

**И. Б. Усков, К. Г. Моисеев, М. В. Николаев, О. В. Кононенко,
А. О. Усков**

Агрофизический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург,
Российская Федерация

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ «ОСАДКИ – ПОЧВА – ДРЕНАЖ» В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ РОССИИ

Цель: анализ почвенно-климатических и техногенных причин снижения осушительной эффективности закрытого гончарного трубчатого дренажа на мелиорированных землях Северо-Запада России при наблюдаемых местных погодных условиях на фоне глобальных изменений климата. **Материалы и методы.** Объектами исследования являются сезонные режимы осадков, мелиорированные земли и осушительные системы закрытого трубчатого дренажа. В исследованиях использованы методы прикладной математической статистики, модернизированный авторами ансамблевый метод обработки и обобщения климатических прогнозов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Данные мониторинга изменения физических свойств почв мелиорированных земель при длительной их эксплуатации получены с помощью лабораторных агрофизических методов исследования образцов, отбираемых в полевых условиях. **Результаты.** Показано, что в условиях наблюдаемых климатических изменений увеличиваются частота, интенсивность и экстремальность атмосферных осадков. Длительная эксплуатация земель при промывном режиме дренажа сопровождается изменениями гидрофизических свойств почв, так, коэффициент неоднородности текстуры подпахотных горизонтов почв автоморфного генезиса уменьшился с 26 до 6. Система «атмосферные осадки – почва – дренаж» в климатически аномальных погодных условиях, превышающих по уровню осадков первоначальный расчетный режим на 10–20 %, неспособна обеспечить отвод избыточной влаги из корнеобитаемого слоя. **Выводы:** рекомендуется при создании и реконструкции подобных мелиоративных осушительных систем принимать в расчет тенденции изменения пространственно-временной статистической структуры осадков и проектировать технологии регулирования водного режима с системами перехвата и отвода поверхностных стоков на таких мелиорированных землях.

Ключевые слова: изменения климата; атмосферные осадки; осушительные системы трубчатого дренажа; гидрофизические свойства почв; статистический анализ.

I. B. Uskov, K. G. Moiseyev, M. V. Nikolaev, O. V. Kononenko, A. O. Uskov
Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg, Russian Federation

ANALYSIS OF THE “PRECIPITATION – SOIL – DRAINAGE” SYSTEM UNDER THE CONDITIONS OF CLIMATE CHANGE IN THE NORTH-WEST OF RUSSIA

Purpose: to analyze the soil-climatic and anthropogenic reasons of decreasing drainage efficiency of closed pottery tubular drainage on the reclaimed lands of the North-West of Russia under the observed local weather conditions against the background of global climate



changes. **Materials and methods.** The objects of research are seasonal precipitation regimes, reclaimed lands and drainage systems of closed tubular drainage. The methods of applied mathematical statistics, the ensemble method of processing and generalization of climate forecasts of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), modernized by the authors were used in research. Monitoring data on changes in the physical properties of soils of reclaimed lands during their long-term operation were obtained using laboratory agrophysical methods for studying samples taken in the field. **Results.** It is shown that under the conditions of the observed climatic changes, the frequency, intensity and extremeness of atmospheric precipitation are increased. Long-term exploitation of lands with a leaching drainage regime is accompanied by changes in the hydrophysical properties of soils, for example, the coefficient of heterogeneity of the subsurface horizons of soils texture of automorphic genesis decreased from 26 to 6. The system “precipitation – soil – drainage” in climatically abnormal weather conditions exceeding the initial calculated precipitation level mode by 10–20 %, is unable to ensure the removal of excess moisture from the root layer. **Conclusions:** when creating and reconstructing such reclamation drainage systems it is recommended to take into account the tendencies of changes in the spatial-temporal statistical structure of precipitation and to design technologies for regulating the water regime with systems for intercepting and diverting surface runoff on such reclaimed lands.

Key words: climate change; precipitation; tubular drainage systems; hydrophysical properties of soils; statistical analysis.

Введение. С 70-х гг. прошлого столетия наблюдается тенденция увеличения глобальной среднегодовой температуры воздуха и отмечается рост количества осадков на 2,1 % за каждые 10 лет в высоких и средних широтах Северного полушария; в низких широтах, напротив, их количество уменьшается [1]. Рост количества осадков сопровождается изменением их пространственно-временной структуры. Увеличение частоты и интенсивности осадков приводит к экстремальному увлажнению почв сельскохозяйственных полей и появлению поверхностного стока. По ряду прогнозов, в средних и высоких широтах количество атмосферных осадков возрастет на 100–600 мм/год, а испаряемость на 200–400 мм/год. Разность между прогнозируемым увеличением осадков и испарением, т. е. эффективные осадки, определяющие поверхностный и подземный сток, в Северо-Западном регионе европейской территории России возрастет на 50–200 мм/год [2]. Если учесть, что сейчас в этом регионе выпадает 500–800 мм осадков в год, то прогнозируемый рост на 10–20 % может обусловить необходимость увеличения водоотвода существующими мелиоративными осушительными системами для предотвращения переувлажнения сельскохозяйственных

земель в анализируемой зоне климатически обусловленного избыточного увлажнения. Подобные изменения гидрологических режимов наблюдаются и в других регионах [3–5].

Согласно опубликованным модельным прогнозам Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК, англ. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), глобальное осредненное количество атмосферных осадков будет увеличиваться в течение текущего столетия [6]. По оценкам точность этих прогнозов низкая и они больше подходят только для оценок тенденций [7]. Прогнозы, публикуемые МГЭИК, выдаются потребителям в детерминированном виде и не могут быть адекватно использованы для вероятностных оценок продуктивности сельскохозяйственных культур, рискованности земледелия и эффективности адаптивных агрономических решений. Авторами настоящей статьи предложена новая модификация ансамблевого метода обобщения модельных прогнозов для приведения их к вероятностному представлению [8]. Таким образом можно снять ограниченность их использования для региональных прогнозных ансамблевых модельных вероятностных оценок рисков переувлажнения территорий атмосферными осадками.

В последние годы на территории Северо-Запада России наблюдается увеличение интенсивности и частоты выпадения осадков, экстремально превышающих климатическую норму [9]. Также на мелиорированных землях региона регистрируются ситуации сезонного переувлажнения сельскохозяйственных полей [10]. В результате затрудняется проведение сезонных полевых работ и снижаются урожаи. Существующие системы закрытого трубчатого гончарного дренажа проектировались и создавались исходя из региональной климатической нормы осадков 60-х гг. XX в. и ориентированы на критические уровни осадков того периода. Настоящее исследование предпринято для анализа почвенно-климатических и техногенных причин снижения осушительной эффективности закрытого гончарного

трубчатого дренажа на мелиорированных землях этой зоны при наблюдаемых местных погодных условиях на фоне глобальных изменений климата.

Материалы и методы. Объектами исследования являются сезонные режимы осадков, мелиорированные земли и осушительные системы закрытого трубчатого дренажа на территории Северо-Западного региона России. Распределенные в пространстве и во времени данные об атмосферных осадках на штатной сети гидрометеорологических станций (ГМС) подвергнуты статистическому анализу. Выполнен вероятностный прогноз и определены статистические характеристики плотности распределений прогнозируемого уровня осадков на период до 2030 г. Почвенный блок системы «осадки – почва – дренаж» изучался на типичных для региона дерново-подзолистых почвах Меньковского филиала Агрофизического научно-исследовательского института (Ленинградская область, Россия). К анализу приобщены опубликованные ранее данные о трансформации физических свойств дерново-подзолистых почв легкого гранулометрического состава в условиях длительной эксплуатации при интенсивном промывном режиме на орошаемых землях [11].

В исследованиях использованы методы прикладной математической статистики, модернизированный авторами ансамблевый метод обработки и обобщения климатических прогнозов МГЭИК на основе математики нечетких множеств [12, 13].

Данные мониторинга изменения физических свойств почв мелиорированных земель при длительной их эксплуатации получены с использованием лабораторных агрофизических методов исследования образцов, отбираемых в полевых условиях, почвенные наблюдения обобщены методом однородного природного аналога [14].

Результаты и обсуждение

Климатический блок системы «осадки – почва – дренаж»

В связи с глобальными изменениями климата Всемирная метеороло-

гическая организация (ВМО) приняла новый технический регламент об обновлении климатических норм [15]. Климатическая норма для метеорологических параметров рассчитывается как среднее за 30-летний период. Для оценки актуальной климатической ситуации с целью принятия хозяйственных решений предложено использовать оперативную климатическую норму, рассчитанную для периода 1981–2010 гг. Для оценки динамики глобального климата действует прежняя климатическая норма, рассчитанная для периода 1961–1990 гг. Изменение климатической нормы сезонных осадков оценивалось по данным семи ГМС, репрезентативных для почвенно-климатических зон Северо-Западного региона (таблица 1, рисунок 1).

Таблица 1 – Характеристики гидрометеорологических станций

ГМС	Высота над уровнем моря, м	Широта	Долгота
Псков	43	57,8° с. ш.	28,4° в. д.
Вологда	125	59,3° с. ш.	39,9° в. д.
Петрозаводск	110	61,8° с. ш.	34,3° в. д.
Вытегра	55	61,0° с. ш.	36,4° в. д.
Шенкурск	40	62,1° с. ш.	42,9° в. д.
Котлас	55	61,2° с. ш.	46,7° в. д.
Сыктывкар	116	61,7° с. ш.	50,8° в. д.



Рисунок 1 – Схема размещения гидрометеорологических станций

Анализ выполнен на основе сопоставления среднемесячного количества атмосферных осадков за весенние, летние и осенние месяцы для двух 30-летних периодов с 1961 по 1990 г. и с 1981 по 2010 г. Анализ данных

показывает, что изменение климатической нормы наблюдается повсеместно, однако эти изменения неодинаковы на каждой станции. Исследования месячных норм осадков сведены в таблице 2. Для сопоставительного анализа за 100 % приняты данные за период с 1961 по 1990 г.

Таблица 2 – Изменение нормы осадков за период с 1981 по 2010 г. (за 100 % принят период 1961–1990 гг.)

ГМС	В %								
	Март	Ап- рель	Май	Июнь	Июль	Август	Сен- тябрь	Ок- тябрь	Но- ябрь
Псков	19,6	–8,0	21,9	37,9	–1,9	18,4	8,0	21,4	1,3
Вологда	–5,6	–17,0	–9,4	2,5	–4,2	3,9	–0,3	–4,9	–8,1
Петрозаводск	–3,2	–16,1	17,0	8,4	17,5	–4,9	–16,0	–0,2	6,1
Вытегра	–0,5	–23,6	1,2	5,9	26,6	–1,0	–15,9	1,1	4,1
Шенкурск	–1,4	–10,8	6,2	1,6	4,9	–0,6	–10,9	0,7	4,0
Котлас	20,0	–5,2	0,4	21,0	1,7	–4,2	–2,6	–4,7	7,7
Сыктывкар	16,5	–2,4	14,8	22,7	–0,1	23,3	–1,4	–5,1	0,5

Однонаправленные изменения на всех метеостанциях произошли в двух месяцах исследованного периода – уменьшение осадков в апреле и увеличение в июне. В марте более чем на 15 % увеличились осадки на станциях Псков, Котлас и Сыктывкар, на остальных станциях отмечено незначительное уменьшение. В апреле на всех метеостанциях отмечено снижение значений климатической нормы осадков: от 2,4 % на станции Сыктывкар до 23,6 % на станции Вытегра; на станциях Вологда, Петрозаводск количество осадков уменьшилось более чем на 15 %. В мае осадки увеличились на всех станциях, кроме Вологды; на станциях Псков, Петрозаводск и Сыктывкар значения норм увеличились более чем на 15 %. В июне на всех станциях зафиксировано увеличение осадков, на станциях Псков, Котлас и Сыктывкар увеличение климатической нормы составило более 20 %. В июле и августе изменения разнонаправлены, в сентябре на большинстве метеостанций зафиксировано уменьшение количества осадков. Снижение более чем на 10 % отмечено на станциях Петрозаводск, Вытегра и Шенкурск. В октябре изменения также разнонаправлены и незначительны. В ноябре на большинстве ГМС отмечено незначительное увеличение.

Сопоставительный анализ данных таблиц 2 и 3 показывает, что для оценки статистических характеристик временной вариации осадков целесообразно принять в качестве натурального однородного аналога наблюдения на метеорологической станции Псков. Показатели месячных сумм осадков за периоды с 1961 по 1990 г. и с 1981 по 2010 г. на ГМС Псков приведены на рисунке 2.

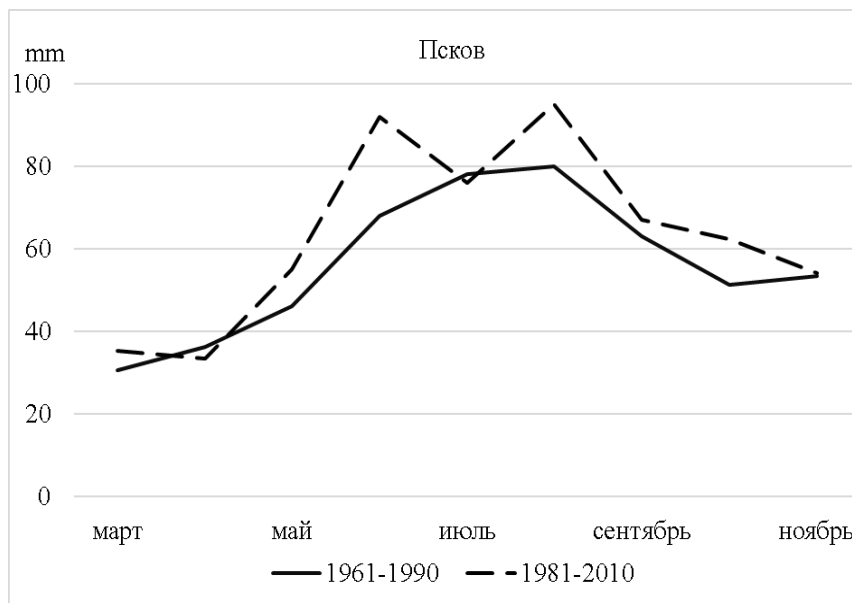


Рисунок 2 – Климатические нормы месячных сумм осадков за периоды с 1961 по 1990 г. и с 1981 по 2010 г. по ГМС Псков, мм

Статистический анализ изменения вариабельности сезонных осадков осуществлялся разбиением 72-летнего периода на два 36-летних периода: 1945–1980 и 1981–2016 гг. Критерием для такого разбиения явилось изменение интенсивности крупномасштабных циркуляционных процессов в средних и высоких широтах при повышающемся фоне температуры в глобальном масштабе [16]. Такой анализ показал, что абсолютные максимумы осадков в подавляющем числе случаев приходятся на интервал 1997–2009 гг., а также наблюдались в 2012, 2013 и 2016 гг., что соответствует фазе усиления циклонической активности [17].

Среди климатических мод, влияющих на температурно-влажностные условия в европейском Нечерноземье, предпочтение отдано анализу влияния такой климатической моды, как Восточно-Атлантическое колебание

(ВАК). В Пскове в 1998 г. сумма летних осадков составила абсолютный максимум, равный 457 мм, и соответствовала значению летнего индекса ВАК = 0,77. В 2003 г. максимум летних осадков составил 414 мм и соответствовал значению летнего индекса ВАК = 0,80. В 2016 г. максимум летних осадков достиг 391 мм и соответствовал значению летнего индекса ВАК = 1,44. То есть все максимумы летних осадков наблюдались при положительных значениях индекса ВАК.

Сравнение параметров эмпирических распределений отклонений количества сезонных осадков за период 1945–1980 и 1981–2016 гг. свидетельствует об учащении резких положительных аномалий осадков в летние и осенние сезоны. В качестве примера в таблице 3 представлены показатели экстремальности количества летних осадков (июнь – август).

Таблица 3 – Сравнение экстремумов летних высоких осадков за период 1945–1980 и 1981–2016 гг.

ГМС	В мм		
	Среднее количество осадков за период 1945–2016 гг.	Максимальное количество за период 1945–1980 гг. (год)	Максимальное количество за период 1981–2016 гг. (год)
Псков	238	338 (1960)	457 (1998)
Вологда	212	336 (1963)	385 (1987)
Петрозаводск	215	388 (1961)	396 (2016)
Вытегра	234	462 (1961)	365 (2009)
Шенкурск	209	340 (1978)	333 (2007)
Котлас	204	399 (1952)	382 (2000)
Сыктывкар	202	262 (1954)	341 (2012)

Отметим, что абсолютные максимумы осенних осадков в Пскове превышают норму почти на 90 %, а в Вологде – почти на 70 %.

В распределениях отклонений количества весенних осадков имеет место увеличение среднеквадратического отклонения σ_p за период 1981–2016 гг. в западном секторе Северо-Западного региона России. При этом в большинстве случаев отмечается положительная асимметрия и умеренный эксцесс. Для распределений отклонений количества летних осадков от трендов выявляется значительное увеличение среднеквадрати-

ческого отклонения за период 1981–2016 гг. по сравнению с 1945–1981 гг. (таблица 4).

Таблица 4 – Параметры распределений отклонений сумм летних осадков от уровней трендов на интервалах 1945–1980 и 1981–2016 гг.

ГМС	Интервал 1945–1980 гг.			Интервал 1981–2016 гг.		
	σ_p	Асимметрия	Эксцесс	σ_p	Асимметрия	Эксцесс
Псков	53,3	0,166	2,17	86,2	0,506	2,58
Вологда	63,9	0,281	3,05	82,7	0,412	2,44
Петрозаводск	74,3	0,628	3,13	62,8	0,455	2,48
Вытегра	77,8	0,576	3,67	64,3	–0,246	2,19
Шенкурск	56,7	0,016	2,49	69,1	0,092	2,14
Котлас	59,7	0,292	3,59	67,8	0,792	3,05
Сыктывкар	41,1	–0,338	2,28	60,7	–0,082	2,53

Резюмируя анализ вышерассмотренных распределений, можно заключить, что возрастание величины среднеквадратического отклонения за период 1981–2016 гг. чаще всего достигается за счет вклада увеличивающейся частоты резких положительных аномалий осадков.

Сравнение параметров эмпирических распределений отклонений количества сезонных осадков на интервалах 1945–1980 и 1981–2016 гг. свидетельствует об учащении резких положительных аномалий осадков в летний сезон. Анализ статистических характеристик трендов аномалий количества сезонных осадков показал, что величины среднеквадратических значений подтверждают увеличение в последние годы отклонений от климатических норм.

По ГМС Псков в весенний сезон разность конечного и начального трендовых значений количества осадков составила 32 мм при коэффициенте линейного тренда 0,412, летом 33 мм и 0,475, осенью 22 мм и 0,359 соответственно.

Анализ показал, что тренды статистически незначимы и не могут служить базой для экстраполяционных прогнозных оценок, используемых для проектирования новых и реконструкций существующих мелиоративных осушительных систем в изменяющихся климатических условиях ре-

гиона. Однако они отражают последовательные флуктуации изменений количества осадков. Таким образом, проявляется необходимость знания статистических характеристик прогнозируемых осадков для вероятностной оценки возможного снижения эффективности водоотвода дренажными системами по причине прогнозируемого превышения климатической нормы, закладываемой в расчеты при проектировании реконструкции мелиоративных систем региона.

Привлечение для этой цели данных модельных прогнозов осадков, публикуемых МГЭИК (IPCC), малопродуктивно по двум причинам. Во-первых, они выдаются потребителям в детерминированном виде и не сопровождаются статистическими характеристиками распределений плотности вероятности осадков, их оправдываемость неизвестна. Во-вторых, расхождения данных реанализа и данных ГМС достигают 100–150 мм. К тому же не поддается оценке интенсивность экстремальных осадков. Вычисления статистической значимости такого межмодельного прогноза дают только лишь суждение о степени уверенности в выводах [2].

В связи с этим авторами предложена модификация ансамблевого метода обработки данных расчетов по рекомендуемым МГЭИК глобальным климатическим моделям GCMs (Global Climate Models) путем приведения таких прогнозов к вероятностному виду методами математики нечетких множеств [8, 13]. В этом случае прогнозы, рассчитанные по каждой из множества моделей, должны рассматриваться как данные соответствующего числа независимых друг от друга «экспертов». При таком подходе возникают неклассические вероятности двух типов: валентные и аксиологические. Валентная вероятность выражает ожидаемость с учетом наличия фактических свидетельств об объекте исследования, и если выборка прогнозов репрезентативна в смысле однородности событий, то вероятность является статистической. Аксиологическая вероятность выражает ожидаемость реализации с учетом контекста субъективных оценок прогнозируе-

мых величин, вычисленных по каждой из моделей GCMs в условиях объективной неопределенности. В этом случае понятие случайности замещается понятием ожидаемости. Исходной точкой в нечеткой логике является существование у каждого эксперта своего решения рассматриваемой задачи. Методически предложенное решение задачи реализуется набором процедур нахождения характеристической функции принадлежности выборки как ансамблевой совокупности модельных прогнозов.

В ходе выполнения исследования проведено построение плотностей распределений прогнозируемых сумм суточных осадков во временном периоде 2011–2030 гг. для трех месяцев вегетационного периода (май, июнь, июль) на Северо-Западе России. К анализу были привлечены данные, вычисленные по 10 транзитивным моделям и четырем эмиссионным сценариям.

Анализ полученных распределений показал возможность аппроксимации функций принадлежности законами одно- и мультимодальных непрерывных плотностей распределений. Изменения уровня осадков и статистические характеристики распределений нормированных прогнозируемых изменений количества осадков за май, июнь, июль на территории Северо-Западного региона России показаны в таблице 5.

Таблица 5 – Статистические характеристики распределений прогнозируемых изменений количества осадков за май, июнь, июль к 2030 г.

ГМС	σ_p	Асимметрия	Эксцесс
Псков	32,4	–0,617	–0,262
Вологда	27,8	0,170	–0,016
Петрозаводск	26,5	0,091	–0,026
Вытегра	22,9	–0,120	–0,764
Шенкурск	24,8	–0,066	–0,976
Котлас	30,9	0,446	–0,853
Сыктывкар	33,8	0,665	–0,834

Сравнение данных таблиц 4 и 5 указывает на удовлетворительное согласование статистических характеристик изменений осадков и определенную возможность экстраполировать показатели таблицы 4 для каче-

ственных прогнозных оценок изменений количества осадков на Северо-Западе России.

Почвенный блок системы «осадки – почва – дренаж»

Длительная сельскохозяйственная эксплуатация земель в условиях избыточного увлажнения и промывного режима сопровождается изменением физических свойств, преобразованием гранулометрического состава почв. Спектр влияния дренажа на изменение процессов почвопреобразований многообразен. В число факторов влияния входят: количество дней и интенсивность осадков, отношение дождя к снегу, производство биомассы в агроценозе, скорость разложения растительных остатков, микробная активность почвы, интенсивность испарения и изменения в землепользовании, необходимые для приспособления к новому климатическому режиму [18, 19].

В настоящей статье обсуждается эффект изменения гранулометрического состава мелиорированных земель в условиях увеличения интенсивности и частоты осадков на примере Меньковского филиала Агрофизического НИИ, расположенного в Гатчинском районе Ленинградской области (в Северо-Западном регионе РФ).

Исследование выполнено на типичных для землепользования мелиорированных почвах (Stagnic Retisols, Rustic Podzols, Naplic Podzols по классификации WRB¹; FAO, 2015) и на почвах Gleysols, Gleyic Retisols, Gleyic Podzols. По гранулометрическому составу почвы представляют супесчаные разности. Сравнивались данные результатов картографирования и лабораторного анализа почв в 1976 и 2014 гг. В этот период земли осушались закрытым гончарным трубчатым дренажом. Изменения гранулометрического состава почв определялись стандартными лабораторными методами. Образцы почв исследованы по размеру частиц в классе: песок

¹ 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]. – Mode of access: <http://www.fao.org/3/i3794en/I3794en.pdf>, 2020.

1000–50 мкм, пыль 50–10 мкм и ил 5–1 мкм. Почвенные разрезы в 2014 г. для отбора образцов закладывались с частотой, соответствующей требованиям к построению карт масштаба 1:7500, с учетом рабочих материалов почвенной съемки 1976 г. Почвенные разрезы 2014 г. были заложены близко к пространственным координатам разрезов 1976 г.

По данным 1976 г. сформированы группы почв по проявлению или отсутствию признаков глеевого процесса в профиле. Сравнивались между собой распределения частиц по размерам для каждой из почв внутри генетической группы. Достоверность различий распределения частиц по размерам оценивалась при помощи коэффициента корреляции Пирсона ($p > 0,95$). При отсутствии или слабой корреляционной связи почвы не попадали в одну группу. По данным 2014 г. произведена аналогичная процедура группировки почв. Такой алгоритм позволил набрать репрезентативный материал для сравнительного статистического исследования почв 1976 и 2014 гг. Сравнивалось распределение по глубине фракций пыли, песка и ила. Проверка достоверности различий в распределении фракций ила, пыли и песка в пространстве и по глубине профилей почв осуществлялась с помощью критерия значимости Манна – Уитни.

Для реализации задачи исследования проведено районирование почв землепользования по степени гидроморфизма [20], выделено пять групп почв [21, 22]. Изменения процентного состава почв разной степени увлажнения (гидроморфизма) в почвенном покрове землепользования за период 1976–2014 гг. показаны в таблице 6.

Таблица 6 – Изменение доли почв разной степени увлажнения в почвенном покрове Меньковского филиала с 1976 по 2014 г.

Группа почв (по WRB; FAO, 2015)		В %	
		1977 г.	2014 г.
Почвы автоморфного генезиса (Albic Retisols)		20	28
Почвы полугидроморфного генезиса	Stagnic Retisols	5	4
	Haplic Podzols	22,6	16
	Gleyic Retisols	34	32
Почвы гидроморфного генезиса (Gleyic Podzols, Histic Gleysols)		18	20

Статистический анализ U-критерием Манна – Уитни показал статистическую незначимость различий в структуре почвенного покрова, на уровне вероятности 0,95.

С 1976 по 2014 г. произошли изменения гранулометрического состава пахотных и подпахотных горизонтов почв. При картографировании почвенного покрова в 1976 г. большинство почв по гранулометрическому составу были классифицированы как пылевато-песчаные почвенные разности. При картографировании в 2014 г. эти почвы классифицированы как песчаные. Для оценки изменения гранулометрического состава почв вычислены коэффициенты неоднородности (K_n) почв. Коэффициент неоднородности – это отношение размера частиц, доля которых в почве более 60 % от массы почвы, к размеру частиц с содержанием 10 % ($K_n = d_{60}/d_{10}$). Содержание частиц размерами d_{60} и d_{10} определено на основе кумулятивных кривых гранулометрического состава почвы. Вычисленные коэффициенты неоднородности показаны в таблице 7.

Таблица 7 – Средние коэффициенты неоднородности гранулометрического состава для горизонтов почв различного генезиса

Объект	Горизонт	Коэффициент неоднородности*	
		1976 г.	2014 г.
Группа почв автоморфного генезиса (Albic Retisols)	Пахотный/подпахотный	24/26	11/6
Группа почв полугидроморфного генезиса (Stagnic Retisols)	Пахотный/подпахотный	26/40	15/32
Группа почв гидроморфного генезиса (Histic Retisols)	Пахотный/подпахотный	12/23	26/11
* Примечание – Указаны величины коэффициентов неоднородности: числитель – значения коэффициента неоднородности в пахотном горизонте почв, знаменатель – в подпахотном горизонте.			

Принято полагать, что если величина K_n менее 5, то почвенный горизонт сортирован по гранулометрическому составу. Для оценки статистической значимости произошедших изменений использовали статистический критерий Манна – Уитни. Результаты статистической оценки изменения гранулометрического состава почв с 1976 по 2014 г. представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Статистическая значимость изменения величины коэффициентов неоднородности за период 1976–2014 гг.

Группа	Р(Апах) 0–20(30) см		Подпахотный горизонт 30–60(70) см	
	1976 г.	2014 г.	1976 г.	2014 г.
Почвы автоморфного генезиса	24	11	26	6
	незначимы*		значимы*	
Почвы полугидроморфного генезиса	15	26	32	40
	значимы		незначимы	
Почвы гидроморфного генезиса	26	12	11	23
	незначимы		незначимы	

* – указана значимость (U-критерий) изменений гранулометрического состава почв, произошедших с 1976 г.

Для обобщенных выводов использованы экспериментальные данные натурального однородного аналога – многолетние исследования длительного осушения закрытым дренажом дерново-подзолистых легкосуглинистых почв (Stagnic Retisols) [23]. Наблюдения выполнялись в двух контролируемых сроках осушения: 5–8 и 22–25 лет. В течение первого срока водопроницаемость с поверхности почвы составляла в среднем 0,42 м/сут, а на глубине 30 см к концу срока снизилась в 2,3 раза до 0,18 м/сут. Во второй срок действия дренажа водопроницаемость почв снизилась до 15–20 %. В течение 6-летнего периода осушения в слое 20–60 см пористость увеличилась на 3–8 %, коэффициент фильтрации на 40–60 %, структурность на 25–42 %, аэрация на 40–50 % по сравнению с контролем. При увеличении продолжительности дренажа отмечена тенденция уплотнения почвы с 1,46 до 1,50 г/см³, роста твердости с 1,3 до 1,39 МПа.

Результаты этого исследования позволяют предположить, что сельскохозяйственное использование почвы в течение 38 лет привело к деградации почвы из-за сочетания климатических и антропогенных факторов. Происходящие в совокупности процессы влияют на пространственную и профильную изменчивость содержания частиц, гранулометрический состав почв стал более легким (песчаным). Плотность сложения, общая пористость аэрации тесно коррелируют со степенью осушения, характером гидроморфизма. В хорошо дренированных почвах автоморфного генезиса

статистически значимые изменения гранулометрического состава начинаются глубже по профилю, а в почвах полугидроморфного генезиса ближе к дневной поверхности. Такая ситуация позволяет сделать вывод о выносе водой тонких фракций почвы преимущественно боковым стоком по водупорным слоям.

Обследования дренажных систем показывают, что периодическое увеличение интенсивности осадков приводит к достоверной потере почвами тонких фракций. На минеральных дерново-подзолистых почвах (Retisols (halpic; stagnic)) при продолжительности осушения закрытым дренажом более 5–13 лет содержание агрегатов крупнее 0,25 мм в слое 0–60 см снижается до 74,8–77,9 %, при эксплуатации дренажа в течение 22–25 лет уменьшается до 72 %, впитывающая способность почвы снижается на 15–22 % [4]. Фракция пыли перемещается на 30–50 см ниже по профилю. В зоне дренажа практически полностью исчезают характерные признаки гидроморфизма почв. Осушение усиливает перераспределение фракций мелкой пыли и ила по профилю почвенных горизонтов дерново-подзолистых суглинистых почв, оно прослеживается до глубины заложения дрен. Тонкие фракции (осредненный диаметр 0,032 мм) перемещаются ниже по профилю почв и осаждаются в дренажных системах, развивается их заиливание. При длительной эксплуатации более 50 % поперечного сечения дрены заиливается при мощности наилка 26–32 мм (плотность наилка 1,920 т/м³), что приводит к существенному уменьшению эффективности закрытой дренажной системы, иногда к выходу ее из работоспособного состояния. Восстановление эффективности водоприемности таких осушительных систем осуществляется применением различного типа гидромеханизированных технологий промывки и очистки дренажной сети [24].

Выводы. Результаты выполненного исследования объясняют причины наблюдаемого в последние годы периодического переувлажнения мелиорированных закрытым трубчатым дренажом сельскохозяйственных земель

Северо-Западного региона Нечерноземной зоны России. Климатическая норма осадков за период 1981–2010 гг. в некоторых случаях увеличилась более чем на 20 % от нормы периода 1961–1990 гг. Абсолютный максимум осадков пришелся на период 1981–2016 гг., он составил 396–457 мм и соответствовал летнему индексу Восточно-Атлантического колебания на уровне 0,77–1,44. При длительной эксплуатации мелиорированных земель более 25 лет тонкие фракции почвы осредненным диаметром менее 0,032 мм переместились ниже по почвенному профилю, в результате произошло заиление более 50 % сечения дрены наилком плотностью не менее 1,900 т/м³, полностью исчезли характерные признаки гидроморфизма.

Рекомендуется при плановых ремонтах и реконструкциях таких мелиоративных осушительных систем принимать в расчет тенденции изменения пространственно-временной структуры атмосферного увлажнения, трансформацию морфологического строения, физических и гидрофизических свойств дерново-подзолистых почв и предусматривать создание гидрофизических технологий регулирования, перехвата и отвода поверхностных стоков. Технологии возделывания полевых культур на таких мелиорированных землях должны содержать соответствующие гидротехнические осушительные и почвозащитные противоэрозионные мероприятия.

Список использованных источников

- 1 Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации / Е. М. Ацентьева [и др.]; под ред. В. М. Катцова. – СПб., 2017. – 106 с.
- 2 Касимов, Н. С. Эколого-географические последствия глобального потепления климата XXI века на Восточно-Европейской равнине и в Западной Сибири / Н. С. Касимов, А. В. Кислов. – М.: Макс-Пресс, 2011. – 493 с.
- 3 Ritzema, H. P. Land drainage strategies to cope with climate change in the Netherlands / H. P. Ritzema, L. C. P. M. Stuyt // *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*. – 2015. – Vol. 65. – P. 80–92. – DOI: 10.1080/09064710.2014.994557.
- 4 Future impacts of land use and climate change on extreme runoff values in selected catchments of Slovakia / S. Kohnová, P. Rončák, K. Hlavčová, J. Szolgay, A. Rutkowska // *Meteorology, Hydrology and Water Management*. – 2019. – № 7(1). – P. 47–55. – DOI: 10.26491/mhwm/97254.
- 5 On the linkage between runoff generation, land drainage, soil properties, and temporal patterns of precipitation in agricultural floodplains / G. Sofia, F. Ragazzi, P. Giandon, G. Dalla Fontana, P. Tarolli // *Advances in Water Resources*. – 2019. – Vol. 124. – P. 120–138. – DOI: 10.1016/j.advwatres.2018.12.003.

6 Пятый оценочный доклад [Электронный ресурс] / МГЭИК. – 2013. – Режим доступа: http://meteorf.ru/upload/pdf_download/3-Vladimir-Kattsov.pdf, 2020.

7 Менжулин, Г. В. Анализ достоверности и точности современных модельных сценариев изменений глобального климата, рекомендованных в 4-м отчете МГЭИК / Г. В. Менжулин // Методы оценки сельскохозяйственных рисков и технологий смягчения последствий изменения климата в земледелии: материалы всерос. науч. конф. – СПб., 2011. – С. 43–44.

8 Uskov, I. V. Modification of the ensemble method for generalising IPCC forecasts to bring them into probabilistic representation / I. V. Uskov, A. O. Uskov // *International Journal of Applied Exercise Physiology*. – 2020. – Vol. 9, № 4. – P. 174–185.

9 Николаев, М. В. Оценка изменяющегося вклада обильных осадков в рискованность земледелия в Нечерноземье европейской России / М. В. Николаев // *Известия Русского географического общества*. – 2018. – Т. 150, № 6. – С. 1–14. – DOI: 10.1134/S0869607118060010.

10 Янко, Ю. Г. О некоторых причинах переувлажнения и повторного заболачивания сельскохозяйственных земель в Ленинградской области / Ю. Г. Янко, А. В. Петрушин // *Мелиорация и водное хозяйство*. – 2018. – № 4. – С. 36–38.

11 Гулюк, Г. Г. Агромелиоративные мероприятия при длительной эксплуатации дренажа и экологической реабилитации техногенно загрязненных земель гумидной зоны / Г. Г. Гулюк. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 232 с.

12 Усков, И. Б. Применение математики нечетких множеств к проблеме управления агроклиматическими рисками / И. Б. Усков, А. О. Усков // *Агрофизика*. – 2015. – № 1. – С. 18–25.

13 Усков, И. Б. Основы адаптации земледелия к изменениям климата: справ. изд. / И. Б. Усков, А. О. Усков. – СПб., 2014. – 383 с.

14 Гухман, А. А. Введение в теорию подобия / А. А. Гухман. – М.: Высш. шк., 1973. – 296 с.

15 ВМО № 49. Технический регламент. Т. 1. Общие метеорологические стандарты и рекомендуемые практики. – 2015. – 38 с.

16 Полонский, А. Б. Циркуляционные индексы и температурный режим Восточной Европы в зимний период / А. Б. Полонский, И. А. Кибальчич // *Метеорология и гидрология*. – 2015. – № 1. – С. 5–17.

17 Муравьев, А. В. Распределение экстремальных характеристик атмосферной циркуляции по данным реанализа и гидродинамического моделирования / А. В. Муравьев, И. А. Куликова, Е. Н. Круглова // *Метеорология и гидрология*. – 2009. – № 7. – С. 33–47.

18 Nearing, M. A. Expected climate change impacts on soil erosion rates: A review / M. A. Nearing, F. F. Pruski, M. R. O'Neal // *Journal of Soil and Water Conservation*. – 2004, Jan. – № 59(1). – P. 43–50.

19 Bucur, D. Effects of long-term soil and crop management on the yield and on the fertility of eroded soil / D. Bucur, G. Jitareanu, C. Ailincai // *Journal of Food, Agriculture & Environment*. – 2011. – № 9(2). – P. 207–209.

20 Зайдельман, Ф. Р. Мелиорация почв / Ф. Р. Зайдельман. – 3-е изд. – М.: МГУ, 2003. – 448 с.

21 Корректировочные работы по крупномасштабному почвенному картографированию Меньковского филиала Агрофизического института Россельхозакадемии / К. Г. Моисеев, Е. Я. Рижия, Л. В. Бойцова, Е. Г. Зинчук, В. Д. Гончаров // *Агрофизика*. – 2013. – № 1. – С. 30–36.

22 Моисеев, К. Г. Крупномасштабная почвенная карта Меньковского филиала Агрофизического института Россельхозакадемии / К. Г. Моисеев, Е. Г. Зинчук // *Агрофизика*. – 2014. – № 3. – С. 8–17.

23 Полуэктова, Е. А. Агроэкологическая оценка устойчивости почв гумидной зоны к длительному осушению: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.03 / Полуэктова Елена Александровна. – Киров, 2009. – 16 с.

24 Михеев, А. В. Гидромеханизированная технология очистки трубчатой дренажной сети / А. В. Михеев // Вестник Донского государственного технического университета. – 2010. – Т. 10, № 5(48). – С. 653–660.

References

1 Akentiev E.M. [et al.], 2017. *Doklad o klimaticheskikh riskakh na territorii Rossiyskoy Federatsii* [Report on Climate Risks in the Territory of the Russian Federation]. Saint Petersburg, 106 p. (In Russian).

2 Kasimov N.S., Kislov A.V., 2011. *Ekologo-geograficheskie posledstviya global'nogo potepleniya klimata XXI veka na Vostochno-Evropeyskoy ravnine i v Zapadnoy Sibiri* [Ecological and Geographical Consequences of Global Warming of Climate of the XXI century on the East European Plain and in Western Siberia]. Moscow, Max-Press Publ., 493 p. (In Russian).

3 Ritzema H.P., Stuyt L.C.P.M., 2015. Land drainage strategies to cope with climate change in the Netherlands. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*, vol. 65, pp. 80-92, DOI: 10.1080 / 09064710.2014.994557.

4 Kohnová S., Rončák P., Hlavčová K., Szolgay J., Rutkowska A., 2019. Future impacts of land use and climate change on extreme runoff values in selected catchments of Slovakia. *Meteorology, Hydrology and Water Management*, no. 7(1), pp. 47-55, DOI: 10.26491/mhwm/97254.

5 Sofia G., Ragazzi F., Giandon P., Dalla Fontana G., Tarolli P., 2019. On the linkage between runoff generation, land drainage, soil properties, and temporal patterns of precipitation in agricultural floodplains. *Advances in Water Resources*, vol. 124, pp. 120-138, DOI: 10.1016/j.advwatres.2018.12.003.

6 *Pyaty otsenochnyy doklad* [Fifth Assessment Report] IPCC. 2013, available: http://meteorf.ru/upload/pdf_download/3-Vladimir-Kattsov.pdf [accessed 2020]. (In Russian).

7 Menzhulin G.V., 2011. *Analiz dostovernosti i tochnosti sovremennykh model'nykh stsensariy izmeneniya global'nogo klimata, rekomendovannykh v 4-m otchete MGEIK* [Analysis of the reliability and accuracy of modern model scenarios of global climate change recommended in the 4th IPCC report]. *Metody otsenki sel'skokhozyaystvennykh riskov i tekhnologiy smyagcheniya posledstviy izmeneniya klimata v zemledelii: materialy vserossiyskoy nauchnoy konferentsii* [Methods for Assessing Agricultural Risks and Technologies to Mitigate the Effects of Climate Change in Agriculture: Proc. Scientific Conf.]. Saint Petersburg, pp. 43-44. (In Russian).

8 Uskov I.B., Uskov A.O., 2020. Modification of the ensemble method for generalizing IPCC forecasts to bring them into probabilistic representation. *International Journal of Applied Exercise Physiology*, vol. 9, no. 4, pp. 174-185.

9 Nikolaev M.V., 2018. *Otsenka izmenyayushchegosya vkladu obil'nykh osadkov v riskovannost' zemledeliya v Nechernozem'e evropeyskoy Rossii* [Assessing the changing contribution of abundant precipitation to farming risks in the non-chernozem zone of European Russia]. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva* [Bull. of the Russian Geographical Society], vol. 150, no. 6, pp. 1-14, DOI: 10.1134/S0869607118060010. (In Russian).

10 Yanko Yu.G., Petrushin A.V., 2018. *O nekotorykh prichinakh pereuvlazhneniya i povtornogo zabolachivaniya sel'skokhozyaystvennykh zemel' v Leningradskoy oblasti* [On some causes of waterlogging and re-waterlogging of agricultural lands in Leningrad region]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Irrigation and Water Management], no. 4, pp. 36-38. (In Russian).

11 Gulyuk G.G., 2004. *Agromeliorativnye meropriyatiya pri dlitel'noy ekspluatatsii drenazha i ekologicheskoy reabilitatsii tekhnogenno zagryaznennykh zemel' gumidnoy zony*

[Agroreclamation measures during long-term operation of drainage and ecological rehabilitation of anthropogenic contaminated lands in the humid zone]. Moscow, Moscow State University Publ., 232 p. (In Russian).

12 Uskov I.B., Uskov A.O., 2015. *Primenenie matematiki nechetkikh mnozhestv k probleme upravleniya agroklimaticheskimi riskami* [Application of mathematics of fuzzy sets to the problem of agro-climatic risk management]. *Agrofizika* [Agricultural Physics], no. 1, pp. 18-25. (In Russian).

13 Uskov I.B., Uskov A.O., 2014. *Osnovy adaptatsii zemledeliya k izmeneniyam klimata: sprav. izd.* [Fundamentals of adaptation of agriculture to climate change: ref. ed.]. Saint Petersburg, 383 p. (In Russian).

14 Gukhman A.A., 1973. *Vvedenie v teoriyu podobiya* [Introduction to the Theory of Similarity]. Moscow, Higher School Publ., 296 p. (In Russian).

15 *Tekhnicheskiy reglament. T. 1. Obshchie meteorologicheskie standarty i rekomenduemye praktiki* [Technical Regulations, vol. 1. General Meteorological Standards and Recommended Practices]. WMO, no. 49, 2015, 38 p. (In Russian).

16 Polonsky A.B., Kibalchich I.A., 2015. *Tsirkulyatsionnye indeksy i temperaturnyy rezhim Vostochnoy Evropy v zimniy period* [Circulation indices and temperature regime of Eastern Europe in winter]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology], no. 1, pp. 5-17. (In Russian).

17 Murav'yov A.V., Kulikova I.A., Kruglova E.N., 2009. *Raspredelenie ekstremal'nykh kharakteristik atmosferynoy tsirkulyatsii po dannym reanaliza i gidrodinamicheskogo modelirovaniya* [Distribution of extreme characteristics of atmospheric circulation according to reanalysis and hydrodynamic modeling data]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology], no. 7, pp. 33-47. (In Russian).

18 Nearing M.A., Pruski F.F., O'Neal M.R., 2004. Expected climate change impacts on soil erosion rates: A review. *Journal of Soil and Water Conservation*, Jan., no. 59(1), pp. 43-50.

19 Bucur D., Jitareanu G., Ailincai C., 2011. Effects of long-term soil and crop management on the yield and on the fertility of eroded soil. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, no. 9(2), pp. 207-209.

20 Zaidelman F.R., 2003. *Melioratsiya pochv* [Soil Reclamation]. 3rd ed., Moscow, MGU Publ., 448 p. (In Russian).

21 Moiseev K.G., Rizhia E.Ya., Boytsova L.V., Zinchuk E.G., Goncharov V.D., 2013. *Korrektirovochnye raboty po krupnomasshtabnomu pochvennomu kartografirovaniyu Men'kovskogo filiala Agrofizicheskogo instituta Rossel'khozakademii* [Corrections of large-scale soil mapping of Menkovo branch of Agrophysical Research Institute of the Russian Agricultural Academy]. *Agrofizika* [Agricultural Physics], no. 1, pp. 30-36. (In Russian).

22 Moiseev K.G., Zinchuk E.G., 2014. *Krupnomasshtabnaya pochvennaya karta Men'kovskogo filiala Agrofizicheskogo instituta Rossel'khozakademii* [Large-scale soil map of Menkovo branch of the Agrophysical Institute of the Russian Agricultural Academy]. *Agrofizika* [Agricultural Physics], no. 3, pp. 8-17. (In Russian).

23 Poluektova E.A., 2009. *Agroekologicheskaya otsenka ustoychivosti pochv gumidnoy zony k dlitel'nomu osusheniyu. Avtoreferat diss. kand. s.-kh. nauk* [Agroecological assessment of soil resistance in the humid zone to prolonged drainage. Abstract of cand. agri. sci. diss.]. Kirov, 16 p. (In Russian).

24 Mikheev A.V., 2010. *Gidromekhanizirovannaya tekhnologiya ochistki trubchatoy drenazhnoy seti* [Hydromechanized technology of turbular drainage network purification]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bull. of Don State Technical University], vol. 10, no. 5(48), pp. 653-660. (In Russian).

Усков Игорь Борисович

Ученая степень: доктор физико-математических наук

Ученое звание: член-корреспондент РАН, профессор

Должность: главный научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Агро-физический научно-исследовательский институт»

Адрес организации: пр-т Гражданский, 14, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 195220

E-mail: i.b.uskov@gmail.com

Uskov Igor Borisovich

Degree: Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Title: Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Professor

Position: Chief Researcher

Affiliation: Agrophysical Research Institute

Affiliation address: ave. Grazhdanskiy, 14, Saint Petersburg, Russian Federation, 195220

E-mail: i.b.uskov@gmail.com

Моисеев Кирилл Геннадьевич

Ученая степень: кандидат сельскохозяйственных наук

Должность: ведущий научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Агро-физический научно-исследовательский институт»

Адрес организации: пр-т Гражданский, 14, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 195220

E-mail: kir_moiseev@mail.ru

Moiseyev Kirill Gennadyevich

Degree: Candidate of Agricultural Sciences

Position: Leading Researcher

Affiliation: Agrophysical Research Institute

Affiliation address: ave. Grazhdanskiy, 14, Saint Petersburg, Russian Federation, 195220

E-mail: kir_moiseev@mail.ru

Николаев Михаил Валентинович

Ученая степень: кандидат географических наук

Ученое звание: старший научный сотрудник

Должность: старший научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Агро-физический научно-исследовательский институт»

Адрес организации: пр-т Гражданский, 14, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 195220

E-mail: clenrusa@mail.ru

Nikolayev Mikhail Valentinovich

Degree: Candidate of Geographic Sciences

Title: Senior Researcher

Position: Senior Researcher

Affiliation: Agrophysical Research Institute

Affiliation address: ave. Grazhdanskiy, 14, Saint Petersburg, Russian Federation, 195220

E-mail: clenrusa@mail.ru

Кононенко Ольга Владимировна

Ученая степень: кандидат сельскохозяйственных наук

Должность: научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Агро-физический научно-исследовательский институт»

Адрес организации: пр-т Гражданский, 14, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 195220

E-mail: okveda@mail.com

Kononenko Olga Vladimirovna

Degree: Candidate of Agricultural Sciences

Position: Researcher

Affiliation: Agrophysical Research Institute

Affiliation address: ave. Grazhdanskiy, 14, Saint Petersburg, Russian Federation, 195220

E-mail: okveda@mail.com

Усков Андрей Олегович

Должность: научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Агро-физический научно-исследовательский институт»

Адрес организации: пр-т Гражданский, 14, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 195220

E-mail: uskovich@gmail.com

Uskov Andrey Olegovich

Position: Researcher

Affiliation: Agrophysical Research Institute

Affiliation address: ave. Grazhdanskiy, 14, Saint Petersburg, Russian Federation, 195220

E-mail: uskovich@gmail.com

Поступила в редакцию 13.08.2020

После доработки 30.09.2020

Принята к публикации 16.10.2020