reologicheskaya kharakteristika tundrovoy poverkhnostno-gleevoy pochvy [Rheologic characteristics of tundra surface - gley soil]. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 1986;9:44-52. In Russian
35. 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 [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (ads.). IPCC, Geneva, Switzerland. 151 pp. [Electronic resource]. Available at: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf (access 02.02.2018).
36. Dymov AA, Startsev VV. Changes in the temperature regime of podzolic soils in the course of natural forest restoration after clearcutting. *Eurasian Soil Science*. 2016;49(5):551-559. doi: 10.7868/S0032180X16050038
37. Kaverin DA, Pastukhov AV, Zhangurov EV. Features of temperature regime in svetlozems of northern taiga landscapes (European northeast of Russia). *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN = Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Division of the Russian Academy of Sciences*. 2016;1(25):23-29. In Russian
38. Sokolova TA, Shoba SA, Bgantsov VN, Chernova GN. Preobrazovaniya mineral'noy massy v podzolistykh pochvakh na ozerno-lednikovyykh glinakh [Transformation of the mineral mass in podzolic soils on glaciolacustrine clays]. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 1983;1:101-112. In Russian
39. Vyalov SS. Reologicheskie osnovy mekhaniki gruntov: uchebnoe posobie dlya stroitel'nykh vuzov [Rheological fundamentals of soil mechanics: A textbook for institutes of civil engineering]. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 1978. 447 p. In Russian
40. Mokiyev VV. The freezing of the soil as a sign of effective meteorological parameters of the cold period of the year (for example, freezing development and virgin loamy soil middle taiga subzone of the Republic of Komi). *Vestnik Instituta Biologii Komi NC UrO RAN*. 2009;5:16-19. In Russian
41. Abrukova LP. Kinetika protsessov tiksotropnogo strukturoobrazovaniya v pochvennykh suspensiyakh [Kinetics of tixotropic structure forming processes in soil suspension]. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 1970;3:104-114. In Russian
42. Azovtseva NA, Lazareva EV, Parfenova AM, Khaydapova DD, Klyueva VV. Vliyanie organicheskikh veshchestv na reologicheskoe povedenie pochv i model'nykh pochvennykh sistem pri razlichnykh rezhimakh uvlazhneniya [Influence of organic substances on rheological behavior of soils and model soil systems at various modes of moistening]. In: *Sovremennye problemy izucheniya pochvennykh i zemel'nykh resursov* [Modern problems of studying soil and land resources (Moscow, Russia, 28-30 November, 2017)]. Moscow: Pochvennyy Institut im. VV Dokuchaeva Publ.; 2017. pp. 66-67. In Russian
43. Kononova MM. Organicheskoe veshchestvo pochvy. Ego priroda, svoystva i metody izucheniya [Soil organic matter. Its nature, properties and methods of study]. Moscow: Akademiy nauk SSSR Publ.; 1963. 314 p. In Russian
44. Zaydel'man FR. Genezis i ekologicheskie osnovy melioratsii pochv i landshaftov: uchebnik [Genesis and ecological bases of land reclamation of soils and landscapes: A Textbook]. Moscow: KDU Publ.; 2009. 448 p. In Russian
45. Tyulin AF. Organo-mineral'nye kolloidy v pochve, ikh genezis i znachenie dlya kornevogo pitaniya vysshikh rasteniy [Organo-mineral colloids in soil, their genesis and significance for root nutrition of higher plants]. Moscow: Akademiy nauk SSSR Publ.; 1958. 52 p. In Russian
46. Antipov-Karataev IN. Voprosy fiziko-khimii pochv i metody issleovaniya [Questions of soil physics and chemistry and research methods]. Moscow: Akademiy nauk SSSR Publ.; 1959. 157 p. In Russian

Received 15 February 2018; Revised 15 May 2018;
Accepted 17 May 2018; Published 15 June 2018

Authors info:

Kholopov Yuriy V, Research Engineer, Laboratory of Soil Genesis, Geography and Ecology, Soil Science Department, Institute of Biology, Komi Scientific Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 28 Kommunisticheskaya Str., Syktyvkar 167982, Russian Federation.

E-mail: Yuraholopov@yandex.ru

Khaidapova Dolgor D, Cand. Sci. (Biol), Assoc. Prof., Department of Soil Physics and Melioration, Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University, 1-12 Leninskiye Gory, Moscow 119991, Russian Federation.

E-mail: dkhaydapova@yandex.ru

Lapteva Elena M, Cand. Sci. (Biol), Assoc. Prof., Head of Soil Science Department, Institute of Biology, Komi Scientific Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 28 Kommunisticheskaya Str., Syktyvkar 167982, Russian Federation.

E-mail: lapteva@ib.komisc.ru