

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*



**Холопов Юрий Владимирович**

**РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
ТАЕЖНЫХ АВТОМОРФНЫХ И ПОЛУГИДРОМОРФНЫХ  
ПОЧВ РЕСПУБЛИКИ КОМИ**

Специальность 06.01.03 – Агрофизика  
Специальность 03.02.13 – Почвоведение

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата биологических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в отделе почвоведения Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук»

**Научный  
руководитель**

**Лаптева Елена Морисовна,**  
кандидат биологических наук, доцент,  
Институт биологии Коми научного центра Уральского  
отделения Российской академии наук – обособ-  
ленное подразделение ФГБУН Федеральный исследо-  
вательский центр «Коми научный центр Уральского  
отделения Российской академии наук», отдел почво-  
ведения, врио зав. отделом

**Официальные  
оппоненты**

**Шеин Евгений Викторович,**  
доктор биологических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Московский государственный универси-  
тет имени М.В. Ломоносова», факультет почвове-  
дения, кафедра физики и мелиорации почв, профес-  
сор

**Болотов Андрей Геннадьевич**  
доктор биологических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Рос-  
сийский государственный аграрный университет –  
МСХА имени К.А. Тимирязева», факультет агроно-  
мии и биотехнологии, кафедра метеорологии и кли-  
матологии, профессор

**Абакумов Евгений Васильевич**  
доктор биологических наук, профессор РАН, ФГБОУ  
ВО «Санкт-Петербургский государственный универ-  
ситет», биологический факультет, кафедра приклад-  
ной экологии, профессор, и.о. зав. кафедрой

Защита диссертации состоится 10 декабря 2019 г. в 17 ч 00 мин. на заседа-  
нии диссертационного совета МГУ.03.13 Московского государственного уни-  
верситета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, ул. Ленинские  
горы, д.1, стр.12, биологический факультет МГУ, ауд. М-1.

E-mail: [nvkostina@mail.ru](mailto:nvkostina@mail.ru), тел.: 8(495)939-35-46

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной биб-  
лиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте  
ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/247001776/>

Автореферат разослан 8 ноября 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат биологических наук



Костина  
Наталья Викторовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Реологические исследования почв являются одним из направлений изучения их структурно-механических характеристик. Исследование реологических параметров позволяет количественно и качественно оценить характер межчастичного взаимодействия в почвах, а также дать прогноз устойчивости почвенной структуры к различным механическим воздействиям естественного и техногенного происхождения (Mezger, 2011; Шеин и др., 2014; Хайдапова и др., 2016). Совершенствование приборной и методической базы открывает новые возможности для характеристики реологических свойств почв и получения большого количества реологических параметров (Horn, Smucker, 2005; Markgraf et al., 2006, 2010; Шеин и др., 2014; Pertile et al., 2016).

Таежные почвы Республики Коми (РК) являются интересным объектом для изучения их реологических характеристик, так как они формируются в условиях повышенного увлажнения и длительного промерзания с проявлением разнообразных деформационных процессов – тиксотропии, пльвунности, солифлюкции, морозобойного растрескивания, пучения и др. В тоже время реологические исследования почв на этой обширной территории ограничены единичными работами, относящимися к 70-м гг. прошлого столетия, когда были получены первые данные по характеристике процессов тиксотропии на основе изучения реологических свойств тундровых почв РК (Абрукова, 1970; Абрукова, Манучаров, 1986). Исследование физико-механических свойств таежных почв с помощью реологического подхода позволит не только оценить их структурное состояние и устойчивость в условиях изменяющегося климата и возрастающего техногенного давления, но и более четко охарактеризовать специфические особенности таежных почв и выявить их дополнительные диагностические показатели на основе характеристики физических параметров.

**Степень разработанности темы исследований.** В настоящее время по запросу в российской электронной базе ELIBRARY.RU можно найти до 125 научных публикаций по ключевым словам: реология почв, реологические свойства почв. Международная база Web of Science по тем же ключевым словам выдает до 200 научных публикаций. Анализ зарубежной и отечественной литературы (Horn, Smucker, 2005; Алексеев, Калугин, 2009; Markgraf et al., 2010, 2012; Шеин и др., 2014; Pertile et al., 2016; Хайдапова и др., 2015, 2016; Stoppe, Horn, 2018) свидетельствует об активизации на современном этапе исследований в области почвенной реоло-

гии. На территории Республики Коми изучение почв было направлено в первую очередь на установление закономерностей образования, функционирования и продуктивности различных типов почв (Забоева, 1975; Русанова, 1987; Канев, 2002; Тонконогов и др., 2006; Атлас почв..., 2010), выявление специфики формирования в них различных компонентов почвенного органического вещества (Лодыгин и др., 2007, 2014; Габов и др., 2007, 2008; Шамрикова и др., 2012, 2013), кислотно-основных свойств (Шамрикова, 2013, 2018), аккумуляции в почвах органического углерода (Дымов и др., 2013б; Пастухов, Каверин, 2013). Структурно-механические свойства почв, процессы почвенного структурообразования, качества и свойств межчастичных и межагрегатных связей внутри почв оставались до настоящего времени практически не изученными.

**Цель работы** – выявление закономерностей изменения реологических свойств и параметров в зональном ряду почв Республики Коми, формирующихся под таежной растительностью, во взаимосвязи с их физико-химическими свойствами и степенью гидроморфизма.

**Задачи исследования:**

1. Изучить реологические свойства текстурно-дифференцированных (дерново-подзолистые, подзолистые с микропрофилем подзола) и криометаморфических (светлоземы иллювиально-железистые) почв таежной зоны РК, а также их полугидроморфных разностей методом амплитудной развертки на модульном реометре MCR-302 «Anton Paar»;

2. Выявить физико-химические свойства автоморфных и полугидроморфных таежных почв, определяющие их структурно-механические характеристики;

3. Оценить влияние условий увлажнения на реологические свойства таежных почв;

4. Выявить подзональные особенности в реологическом поведении автоморфных и полугидроморфных таежных почв.

**Научная новизна работы.** Впервые с помощью современного метода амплитудной развертки (колебательный метод) определены на цифровом модульном реометре MCR-302 «Anton Paar» реологические свойства различных типов и подтипов таежных почв, развитых на суглинистых почвообразующих породах и занимающих автоморфные и полугидроморфные позиции в зональном ряду от южной тайги до лесотундры. Выявлено влияние условий увлажнения на реологические свойства текстурно-дифференцированных (дерново-подзолистые, подзолистые с микропрофилем подзола) и криометаморфических (светлоземы иллювиально-железистые) почв. Оценено влияние биоклиматических подзональ-

ных условий на реологическое поведение таежных автоморфных и полугидроморфных почв. Полученные структурно-механические параметры таежных текстурно-дифференцированных и криометаморфических почв дают дополнительные диагностические характеристики при выявлении их генетических особенностей.

**Практическая значимость работы.** Полученные данные могут быть применены при нормировании механической нагрузки на почвенный покров в сельскохозяйственном, лесохозяйственном, промышленном, рекреационном и ином использовании почвенных ресурсов Республики Коми. Они могут быть полезны при создании искусственных почвенных покрытий. Используемый в исследовании метод амплитудной развертки может быть рекомендован как быстрый, надежный и точный способ диагностики технологических свойств почв.

**Защищаемые положения:**

1. Реологические свойства и параметры таежных почв, связанные с климатическими и гидрологическими условиями их формирования, наиболее четко проявляются в верхних горизонтах профиля, в нижней части профиля реологические свойства обусловлены в основном физико-химическими и литологическими характеристиками почвообразующей породы.

2. В зональном ряду почв (от текстурно-дифференцированных почв южной тайги к криометаморфическим почвам северной, крайнесеверной тайги и лесотундры) наблюдается снижение их устойчивости к механическим нагрузкам вследствие усиления прочных, но более хрупких межчастичных взаимодействий.

3. Усиление гидроморфизма таежных почв способствует возрастанию их пластичности и снижению прочности почвенных контактов.

**Личный вклад автора.** Автор лично принимал участие на всех этапах подготовки и проведения работы: в подборе ключевых участков, отборе образцов почв, выполнении полевых и лабораторных исследований, статистической обработке и интерпретации результатов. В совместных статьях вклад пропорционален числу соавторов.

**Степень достоверности результатов.** Исследования проведены с использованием общепринятых в почвоведении методов, на современном оборудовании, применяемом в почвенных исследованиях. Полученные результаты статистически обработаны с помощью программы «STATISTICA».

**Апробация работы.** Основные положения и результаты исследования были изложены и обсуждены на молодежной научной конференции ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар, 2012-2017),

Пушинской школе-конференции молодых ученых «Биология – наука 21 века» (Пушино, 2012, 2015), Докучаевских молодежных чтениях (Санкт-Петербург, 2013), II международной научной конференции по реологии и моделированию материалов «IC-RMM2» (Мишкольц-Лиллафюред, Венгрия, 2015), на съезде Общества почвоведов им. В.В. Докучаева (Белгород, 2016), Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, 2018), VIII Всероссийской научной конференции с международным участием «Лесные почвы и функционирование лесных экосистем» (Москва, 2019), на заседании кафедры физики и мелиорации почв факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, 2012, 2018).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 4 статьи в рецензируемых журналах из списков RSCI, Web of Science и Scopus и 14 статей в сборниках материалов и тезисов конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертация изложена на 146 страницах, состоит из введения, 4 глав, заключения, выводов, списка литературы из 165 источников, в том числе 20 на иностранном языке, содержит 12 таблиц, 45 рисунков и 4 приложения.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую признательность д.с.-х.н. И.В. Забоевой и к.б.н. Е.М. Лаптевой за поддержку, доброжелательное отношение и помощь в обсуждении результатов, к.б.н. Д.Д. Хайдаповой – за содействие и полезные рекомендации в выполнении реологических исследований, коллегам и друзьям – за помощь на разных этапах работы.

## ГЛАВА 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В главе рассмотрены базовые понятия, методы и оборудование, используемые в реологии для изучения физико-механических свойств дисперсных систем. Приборы нового поколения, в частности модульный реометр MCR-302 «Anton Paar» (Австрия), дают возможность получить широкий спектр реологических параметров, позволяющих с высокой точностью охарактеризовать физико-механические свойства почв и грунтов (Horn, Smucker, 2005; Markgraf et al., 2010; Шеин и др., 2014; Pertile e tal., 2016; Хайдапова и др., 2016). Почвенная реология востребована при решении различных задач как практической направленности – влияние сельскохозяйственного использования земель на структурную устойчивость почв (Абрукова, 1977; Манучаров, 1983; Абрукова и др., 1986; Сапожников и др., 1987; Or, Ghezzehei, 2002; Stoppe, Horn, 2018), так и при проведении фундаментальных исследований – в решении проблемы структурообразования, построении деформа-

ционных моделей и пр. (Абрукова, 1977; Dealy, 1982; Ghezzehei, Or, 2001; Шрамм, 2003; Markgraf, Horn, 2006; Markgraf et al., 2012; Хайдапова и др., 2016; Baumgarten, 2013). На территории РК реологические исследования почв проводились только в тундровой зоне (Абрукова, 1970; Абрукова, 1986). Реологические свойства таежных почв республики не исследованы.

## ГЛАВА 2 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследований расположен на северо-востоке европейской части России, на территории РК. Объектами изучения реологических свойств послужили почвы разной степени увлажнения, сформированные на суглинистых отложениях под пологом еловых лесов в различных природных зонах и подзонах РК, и образующие катенарные ряды по уровню нарастания поверхностного увлажнения (табл. 1). Всего в работе исследовано 15 полнопрофильных почвенных разрезов.

Использовали сравнительно-географический метод в сочетании с профилльно-генетическим. Физико-химические свойства почв исследовали стандартными методами (Вадюнина и др., 1986; Теория и практика..., 2006)<sup>1</sup>. Величину pH KCl-суспензии определяли потенциометрически со стеклянным электродом; содержание Собщ. и Нобщ. – газохроматографически на CNHS-анализаторе EA-1100 «Carlo Erba»; обменные катионы – вытеснением  $\text{NH}_4\text{Cl}$  с последующим атомно-абсорбционным определением на Shimadzu AA-6300; оксалатрастворимые формы соединений Fe и Al – по Тамму, дитионитрастворимые – по Джексону; валовой химический состав почв – рентгенфлуоресцентным (VRA-33) методом; гранулометрический состав – по Качинскому. Наблюдения за температурным режимом почв проводили с помощью цифровых логгеров «НОВО-U12» (США). Температурные датчики устанавливали на глубину 0-20-50-100 см от поверхности почвы, период измерений – через каждые 3 часа в период с 2012 по 2017 г.

Реологические исследования образцов почв выполняли на базе модульного реометра MCR-302 «Anton Paar» (Австрия)<sup>2</sup> методом амплитудной развертки (колебательный метод) с измерительными системами плита-плита. Испытания проводили при контроле нормальной силы <10 Н. Технические режимы испытаний: расстояние между плато  $h \sim 1-5$  мм, диаметр плато – 2,5 см, деформа-

<sup>1</sup> Физико-химические исследования образцов почв выполнены в отделе почвоведения, экоаналитической лаборатории и ЦКП «Хроматография» ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

<sup>2</sup> Исследования выполнены на кафедре физики и мелиорации почв факультета почвоведения МГУ.

Таблица 1. Краткая характеристика объектов исследования

Зона/ подзона	Ключевой участок, координаты	Номер разреза	Формула профиля почвы	Названия почв по классификации 1977 г. – 2004 г. (по классификации WRB)
Южная тайга	КУ*-1 Летский станционар 59°38'N 49°22'E	Л-2	O-AУ-EL-BEL-BT1-BT2- BC-C	Дерново-подзолистая неолесеная – Дерново-подзолистая типичная текстурно-дифференцированная (Folic Albic Retisol)
		Л-1	O-AУg-ELg-BEL-BTe-BT1- BT2-BC-C	Дерново-подзолистая слабоглеевая – Дерново-подзолистая поверхностно-глеевая текстурно-дифференцированная (Haplic Albic Retisol)
		Л-3	T-AУg-ELg-BELg-BT1- BT2-BCg-Cg	Дерново-подзолисто-глеевая – Дерново-подзолистая глеевая текстурно-дифференцированная мелкоторфянистая (Haplic Albic Retisol)
Средняя тайга	КУ-П Максимовский станционар 61°39'N 50°41'E	Р-1-П	O-EL[e-hf]-ELf-BEL-BT1- BT2-BT3-BC-C	Типичная подзолистая с микропрофилем подзола – Подзолистая с микропрофилем подзола текстурно-дифференцированная (Folic Albic Retisol)
		Р-8-X	T1-T2-EL.hi.g-EL.g-BEL.g- BT1.g-BT2g-BCg	Торфянисто-подзолисто-глеевая – Торфяно-подзолисто-глеевая мелкоторфянистая текстурно-дифференцированная (Haplic Albic Retisol)
		Р-3-П	T1-T2-T3-EL.hi.g-EL.g- BEL.g-BT1.g-BT2g-BT3g- BCg	Торфяно-подзолисто-глеевая – Торфяно-подзолисто-глеевая торфянистая текстурно-дифференцированная (Haplic Albic Retisol)
Северная тайга	КУ-III Печорский р-н 64°51'N 57°37'E	Р-3	O-Eg-BHF-BF-Bcm-CRM1- CRM-2-CRM3-BCg	Глееподзолистая – Светлозем илловально-железистый поверхностно-глееватый (Folic Albic Stagnosols)
		Р-3-X	T1-T2-EL.hi.g-EL.g-Bcm.g- CRM1g-CRM2g-CRM3g- BCg-Cg	Торфянисто-подзолисто-глеевая – Светлозем мелкоторфянистый почечно-гумусовый глееватый (Histic Gleyic Stagnosols)
		Р-2	T1-T2-T3-EL.hi.g-Bcm.g- CRM1g-CRM2g-BCg-Cg	Торфяно-подзолисто-глеевая – Светлозем торфянистый почечно-гумусовый глееватый (Histic Gleyic Stagnosols)



Зона/ подзона	Ключевой участок, координаты	Номер разреза	Формула профиля почвы	Названия почв по классификации 1977 г. – 2004 г. (по классификации WRB)
Крайне- северная тайга	КУ-IV Иглинский р-н 65°33'N 60°30'E	P-39	O-Eg,hi-BHF-BF-CRM1- CRM2-CRM3-D	Глееподзолистая – Светлозем иллювиально-железистый почечно-гумусовый поверхностно-глеватый (Folic Albic Stagnosols)
		P-42	T1-T2-ELhi,g-EL,g,hi-Berm- CRM1-CRM2-BC-C	Торфянисто-подзолисто-глеватая – Светлозем мелкоторфянистый почечно-гумусовый глееватый (Histic Gleyic Stagnosols)
		P-71	T1-T2-ELhi,g-EL,g,hi-Berm- CRM1-CRM2-CRM3-BC-g- Cg	Торфяно-подзолисто-глеватая – Светлозем торфянистый почечно-гумусовый глееватый (Histic Gleyic Stagnosols)
Лесо- тундра	КУ-V Воркутинский р-н 66°39'N 62°29'E	P-4-1	O-Eg,hi-BF-Berm-CRM- BCg-Dg	Глееподзолистая – Светлозем иллювиально-железистый почечно-гумусовый глееватый (Folic Albic Stagnosols)
		P-4-X	T1-T2-ELhi,g-Berm,g- CRM,g-BCg	Торфянисто-подзолисто-глеватая – Светлозем мелкоторфянистый почечно-гумусовый глееватый (Histic Gleyic Stagnosols)
		P-4-2	T1-T2-ELhi,g-Berm,g- CRM,g-Dg	Торфяно-подзолисто-глеватая – Светлозем торфянистый почечно-гумусовый глееватый (Histic Gleyic Stagnosols)

Примечание: \* КУ – ключевой участок.

ция сдвига  $\gamma$  – 0,001–100%, угловая частота  $f$  – 0,5 Гц, количество измеряемых точек 30, температуру образца поддерживали элементами Пельтье на постоянном уровне 20 °С. Реологическое поведение почвенных образцов исследовали при влажности максимального капиллярного водонасыщения. Были получены следующие параметры, характеризующие реологические свойства почв:  $G'$  (Pa) – модуль упругости (мера энергии деформации, сохраненной образцом в процесса сдвига; значения модуля упругости в начале деформационного процесса отражают величину прочности межчастичных почвенных контактов);  $G''$  (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 (определяется 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 твердообразного в текучее). Величина  **$\tan \delta$  (дельта) =  $G''/G'$**  – расчетная величина, необходима для определения отношения вязкой и упругой части вязкоупругого деформационного поведения. Величина **Integral Z** – интегральная зона фактора потерь, которая отражает величину межчастичного взаимодействия.

Статистическую обработку данных проводили в программном пакете «STATISTICA».

## ГЛАВА 3 ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

В главе дана подробная характеристика климата, геологического строения, геоморфологии, рельефа, растительности, почвообразующих пород и почв района исследований.

## ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ<sup>3</sup>

### 4.1 Физико-химические свойства таежных автоморфных и полугидроморфных почв

В главе дана детальная характеристика особенностей формирования и строения почв ключевых участков, представленных в зональном ряду от южной тайги до лесотундры. Отмечена специ-

---

<sup>3</sup> В данной главе обсуждаются результаты диссертационной работы автора, опубликованные в научных изданиях, индексируемых в базах данных RSCI, Web of Science и Scopus (список научных публикаций представлен в конце автореферата).

фика морфологического строения почв. Профиль текстурно-дифференцированных почв южной и средней тайги характеризуется наличием элювиального (EL) горизонта в верхней части и текстурного с хорошо выраженной призматической структурой (BT) – в срединной части профиля. Развитие травяного яруса под пологом южнотаежных еловых лесов определяет формирование под горизонтом лесной подстилки серогумусового горизонта АУ и образование менее агрессивного гуматно-фульватного типа гумуса (Канев, 2002). Профиль светлоземов северной, крайнесеверной тайги и лесотундры 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 отсутствовать (Тонконогов, 2010). В морфологическом строении светлоземов, занимающих автоморфные позиции, под подзолистым горизонтом выделяется система иллювиально-железистых горизонтов (ВНF–BF) со значительным накоплением оксалат- и дитионитрастворимых соединений Fe. К северу становятся более выраженными процессы поверхностного оглеения, повышается потечность гумуса, что определяет развитие в автоморфных условиях светлоземов иллювиально-железистых потечно-гумусовых поверхностно-глееватых и глееватых. В полугидроморфных разностях светлоземов наблюдается глеевая мобилизация и более глубокая альфегумусовая миграция из верхней толщи профиля в нижележащие слои. В связи с этим горизонты ВНF и BF не формируются, становятся более выраженными признаки тиксотропии и плавунности.

Общими свойствами для всех рассмотренных почв являются: высокая кислотность, выщелоченность обменных оснований, обеднение элювиального горизонта илистой фракцией и полуторными оксидами, фульватный тип гумуса (Атлас почв..., 2010; Тонконогов, 2009). Полугидроморфные почвы тайги и лесотундры отличаются развитым подстилочным-торфяным горизонтом (от 10 до 30 см), более кислой реакцией среды по сравнению с автоморфными почвами. Оглеение полугидроморфных почв в условиях периодического застоя влаги способствует ухудшению их агрегатного состояния, вследствие более интенсивного разрушения защитных железистых пленок с поверхности микроагрегатов.

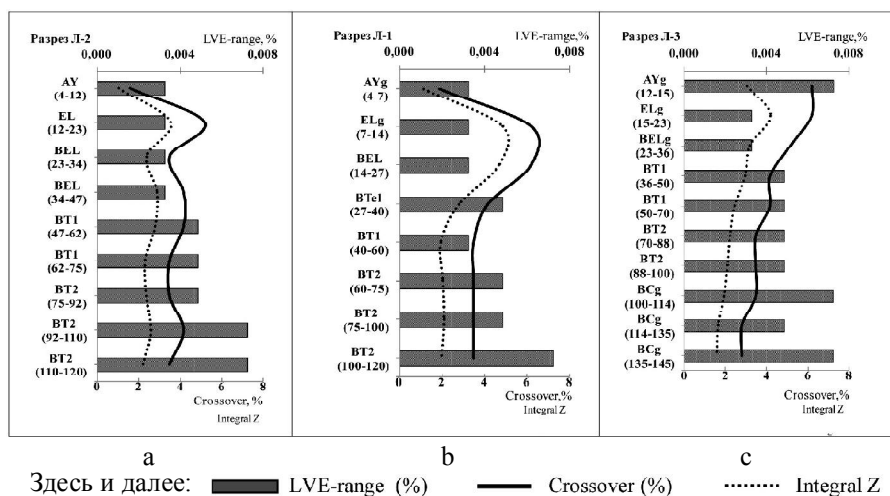
## 4.2 Реологическое поведение

### таежных автоморфных и полугидроморфных почв

#### 4.2.1 Реологические свойства автоморфных и полугидроморфных почв южной тайги

В почвах южной тайги (участок КУ-1) наиболее прочными межчастичными взаимодействиями ( $G' = 1,00 \cdot 10^6 - 1,23 \cdot 10^6 Pa$ ) отличаются горизонты верхней части профиля почв – AY(g), EL(g), BEL(g), вследствие аккумуляции здесь гумуса, низкомолекулярных органических веществ и альфегумусовых соединений. Исключением является серогумусовый горизонт AYg почвы ложбины (Л-3), для которого отмечены низкие значения модуля упругости ( $4,04 \cdot 10^5 Pa$ ) при повышенных величинах диапазона упругой (0,007%) и пластичной (6,21%) деформации (рис. 1с), что связано со значительным содержанием здесь грубого гумуса (Собщ. = 9,2%). В почвах вершины (разрез Л-2) и склона (Л-1) увала существенный вклад в повышение прочности межчастичных контактов вносят также процессы промерзания почв, которые способствуют уплотнению частиц и формированию конденсационных типов межчастичных контактов (Абрукова, Манучаров, 1986; Khaydarova et al., 2018; Холопов и др., 2018б).

В элювиальных горизонтах (ELg, BELg) отмечено резкое увеличение диапазона пластичной деформации до 5,18% (разрез Л-



**Рисунок 1.** Изменение значений диапазона упругой (LVE-range, %) и пластичной (Crossover, %) деформации, показателя структурной устойчивости (Integral Z) в профилях почв южной тайги (КУ-1): а – дерново-подзолистая типичная текстурно-дифференцированная; б – дерново-подзолистая поверхностно-глееватая текстурно-дифференцированная; с – дерново-подзолистая глееватая текстурно-дифференцированная мелкоторфянистая.

2) и 6,19% (Л-1), что свидетельствует о слабых внутриагрегатных связях в данных горизонтах. Вниз по профилю во всех почвах прочность контактов постепенно снижается – величина  $G'$  уменьшается до  $4,41 \cdot 10^5 Pa$ , а параметр CROSSOVER выходит на средние по профилю значения  $\sim 3,48\%$  (рис. 1). Утяжеление гранулометрического состава и увеличение вниз по профилю степени насыщенности почв обменными основаниями обуславливают возрастание значений диапазона упругой деформации от 0,00328% в гор. АУ(г) до 0,00726% в гор. ВТ и ВСг.

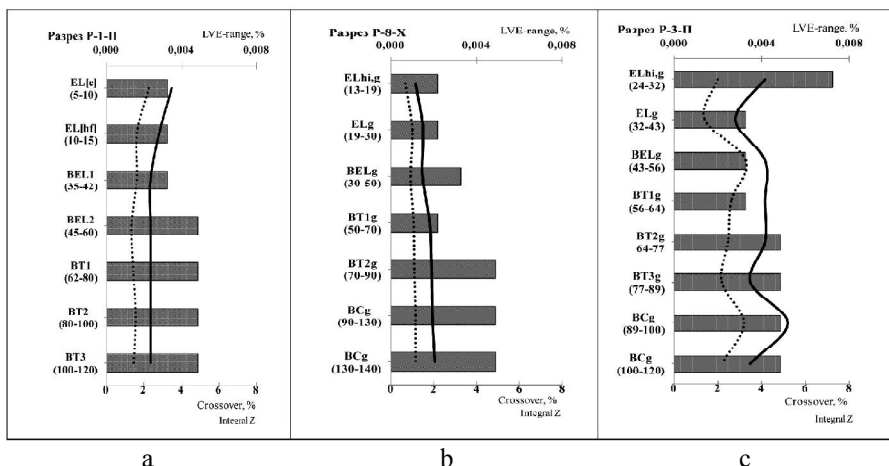
Таким образом, наиболее высокими показателями структурной устойчивости (Integral Z) в почвах южной тайги характеризуются иллювиальные текстурные горизонты (рис. 1). В верхней части профиля почв структурная устойчивость ограничивается хрупкостью формирующихся контактов и слабыми внутриагрегатными связями.

#### **4.2.2 Реологические свойства автоморфных и полугидроморфных почв средней тайги**

В условиях средней тайги (участок КУ-П) наиболее прочные межчастичные взаимодействия ( $G' = 1,36 \cdot 10^6 - 1,71 \cdot 10^6 Pa$ ) характерны для элювиальных горизонтов (EL; ELhi,g; ELg) почв, формирующихся соответственно на вершине (разрез Р-1-П) и склоне (Р-8-Х) увала. Это обусловлено накоплением здесь альфегумусовых соединений, а так же процессами промерзания: в автоморфных позициях глубина проникновения отрицательных температур в профиле почвы 40 см, в полугидроморфных  $\sim 20-25$  см (Мокиев, 2009). Соответственно, в верхней части (до глубины 40-50 см) профилей Р-1-П и Р-8-Х значения LVE-range  $\leq 0,00328\%$ , значения параметра CROSSOVER находятся в пределах 1,1-3,4% (рис. 2а, 2б).

Горизонт ELhi,g (24-32 см) почвы ложбины (Р-3-П) отличается крайне низкой прочностью ( $G' 5,07 \cdot 10^5 Pa$ ) при высоких значениях диапазона упругой (0,007%) и пластичной (4,16%) деформации (рис. 2с), что обусловлено повышенным накоплением в данном горизонте грубого гумуса (Собщ. до 11,8%). Во всех почвах вниз по профилю отмечено ослабление прочности межчастичных контактов ( $G'' 4,65 \cdot 10^5 Pa$ ) при возрастании значений диапазона упругой деформации (LVE 0,00488%), что связано с постепенным утяжелением гранулометрического состава и увеличением степени насыщенности почв основаниями.

Таким образом, в среднетаежных почвах (участок КУ-П) наиболее высокие показатели структурной устойчивости (Integral Z) (рис. 2) также, как и на участке южной тайги (КУ-П), приурочены к иллювиальным текстурным горизонтам (ВТ).

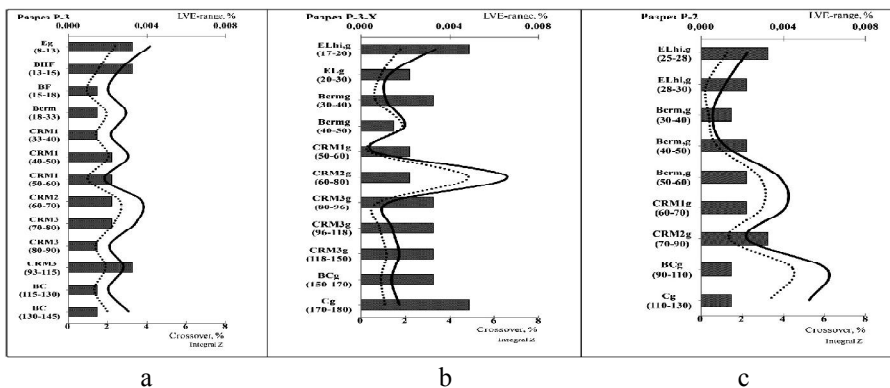


**Рисунок 2.** Изменение значений диапазона упругой (LVE-range, %) и пластичной (Crossover, %) деформации, показателя структурной устойчивости (Integral Z) в профилях почв средней тайги (КУ-II): а – подзолистая с микропрофилем подзола текстурно-дифференцированная; б – торфяно-подзолистоглеевая мелкоторфянистая текстурно-дифференцированная; в – торфяно-подзолистоглеевая торфянистая текстурно-дифференцированная.

### 4.2.3 Реологические свойства автоморфных и полугидроморфных почв северной тайги

В почвах северной тайги (КУ-III) влияние глее-альфегумусовых процессов миграции и накопления органических веществ иллювиальной природы с комплексными органо-минеральными соединениями Fe и Al, а так же процессов промерзания почв более значимо, нежели в почвах южной и средней тайги (Холопов и др., 2018а; Холопов и др., 2018б). В автоморфной почве (разрез Р-3) наиболее прочные межчастичные контакты формируются в системе горизонтов Eg-BHF-BF (параметр  $G'$  в пределах  $2,28 \cdot 10^6 - 3,66 \cdot 10^6 Pa$ ), что сопряжено с активным накоплением здесь органических веществ иллювиальной природы (Собщ.=2,2%) и альфегумусовых соединений ( $Fe_2O_3$  по Тамму = 1,38%).

Горизонты BHF-BF характеризуются усилением упруго-хрупких свойств в межчастичных взаимодействиях. На это указывает снижение показателей диапазонов упругой (до 0,00148%) и пластичной (до 2,026%) деформации (рис. 3а). Вниз по профилю прочность контактов постепенно снижается. Вследствие слабой дифференциации профиля по содержанию частиц илистой фракции и обменных оснований значения LVE-range и CROSSOVER варьируют соответственно в пределах 0,00148-0,00328% и 1,85-3,75% без выраженной тенденции к их понижению или повышению вниз



**Рисунок 3.** Изменение значений диапазона упругой (LVE-range, %) и пластичной (Crossover, %) деформации, показателя структурной устойчивости (Integral Z) в профиле почв северной тайги (КУ-III): а – светлозем иллювиально-железистый поверхностно-глееватый; б – светлозем мелкоторфянистый потечно-гумусовый глееватый; с – светлозем торфянистый потечно-гумусовый глееватый.

по профилю. Некоторое увеличение параметра  $G'$  до  $2,08 \cdot 10^6 Pa$  на глубине 40-60 см (гор. CRM1) связано, вероятно, с процессами промерзания.

В светлоземе потечно-гумусовом мелкоторфянистом (P-3-X), формирующемся в полугидроморфных условиях, высокие значения прочности межчастичных контактов ( $G'$  до  $2,76 \cdot 10^6 Pa$ ) приурочены к горизонту CRM1g (50-60 см), в котором зафиксировано максимальное содержание альфегумусовых комплексов ( $Fe_2O_3$  по Тамму до 0,51%). В профиле светлозема торфянистого потечно-гумусового глееватого (P-2) аналогичное увеличение величины  $G'$  отмечено для горизонта Vcrmg (30-60 см). Параметр LVE-range имеет наиболее высокие значения (0,00328%) в верхней части потечно-гумусового горизонта ELhi,g (25-28 см) почвы P-2, что сопряжено с максимальным содержанием здесь слаборазложившихся растительных остатков (Собщ. = 7,6%). Низкие величины диапазона упругой (0,00222%) и пластичной (0,539%) деформации (рис. 3б, 3с) в горизонтах полугидроморфных почв, приуроченных к глубине 50-60 см, а также высокая здесь прочность межчастичных контактов, могут быть обусловлены отчасти воздействием криогенного фактора. Вниз по профилю полугидроморфных почв прочность контактов постепенно снижается, достигая наименьших значений в материнской породе ( $G' = 7,03 \cdot 10^5 Pa$ ). Существенное увеличение значений диапазона пластичной деформации (6,589%) и показателя структурного взаимодействия (4,84) отмечено в гор. CRM2g (60-80 см) почвы P-3-X и гор. BCg (90-100 см)

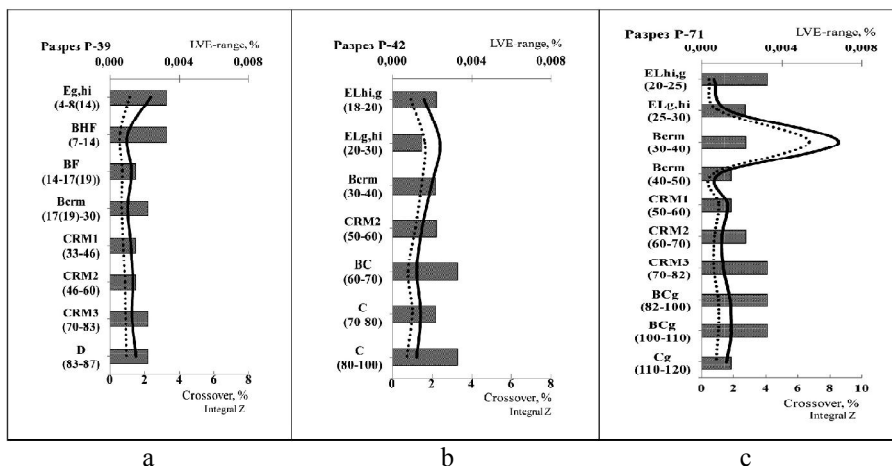
почвы P-2 (рис. 3b, 3c). Это может быть обусловлено более интенсивным распадом здесь микроагрегатов вследствие разрушения и снятия с их поверхности пленок аморфных соединений Fe при активизации процессов оглеения (Хайдапова и др., 2014).

#### 4.2.4 Реологические свойства автоморфных и полугидроморфных почв крайнесеверной тайги

В профиле автоморфной почвы (разрез P-39) крайнесеверной тайги прочность межчастичных взаимодействий увеличивается от верхней к средней части профиля. В системе горизонтов VHF-BF повышенная прочность межчастичных контактов ( $G' = 1,84 \cdot 10^6 - 1,52 \cdot 10^6$  Pa), как и в светлоземе иллювиально-железистом северной тайги, сочетается с минимальными значениями диапазона пластичной деформации (1,01-1,22%) и низкими показателями LVE-range (0,00149-0,0015%) и сопряжено с повышенным накоплением здесь органических веществ (Собщ. 2,6-1,47%) и комплексных альфегумусовых соединений ( $Fe_2O_3$  по Тамму 1,32-0,95%) (Khaydarova et al., 2018; Холопов и др., 2018б). Максимальные значения прочности межчастичных контактов ( $G'$  до  $2,29 \cdot 10^6$  Pa) зафиксированы в криометаморфических горизонтах Bcrn (17-30 см), CRM1 (33-46 см) и CRM2 (46-60 см), что может быть связано с криогенными процессами. Мощность промерзания почв (включая зону с околонулевыми температурами  $+0,1 \dots -0,1$  °C) в крайнесеверной тайге достигает 50 см и сохраняется в течение 4-5 месяцев (Каверин и др., 2016). Вниз по профилю величина  $G'$  убывает до  $1,16 \cdot 10^6$  Pa, значения диапазонов пластичной и упругой деформации при этом остаются на низком уровне (рис. 4a) вследствие слабой дифференциации профиля P-39 по содержанию илистой фракции, а также в связи с низким содержанием обменных оснований.

В полугидроморфных почвах наиболее высокие показатели прочности контактов приурочены к элювиальным и криометаморфическим горизонтам. В профиле P-42 – это гор. ELg,hi (20-30 см) и Bcrn (30-40 см), в профиле P-71 – гор. ELhi,g (20-25 см) и CRM1 (50-60 см). Показатели диапазонов упругой и пластичной деформации (рис. 4b, 4c) в этих почвах не превышают соответственно 0,003% и 2,3%, за исключением гор. Bcrn (30-40 см) в профиле P-71, где зафиксировано максимальное значение параметра CROSSOVER (8,5%). Низкое содержание здесь частиц илистой фракции (12%) может обуславливать более интенсивное разрушение почвенных микроагрегатов со слабыми внутриагрегатными связями. Анализ реологических свойств свидетельствует о преобладании в профилях автоморфных и полугидроморфных почв крайнесеверной тайги упруго-хрупких межчастичных взаимодействий.



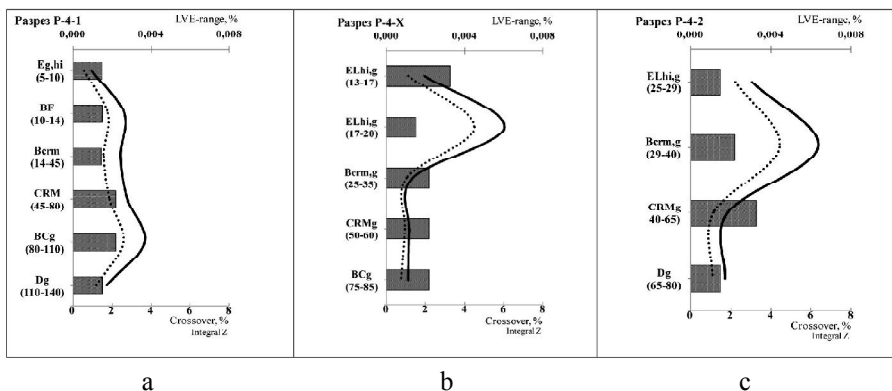


**Рисунок 4.** Изменение значений диапазона упругой (LVE-range, %) и пластичной (Crossover, %) деформации, показателя структурной устойчивости (Integral Z) в профилях почв крайнесеверной тайги (KV-IV): а – светлозем иллювиально-железистый потечно-гумусовый поверхностно-глееватый; б – светлозем мелкоторфянистый потечно-гумусовый глееватый; в – светлозем торфянистый потечно-гумусовый глееватый.

#### 4.2.5 Реологические свойства автоморфных и полугидроморфных почв лесотундры

В автоморфных условиях (разрез P-4-1) наиболее прочные контакты с максимальными значениями модуля упругости (до  $2,64 \cdot 10^6 Pa$ ) зафиксированы в верхней (горизонты Eg,hi (5-10 см) и BF (10-14 см)) и срединной (Bcgm (14-45 см)) частях профиля. Как и в почвах северной и крайнесеверной тайги, это обусловлено максимальным накоплением здесь органических веществ иллювиальной природы (Собщ. 1,03%) и органо-минеральных альфегумусовых соединений ( $Fe_2O_3$  по Тамму 1,10%), а также более длительным и глубоким промерзанием почв. Низкие значения диапазонов упругой (0,001%) и пластичной (0,9%) деформации в горизонтах Eg,hi и BF (рис. 5а) свидетельствуют об усилении здесь хрупких почвенных взаимодействий. Вниз по профилю значения прочности контактов ( $G'$ ) постепенно убывают, в то время как величины LVE-range сохраняют низкие значения, что обусловлено слабой дифференциацией профиля по илу и низким содержанием обменных оснований.

В полугидроморфных условиях (разрезы P-4-X и P-4-2) профильное распределение величин прочности контактов имеет обратную зависимость. Низкая прочность верхних элювиальных потечно-гумусовых горизонтов (ELhi,g) в профилях P-4-X и P-4-2



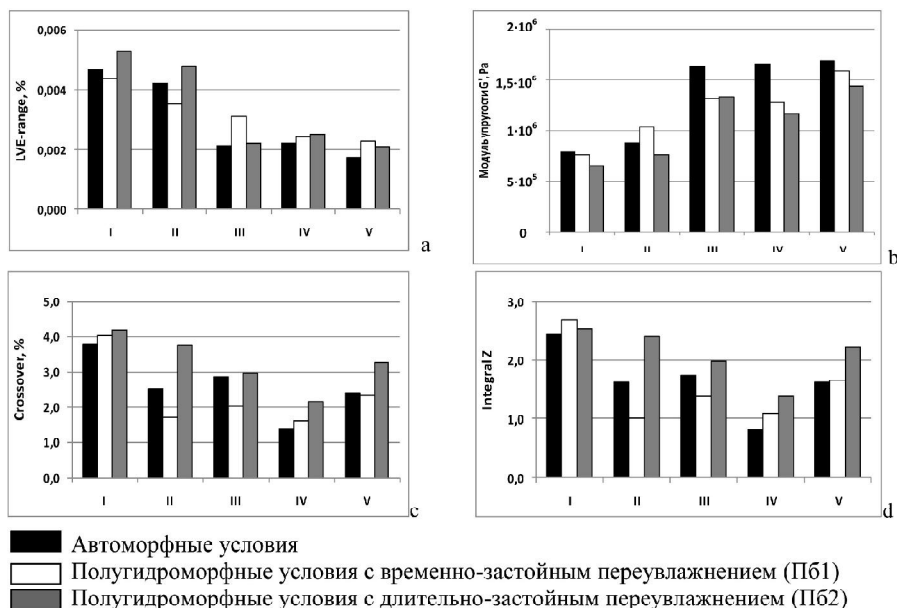
**Рисунок 5.** Изменение значений диапазона упругой (LVE, %) и пластичной (Crossover, %) деформации, показателя структурной устойчивости (Integral Z) в профилях почв лесотундры (КУ-V): а – светлосем иллювиально-железистый потечно-гумусовый глееватый; б – светлосем мелкокорянистый потечно-гумусовый глееватый; с – светлосем торфянистый потечно-гумусовый глееватый.

обусловлена присутствием здесь слаборазложившихся растительных остатков (Собщ. до 2%). Крайне низкие значения диапазонов пластичной (1,11-1,95%) и упругой (0,0015-0,0022%) деформации (рис. 5b, 5c) свидетельствуют о значительной хрупкости и слабой устойчивости к механическим нагрузкам почвенных контактов практически во всех горизонтах профиля полугидроморфных почв. Накопление органо-минеральных соединений Fe в нижней части профилей этих почв, в сочетании с более глубоким проникновением отрицательных температур по профилю почв в условиях лесотундры, способствует формированию в горизонтах CRMg, BCg, Dg почвенных контактов с высокими значениями прочности – показатели параметра  $G'$  до  $2.16 \cdot 10^6 Pa$ .

Высокие значения диапазона пластичной деформации (6,0-6,4%) и величины Integral Z (4,4-4,5), отмеченные в горизонтах ELhi,g (17-20 см) разреза P-4-X и Bcrn,g (29-40 см) разреза P-4-2 (рис. 5b, 5c), в данных условиях являются не отражением повышенной устойчивости микроструктуры почвы, а результатом активного распада микроагрегатов со слабыми межчастичными связями. Последнее обусловлено низким содержанием в этих горизонтах илистых 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 Bcrn,g при механическом воздействии из твердообразного в текучее состояние.

### 4.3 Подзональные особенности реологических свойств таежных почв

Установлено снижение устойчивости почвенной микроструктуры в зональном ряду автоморфных и полугидроморфных почв от южной тайги к крайнесеверной и лесотундре с формированием прочных, но более хрупких межчастичных взаимодействий. В автоморфных почвах усредненное по профилю значение модуля упругости  $G'$  увеличивается от  $7,95 \cdot 10^5 Pa$  (южная тайга, разрез Л-2) до  $1,69 \cdot 10^6 Pa$  (лесотундра, разрез Р-4-1) (рис. 6б). В почвах южной и средней тайги жесткие межчастичные контакты со значениями  $G'$  более  $1,00 \cdot 10^6 Pa$  приурочены только к верхней части профиля (до глубины 15-34 см), в почве северной тайги – до глубины 70 см (горизонт CRM1), в почвах крайнесеверной тайги и лесотундры повышенная прочность межчастичных взаимодействий характерна для всего профиля. К северу отмечено снижение диапазона упругой (LVE-range менее 0,00328%) и пластичной (CROSSOVER менее 3,48%) деформации (рис. 6а, 6с). Это свиде-



**Рисунок 6.** Изменение реологических показателей в зональном ряду почв: а – диапазон упругой деформации (LVE-range, %); б – значение модуля упругости ( $G'$ , Pa); в – диапазон пластичной деформации (Crossover, %); г – значение показателя структурной устойчивости (Integral Z). По оси абсцисс: I – южная тайга; II – средняя тайга; III – северная тайга; IV – крайнесеверная тайга; V – лесотундра.

тельствует о повышении хрупкости межчастичных взаимодействий в почвах, формирующихся на севере таежной зоны. Повышение жесткости контактов при снижении предела упругости и пластичности прослеживается так же и в ряду полугидроморфных почв. Усиление прочности почвенных контактов к северу обусловлено активным поступлением в минеральную часть профиля почв подвижных органических веществ, в том числе комплексных альфегумусовых соединений, а так же усилением процессов промерзания. В условиях севера при повышенной влажности и низкой насыщенности почв основаниями альфегумусовые соединения способствуют накоплению значительного запаса структурной прочности, являясь основным связующим материалом для почвенных частиц в процессе микроагрегатообразования.

Фактор промерзания наиболее четко проявляется в профиле автоморфных светлосемов в виде некоторого повышения прочности контактов на глубине 40-60 см, где в зимний период происходит формирование фронта промерзания с длительным периодом околонулевых температур. Наиболее высокие показатели среднепрофильных значений структурной устойчивости (Integral Z) отмечены в почвах южной тайги (2,45-2,69), к северу наблюдается тенденция к его снижению (рис. 6d). Повышение среднепрофильных значений величины Integral Z в почвах лесотундры является отражением развития процессов пльвунности в результате более интенсивного разрушения хрупких меж- и внутриагрегатных связей. На величину диапазона упругой деформации значимое влияние оказывает содержание в почвах обменных оснований ( $p = 0,00002$ ), общего углерода ( $p = 0,002$ ) и фракции физической глины ( $p = 0,04$ ). Диапазон пластичной деформации с положительной значимостью ( $p = 0,001$ ) зависит от содержания обменных оснований (табл. 2). Повышенное содержание обменных оснований, слаборазложившихся органических веществ и более тяжелый гранулометрический состав способствуют активной сорбции влаги, которая снижает прочность взаимодействия между частиц. Об этом свидетельствует тесная связь величины модуля  $G'$  с содержанием Собщ., суммы обменных оснований,  $Fe_2O_3$  (по Тамму) и величиной C/N. Таким образом, слаборазложившиеся органические остатки увеличивают упругое сопротивление почвы в начале деформационного воздействия, при преодолении которого (по мере увеличения нагрузки) система переходит в упруго-вязкое или пластичное состояние. Накопление оксалат- и дитионитрастворимых форм железа снижают упругие и пластичные свойства, способствуя формированию прочных, но более хрупких взаимодействий. Наличие в почве гумусовых веществ с высокой долей фульвокислот

**Таблица 2.** Связь реологических показателей с физико-химическими свойствами почв (по данным статистического анализа)

Зависимые реологические показатели	Независимые факторы	Статистические показатели**				
		SE	SS	MS	F	p-value
Модуль упругости G' (Pa)	Общий углерод Собщ, %	49772,0	1,73·10 <sup>12</sup>	1,73·10 <sup>12</sup>	10,29761	-0,002
	Обменные основания Са+Мg, смоль/кг	36844	1,6·10 <sup>12</sup>	1,6·10 <sup>12</sup>	9,59456	-0,02
	Соотношение углерода к азоту (C/N)	13374,7	9,3·10 <sup>11</sup>	9,3·10 <sup>11</sup>	5,56297	0,02
Диапазон упругой деформации LVE-range (%)	Оксидрастворимые формы железа Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (по Тамму), %	480177	7,6·10 <sup>11</sup>	7,6·10 <sup>11</sup>	4,51922	0,002
	Обменные основания Са+Мg, смоль/кг	0,000029	0,000019	0,000019	19,84786	0,00002
	Общий углерод Собщ, %	0,000120	0,000005	0,000005	5,33545	0,002
Диапазон пластичной деформации Crossover (%)	Содержание фракций <0,001 мм, %	0,000034	0,000004	0,000004	4,29223	0,04
	Обменные основания Са+Мg, смоль/кг	0,038544	18,3362	18,3362	10,37891	0,001
Структурная устойчивость Integral Z	Обменные основания Са+Мg, смоль/кг	0,028765	7,1081	7,1081	7,22310	0,008

Примечания: \* – объем выборки для статистического анализа, n = 122; \*\* SE – стандартная ошибка, SS – сумма квадратов отклонений; MS – дисперсия; F – критерий Фишера; p-value – статистическая значимость (p < 0,05).

и низкомолекулярных органических веществ (в том числе в форме комплексных альфегумусовых соединений), определяет более жесткий характер реологического поведения почв. К северу фульватный характер гумуса заметно усиливается, кроме того возрастает его потечность, соответственно увеличивается мощность слоя в профиле почв с прочными, но более хрупкими почвенными контактами. Превышение предела прочности таких контактов ведет к разрушению структурных связей с длительным и слабым последующим восстановлением. 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 (Канев, 2001), в состав которых входят гуматы кальция.

## ВЫВОДЫ

1. Впервые определены реологические характеристики автоморфных и полугидроморфных таежных почв. Показано, что различия в характере межчастичных почвенных связей и механических свойствах (упругость, вязкость, пластичность) исследуемых почв, связанные с климатическими и гидрологическими условиями их формирования, наиболее четко проявляются в верхних минеральных горизонтах, в нижней части профиля реологические параметры в большей мере определяются физико-химическими и литологическими свойствами почвообразующих пород.

2. 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 иллювиальной природы. Повышенная прочность структуры обусловлена цементацией почвенных частиц органоминеральными соединениями с формированием жестких межчастичных контактов, а также конденсационным уплотнением частиц в процессе промерзания-оттаивания. Устойчивость прочного межчастичного взаимодействия ограничивается повышенной хрупкостью с узким пределом пластичности (CROSSOVER – менее 3,48%) и упругого деформирования (LVE-range – менее 0,00328%). Такие контакты быстро разрушаются при механическом воздействии и слабо восстанавливаются после снятия нагрузки.

3. Усиление гидроморфизма почв сопровождается снижением прочности межчастичных контактов: в автоморфных условиях

максимальная прочность контактов зафиксирована в пределах  $(1,23-3,66) \cdot 10^6$  Па, в полугидроморфных условиях – в пределах  $(1,00-2,76) \cdot 10^6$  Па. Снижение прочности контактов связано с аккумуляцией в полугидроморфных почвах слабо разложившихся органических остатков, ослабляющих межчастичное взаимодействие. В отдельных горизонтах полугидроморфных почв наблюдается увеличение значений пластичности структуры до 6,5-8,5% и показателя структурного взаимодействия (Integral Z) почв до 4,84-6,72, которое является следствием более интенсивного разрушения микроагрегатов.

4. В направлении от текстурно-дифференцированных почв южной и средней тайги к криометаморфическим почвам северной, крайнесеверной тайги и лесотундры наблюдается усиление прочности или жесткости межчастичных почвенных контактов. Это сопряжено с более активным поступлением органических веществ фульватной природы, в том числе комплексных альфегумусовых соединений, а так же более мощным и длительным промерзанием почв. В автоморфных почвах средние по профилю значения модуля упругости ( $G'$ ) увеличиваются от  $7,95 \cdot 10^5$  Па (южная тайга, разрез Л-2) до  $1,69 \cdot 10^6$  Па (лесотундра, разрез Р-4-1), в полугидроморфных почвах – от  $7,68 \cdot 10^5$  Па (разрез Л-1) до  $1,60 \cdot 10^6$  Па (разрез Р-4-Х) и  $1,44 \cdot 10^6$  Па (разрез Р-4-2).

5. Уменьшение в ряду почв от южной тайги к лесотундре величины упругой деформации до значений LVE-range менее 0,00328% и пластичной деформации со значениями CROSSOVER менее 3,48% свидетельствует о снижении общей структурной устойчивости северотаежных почв и почв лесотундры к механическим нагрузкам по сравнению с почвами южной и средней тайги.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Список публикаций в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных WoS, SCOPUS, RSCI:**

1. Хайдапова Д.Д., Холопов Ю.В., Забоева И.В, Лаптева Е.М. Реологические особенности коагуляционной структуры северотаежных торфянисто-подзолисто-глееватых почв Европейского Северо-Востока // Вестник Московского Университета. Серия 17. Почвоведение. 2014. № 1. С. 20–25. IF RSCI: 0,415.

2. Холопов Ю.В., Хайдапова Д.Д., Лаптева Е.М. Реологические свойства северотаежных автоморфных и полугидроморфных криометаморфических почв европейского северо-востока России (Республика Коми) // Почвоведение. 2018а. № 4. С. 439–450. DOI: 10.7868/S0032180X18040056. IF: 0,883.

3. **Холопов Ю.В.**, Хайдапова Д.Д., Лаптева Е.М. Физико-механические свойства автоморфных таежных почв Республики Коми (по данным реологических исследований) // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. 2018б. № 42. С. 24–53. DOI: 10.17223/19988591/42/2. IF RSCI: 0,581.

4. Khaydapova D., Klyueva V., **Kholopov Yu.**, Chestnova V. The rheological approach in an assessment of interparticle interactions in soils // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 201. № 11. P. 1–4. DOI: 10.1088/1755-1315/201/1/012005. SJR (Scopus): 0,170.

### **Публикации в прочих научных изданиях**

1. **Холопов Ю.В.** Реологические особенности северотаежных торфянисто-подзолисто-глееватых почв // Биология-наука XXI века: Матер. Межд. Пушинской школы-конф. молодых ученых. (16–21 апреля 2012 г., г. Пушкино). Пушкино, 2012. С. 217.

2. **Холопов Ю.В.** Реологические особенности среднетаежных торфянисто-подзолисто-глееватых почв // Актуальные проблемы биологии экологии: Матер. XIX Всерос. молод. науч. конф. (2–6 апреля 2012 г., г. Сыктывкар). Сыктывкар, 2012. С. 173–174.

3. **Холопов Ю.В.** Структурно-механические свойства таежных тофянисто-подзолисто-глееватых почв Европейского Северо-Востока // Законы почвоведения: новые вызовы: Матер. Межд. научной конференции XVI Докучаевские молодежные чтения. (4–6 марта 2013 г., г. Санкт-Петербург). – СПб.: Издательский дом СПбГУ, 2013. С. 125–126.

4. **Холопов Ю.В.** Реологические особенности таежных торфянисто-подзолисто-глееватых почв Европейского Северо-Востока. // Молодежь и наука на Севере: Матер. докл. II-й Всероссийской (XVII) молодежной научной конференции (с элементами научной школы) (в 2-х томах). Том I. Биологические науки (XX Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы биологии и экологии»). Физиология человека и животных. Медицина и здравоохранение. Фундаментальные науки – медицине. (22–26 апреля 2013 г., Сыктывкар). Сыктывкар, 2013. С. 147–149.

5. **Холопов Ю.В.**, Лаптева Е.М., Хайдапова Д.Д. Структурно-механические свойства таежных болотно-подзолистых почв европейского северо-востока России // IC-RMM2: матер. докл. II Международной научной конференции по реологии и моделированию материалов (5–9 октября 2015 г., г. Мишкольц). Мишкольц-Лиллафюред, Венгрия, 2015. С. 35.

6. **Холопов Ю.В.**, Лаптева Е.М., Хайдапова Д.Д. Структурно-механические свойства полугидроморфных таежных почв евро-



пейского Северо-Востока России // Почва – зеркало и память ландшафта: матер. докл. Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной Международному году почв и 60-летию Кировского областного отделения Русского географического общества (8–9 октября 2015 г., г. Киров). Киров, 2015. С. 77–78.

7. **Холопов Ю. В.** Особенности формирования почв в градиенте влажности северотаежных еловых лесов // Фундаментальные и прикладные вопросы лесного почвоведения: материалы докладов VI Всероссийской научной конференции с международным участием (14–19 сентября 2015 г., г. Сыктывкар). Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2015. С. 72–74.

8. **Холопов Ю. В.** Реологические параметры таежных полугидроморфных почв европейского северо-востока России // Биология – наука XXI века : Матер. докл. 19-й Межд. Пущинской школы-конференции молодых ученых (20–24 апреля 2015 г., г. Пущино). Пущино, 2015. С. 305.

9. **Холопов Ю. В.** Изменение реологических свойств подзолистых и болотно-подзолистых почв в условиях северной тайги европейского северо-востока России // Актуальные проблемы биологии и экологии : тезисы к материалам XXIII Всероссийской молодежной научной конференции (с элементами научной школы) (4–8 апреля 2016 г., Сыктывкар). Сыктывкар, 2016. С. 130–133.

10. **Холопов Ю. В.** Физико-механические свойства среднетаежных типичных подзолистых и болотно-подзолистых почв // Актуальные проблемы биологии и экологии: материалы докладов XXIV Всероссийской молодежной научной конференции (с элементами научной школы) посвященная 55-летию Института биологии Коми НЦ УрО РАН (3–7 апреля 2017 г., г. Сыктывкар). Сыктывкар, 2017. С. 119–122.

11. **Холопов Ю. В.** Ландшафтные и подзональные закономерности проявления реологических свойств в почвах таежной зоны Европейского Северо-Востока России // Почвоведение - продовольственной и экологической безопасности страны: тезисы докладов VII съезда Общества почвоведов им. В. В. Докучаева и Всероссийской с международным участием научной конференции (15–22 августа 2016 г., г. Белгород). Белгород: Издательский дом «Белгород», 2016. Ч. 1. Т. 1. С. 396–397.

12. **Холопов Ю. В.** Хайдапова Д. Д., Лаптева Е. М. Реологический метод исследований физико-механических свойств криометаморфических почв лесотундры // Материалы докладов международной научной конференции посвященной 85-летию Агрофизического НИИ «Тенденции развития агрофизики: от актуальных

проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего» (27–29 сентября 2017 г., г. Санкт-Петербург). СПб.: ФГБНУ АФИ, 2017. С. 815–819.

13. **Холопов Ю.В.** Реологические свойства автоморфных таежных почв // Ломоносов-2018: тезисы докладов 25 Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: Секция «Почвоведение» (9–13 апреля 2018 г., г. Москва). Москва: МАКС Пресс, 2018. С. 265–266.

14. Шахтарова О.В., **Холопов Ю.В.**, Лаптева Е.М. Структурная организация и структурно-механические особенности почв при-тундровых лесов Европейского Северо-Востока России // Лесные почвы и функционирование лесных экосистем: материалы VIII Всероссийской научной конференции с международным участием. М.: ЦЭПЛ РАН, 2019. С. 67–70.

Подписано в печать 05.11.2019.  
Заказ № 06(19). Тираж 100 экз.  
Бумага офсетная. Формат 60×60<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Объем: 1 усл. п.л.

Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН  
167982, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28.

(8212) 24-01-63  
[www.ib.komisc.ru](http://www.ib.komisc.ru)      [directorat@ib.komisc.ru](mailto:directorat@ib.komisc.ru)