



МАГНИЙ В ПОЧВАХ И РАСТЕНИЯХ В УСЛОВИЯХ СКЛОНОВОГО АГРОЛАНДШАФТА НА ЮГО-ВОСТОКЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2019 Т. В. Нечаева , Н. В. Гопп , О. А. Савенков, Н. В. Смирнова 

Адрес: ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2 г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: nechaeva@issa-siberia.ru

Цель исследования: провести сравнительную оценку магниевого состояния сильно- и среднегумусированных почв, расположенных на разных гипсометрических уровнях эрозионно опасного склонового агроландшафта, по содержанию в пахотном горизонте валового магния, подвижной (обменной) и водорастворимой форм элемента, а также лабораторно-аналитических методов определения магния в почвах и растениях.

Место и время проведения. Геоморфологически территория исследования относится к Предсалаирской дренированной равнине (Предсалаирье) на юго-востоке Западной Сибири (55°02'20" с.ш.; 83°50'00" в.д.), административно – к Тогучинскому району Новосибирской области. На участке пахотного угодья площадью 225 га и протяженностью 4 км условно выделили склоновые позиции на следующих высотных ступенях (абсолютные отметки высот): верхняя часть склона – BC_I (280-310 м), средняя – BC_{II} (260-280 м) и BC_{III} (220-260 м), нижняя – BC_{IV} (190-220 м). Отбор почвенных и растительных проб провели в июле 2013 г.

Материалы и методы. Преобладающие почвы: черноземы оподзоленные и выщелоченные, темно-серые и серые лесные по классификации почв СССР (1977), что соответствует агрочерноземам глинисто-иллювиальным элювирированным и темнойязыковатым, агротемно-серым и агросерым по классификации почв России (2004, 2008) или Luvic Greyzemic Chernozems, Naplic Chernozems, Luvic Greyzemic Phaeozems, Luvic Retic Greyzemic Phaeozems по классификации почв WRB (2014). Отбор индивидуальных почвенных проб ($n = 55$) провели буром из слоя 0-30 см (пахотный горизонт) по нерегулярной сетке, запасы надземной фитомассы овсяно-гороховой смеси ($n = 38$) – методом укосов с учетной площади 0,25 м². Координаты точек отбора почвенных и растительных проб определили с помощью системы геопозиционирования (GPS, Garmin eTrex Vista).

Почвы проанализированы на содержание органического углерода с пересчетом на гумус в сернохромовой смеси по Тюрину; валового магния ($Mg_{вал}$) – в сухих порошкообразных образцах методом атомно-эмиссионной спектроскопии; подвижного (обменного) магния – методом атомно-абсорбционной спектроскопии с использованием следующих экстрагирующих растворов: $Mg_{пф1} - 1$ М КСl, $Mg_{пф2} - 1$ М CH_3COONH_4 , $Mg_{пф3} - 0,1$ М $C_4H_4O_5(NH_4)_2$, $Mg_{пф4} - 0,5$ М CH_3COOH ; водорастворимого магния – двумя методами (из одной и той же вытяжки): $Mg_{вод1} -$ атомно-абсорбционной спектроскопии, $Mg_{вод2} -$ капиллярного электрофореза. Содержание валового магния в растениях ($Mg_{раст}$) определили методом атомно-абсорбционной спектроскопии двумя способами пробоподготовки: $Mg_{раст1} -$ мокрым озолением в смеси серной и хлорной кислот, $Mg_{раст2} -$ сухим озолением и количественным переносом с 1 М HCl. Содержание магния в почвах и растениях представили на элемент и рассчитали на воздушно-сухую массу. Статистическую обработку данных провели методами описательной статистики, корреляционного анализа, расчетом t -критерия Стьюдента и U -критерия Манна-Уитни.

Основные результаты. Среднее валовое содержание магния в почвах склона варьировало от 0,79 до 0,88%. Доля подвижного магния от валового содержания элемента в почвах составила в среднем 3,3-6,0%, водорастворимого магния – 0,06-0,13%. В среднегумусированных почвах вниз по склону установлено постепенное снижение содержания валового магния в ряду агрочерноземы → агротемно-серые → агросерые, и подобная закономерность выявлена нами ранее по содержанию в почвах валовых фосфора и калия. Среднее содержание подвижного магния в сильногумусированных почвах в верхней части склона (BC_I) варьировало от 3,2 до 4,0 смоль(экв)·кг⁻¹ в зависимости от экстрагента, в среднегумусированных почвах вниз по склону (BC_{II-IV}) – от 2,2 до 3,2 смоль(экв)·кг⁻¹. Результаты по содержанию водорастворимого магния в почвах, полученные методами атомно-абсорбционной спектроскопии и капиллярного электрофореза, очень близки: в среднем 0,06-0,08 и 0,04-0,09 смоль(экв)·кг⁻¹. Однако более чувствительным к снижению содержания водорастворимого магния в среднегумусированных почвах в средней части склона оказался метод капиллярного электрофореза. Содержание магния в надземной фитомассе овсяно-гороховой смеси, отобранной в фазу кущения злакового компонента, методом сухого озоления составило в среднем 0,21-0,26% и соответствовало оптимальному уровню, мокрым озолением – было ниже в 1,3-1,6 раза.

Заключение. В условиях склонового агроландшафта Предсалаирья на юго-востоке Западной Сибири сильногумусированные почвы в верхней части склона (5-8% гумуса, BC_I) характеризуются более высоким содержанием подвижного магния, чем среднегумусированные почвы в средней и нижней частях склона (3-5% гумуса, BC_{II-IV}). Для оценки магниевого состояния почв из рассмотренных вытяжек для определения подвижного (обменного) магния целесообразнее использовать 1 М КСl или 1 М CH_3COONH_4 с возможностью одновременного определения в одной и той же почвенной вытяжке других показателей (обменные кальций и калий, рН солевой и т.д.) в зависимости от экстрагента.

Ключевые слова: гумус; магний: валовой, подвижный (обменный), водорастворимый; эрозия; склон; высотные ступени; запасы фитомассы; магний в растениях; Новосибирская область

Цитирование: Нечаева Т.В., Гопп Н.В., Савенков О.А., Смирнова Н.В. Магний в почвах и растениях в условиях склонового агроландшафта на юго-востоке Западной Сибири // Почвы и окружающая среда. 2019. Том 2. № 4. е91. doi: 10.31251/pos.v2i4.91

ВВЕДЕНИЕ

Магний в настоящее время рассматривается как полифункциональный элемент питания растений, выполняющий не только структурообразующую роль, входя в состав органелл, клеток, мембран, клеточных стенок, но и важную функциональную роль в составе более 300 ферментов (Аристархов, 2002; Тихомирова, 2011; Marschner, 2011). Магний способствует повышению урожайности и улучшению качества продукции (увеличению крахмалистости картофеля, сахаристости корней сахарной свеклы, белковости бобовых культур и т.д.), оказывает влияние на биологическую активность почвы (Таврыкина и др., 2013; Михайловская и др., 2015; Станилевич и др., 2018; и др.). Недостаток магния в окружающей среде и кормах негативно сказывается на жизнедеятельности биоты: у растений развивается хлороз (Мазаева, 1967; Tanol, Kobayashi, 2015), животные заболевают тетанией (Аристархов, 2000; Афанасьев, 2005), у людей повышается риск заболевания раком желудка и артериальной гипертензией (Яхиев и др., 2019; Bezuglova, 2017). Поэтому необходимо корректировать недостаток магния в организме человека магниевыми добавками, которые снижают риск сердечно-сосудистых и желудочно-кишечных заболеваний.

По обобщенным литературным данным (Панников, Минеев, 1977; Аристархов, 2000; Воеводина, Воеводин, 2015; Шеуджен и др., 2015; Jakovljević et al., 2003; и др.), содержание валового (общего) магния в почвах варьирует от 0,2 до 2,4% в зависимости от минералогического и гранулометрического состава почв, типа почвообразования. Например, в почвах, образовавшихся на суглинках и глинах, больше магния, чем в почвах, возникших на песках; мелкие частицы содержат больше магния, чем крупные. Суглинки и глины, где преобладающим минералом является каолинит, бедны магнием, а где преобладает монтмориллонит – богаче им. Однако для питания растений важен магний, находящийся в почвенном поглощающем комплексе (подвижный, доступный, обменный) и в почвенном растворе (водорастворимый, легкообменный). Наиболее богаты подвижным магнием черноземные, каштановые и сероземные почвы. Ионы магния сильно гидратируются и поэтому очень слабо поглощаются почвой. В условиях влажного климата ионы магния, особенно на легких почвах, в значительной мере вымываются, в результате чего происходит снижение содержания магния в верхних и накопление его в нижних горизонтах почвы. На кислых почвах и на почвах с малой емкостью поглощения после зим с обилием осадков часто наблюдается острый недостаток магния. Магний занимает одно из первых мест в ряду потерь: $Ca > Mg > Na > K > NH_4$. Выщелачивание магния обусловлено не только количеством осадков, оно тесно связано с гранулометрическим и минералогическим составом, реакцией среды и внесением физиологически кислых минеральных удобрений (Мазаева, 1977; Годунова и др., 2013; Якименко, 2018; Shiwakoti et al., 2019; и др.).

В России около 40 млн га пахотных почв имеют низкое и очень низкое содержание подвижного магния (экстрагируемого 1 М КСl), половина из которых расположены в Нечерноземной зоне страны (Аристархов, 2002; Тихомирова, 2011). В Северо-Западном, Волго-Вятском и Уральском экономических районах России со значительным количеством дерново-подзолистых почв облегченного гранулометрического состава доля пашни с низким содержанием подвижного магния ($<1,0$ смоль(экв) \cdot кг $^{-1}$) достигает 55-76%. Недостаток магния также наблюдается в суглинистых почвах зоны выщелоченных черноземов и красноземов Западной Грузии, в дерново-подзолистых и торфяных почвах Белоруссии, в каштановых почвах Казахстана и других республиках бывшего СССР (Аристархов, 2000; Богдевич и др., 2014; Труфанова и др., 2014; и др.).

Помимо необходимости решения вопросов, связанных с недостатком элементов минерального питания растений в почвах агроценозов, одной из важнейших мировых эколого-экономических проблем, ведущих к потере почвенных ресурсов, является эрозия. Общие мировые потери продуктивных земель от эрозии оцениваются примерно в 6,7 млн га, а потери плодородного слоя – в 24 млн т ежегодно (Lai, 1991; Gabbasova et al., 2016). В этой связи эрозионно опасные и эродированные (смытые) почвы склоновых агроландшафтов, формирующиеся в результате разрушения верхнего наиболее плодородного гумусового слоя под действием стока талых и ливневых вод, во всем мире являются объектами пристального внимания ученых. Несмотря на то, что деградационные процессы присущи как плакорным, так и склоновым агроландшафтам, масштаб изменения параметров плодородия почв в последних гораздо выше. Плакорные агроландшафты более устойчивы и при соблюдении технологий могут использоваться длительное время без существенного изменения почвенно-агрохимических свойств, тогда как при эксплуатации склоновых агроландшафтов необходимо предусматривать заблаговременное применение специальных почвосберегающих технологий (Явтушенко, Макаров, 1996; Каштанов, Явтушенко, 1997; Хмелев, Танасиенко, 2009; Савоськина, 2011; Погуленко, 2013; и др.).

Площади эрозионно опасных и эродированных сельскохозяйственных угодий в России составляют 117 млн га, из них 84 млн га – пашни (Безуглов и др., 2008). В Западной Сибири эрозионными процессами охвачено около 3,5 млн га, что составляет 18 % пашни (Танасиенко, 2003). Выветривание (как процесс изменения и разрушения минералов), распаивание и вынос глинистого материала могут снижать содержание магния в верхних горизонтах почвы (Аристархов, 2000; Годунова и др., 2013; Труфанова и др., 2014; Mikkelsen, 2010). Потери магния в результате эрозии отмечаются в работах многих авторов. Например, при изучении поверхностного стока на серых оподзоленных тяжелосуглинистых почвах склона крутизной 4-5° в Курской области (Шикула, Ломакин, 1978) установлено, что с жидким стоком теряется наибольшее количество магния (до 2,0-5,5 кг $Mg^{2+} \cdot га^{-1}$) и кальция (до 3,4 кг $Ca^{2+} \cdot га^{-1}$), с твердым стоком – фосфора, кальция и гумуса. Мульчирование почвы соломой резко увеличивало смыв магния (до 4,9-5,7 кг $га^{-1}$), что связано с интенсивным вымыванием элемента из мульчи. При этом смыв растворимых веществ происходил в начале стока, а не с момента освобождения почвы от снега, что объясняется наличием частичек почвы в снеге, а также выщелачиванием химических элементов при соприкосновении талой воды с почвой и мульчей. На серых лесных и дерново-подзолистых почвах Подмосковья (Башкин и др., 1991) показана четкая зависимость содержания подвижных форм фосфора, кальция, магния, цинка от геоморфологических параметров рельефа и связанного с этим вида элементарного ландшафта. Так, зоны аккумуляции подвижных форм кальция и магния обнаружены в трансэлювиально-аккумулятивных и супераккумулятивных ландшафтах. В то же время в исследованиях на агросерой почве в лесостепи Западной Сибири (Gopp et al., 2017a) статистически значимых различий по содержанию обменного магния, экстрагируемого 1 М CH_3COONH_4 , между элювиальной и транзитной частями склона не обнаружено; пространственная изменчивость магния в пахотном горизонте (0-25 см) была связана с содержанием в почве физической глины, гумуса, показателями влажности и pH водной суспензии. Минералогический и химический состав смытых почв центра и юга Русской равнины (Чернышев, Иванова, 1993) свидетельствовал о значительном содержании в них коллоидов, богатых питательными элементами (калием, находившемся в гидрослюдах, и магнием – в монтмориллоните), а также гумуса, азота и фосфора. Например, среднее валовое содержание гумуса в смытой со склонов почве и ее фракции <0,001 мм составило 6,38 и 9,56% соответственно, калия – 2,21 и 2,30%, магния – 1,47 и 2,06%. На серых лесных почвах склонового агроландшафта в Курской области (Дубовик Е., Дубовик Д., 2013) содержание обменного магния, экстрагируемого 1 М KCl, в пахотном горизонте на водораздельном плато составило 1,6 смоль(экв) $Mg^{2+} \cdot кг^{-1}$, в то время как на склонах полярных экспозиций данный показатель варьировал от 2,1 до 2,5 смоль(экв) $кг^{-1}$. На черноземах оподзоленных в лесостепи Западной Сибири (Танасиенко и др., 2013) содержание магния, экстрагируемого 1 М CH_3COONH_4 , в гумусовом слое среднесмытой почвы составило 1,5 смоль(экв) $Mg^{2+} \cdot кг^{-1}$, в намытом же слое 10 и 25-летней залежи этот показатель был выше – 3,3-3,8 и 1,9-4,3 смоль(экв) $кг^{-1}$ соответственно.

Итак, основными статьями расхода магния в почвах являются выщелачивание его из пахотного горизонта фильтрующимися атмосферными осадками, вынос урожаем сельскохозяйственных культур, а также потери магния с поверхностным стоком при развитии эрозионных процессов на склонах. Существенным источником поступления магния в почвы

агроценозов считается внесение не только минеральных, но и органических удобрений, в которых содержание магния может достигать следующих величин (в % Mg на сырое вещество): навоз свиной и крупного рогатого скота – 0,05-0,06, птичий помет – 0,24, торф – 0,08 (Аристархов, 2000). Однако с переходом сельского хозяйства России на нерегулируемые государством рыночные отношения поставка и применение минеральных удобрений сократились в 6-10 раз, использование навоза и компостов на его основе – в 7 раз (Нечаева, Быкова, 2014; Алтухов и др., 2019). Следовательно, высокая подвижность магния в почве, подверженность элемента значительной миграции, заметный вынос с урожаем, крайне слабое использование доломитовой муки и других магнийсодержащих удобрений, навоза, обуславливают необходимость постоянного контроля за магниевым состоянием почв агроценозов.

Цель исследования – провести сравнительную оценку магниевое состояние сильно- и среднегумусированных почв, расположенных на разных гипсометрических уровнях эрозионно опасного склонового агроландшафта, по содержанию в пахотном горизонте валового магния, подвижной (обменной) и водорастворимой форм элемента, а также лабораторно-аналитических методов определения магния в почвах и растениях.

В настоящее время отечественные исследования по изучению магниевое состояние почв агроценозов немногочисленны (Аристархов, 2002; Афанасьев, 2005; Тихомирова и др., 2011; Шеуджен и др., 2015; Якименко, 2019; и др.), в условиях эрозионно опасных склонов – лишь фрагментарно при рассмотрении других агрохимических показателей (Шикула, Ломакин, 1978; Башкин и др., 1991; Чернышев, Иванова, 1993; Танасиенко и др., 2013; Годунова и др., 2013; Дубовик Е., Дубовик Д., 2013; Нечаева и др., 2017; Gopp et al., 2017б; и др.). Данная работа является продолжением многолетних почвенно-агрохимических исследований склоновых агроландшафтов на юге Западной Сибири как по изучению изменения параметров плодородия почв, структуры и качества урожая сельскохозяйственных культур (Якутина и др., 2011; 2018; Нечаева и др., 2019а; 2019б; Yakutina et al., 2015; и др.), так и по оценке пространственной изменчивости свойств почв методами геоморфометрии и цифрового картографирования (Гопп и др., 2016; 2018; 2019; и др.).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводили на территории Предсалаирской дренированной равнины (Предсалаирье) в лесостепной зоне на юго-востоке Западной Сибири, административно относящейся к Тогучинскому району Новосибирской области (НСО). Согласно А.Д. Орлову (1983), район исследования представлен денудационно-аккумулятивным типом рельефа, характеризующимся большой глубиной вреза рек и балок (75-100 м) и существенной протяженностью склонов. Почвы Предсалаирья в правобережной части НСО в наибольшей степени подвержены водной эрозии (Танасиенко, 2003; Хмелев, Танасиенко, 2009).

На исследованном участке пахотного угодья площадью 225 га и протяженностью 4 км условно выделили склоновые позиции на следующих высотных ступенях (ВС, абсолютные отметки высот): верхняя часть склона – ВС_I (280-310 м); средняя – ВС_{II} (260-280 м) и ВС_{III} (220-260 м); нижняя – ВС_{IV} (190-220 м) (рис. 1). На данной территории преобладают оподзоленные и выщелоченные черноземы, темно-серые и серые лесные почвы по классификации почв СССР (1977), которые соответствуют агрочерноземам, агротемно-серым и агросерым почвам по классификации почв России (2004, 2008) (табл. 1). Почвообразующие породы – лессовидные карбонатные суглинки. Отбор индивидуальных почвенных проб (n = 55) провели буром из пахотного горизонта (0-30 см) по нерегулярной сетке. В этих же точках определили запасы надземной фитомассы (ЗНФ) овсяно-гороховой смеси (овес посевной (*Avena sativa*) сорта Ровесник и горох посевной (*Pisum sativum*) сорта Ямальский) методом укусов с учетной площади 0,25 м², отобранной в фазу кущения злакового компонента. Необходимо отметить, что небольшая часть исследованного участка пахотного угодья была занята ячменем, поэтому объем выборки по ЗНФ овсяно-гороховой смеси был меньше и составил n = 38 (табл. 2). Координаты точек отбора почвенных и растительных образцов определили с помощью системы геопозиционирования (GPS, Garmin eTrex Vista), погрешность привязки – 5 м. Почвенную съемку провели в масштабе 1:5000 (Общесоюзная инструкция..., 1973). Следует подчеркнуть, что какие-либо удобрения в почвы агроценоза не вносили, и в целом для данной территории Предсалаирья характерен экстенсивный тип землепользования (без внесения удобрений) в течение последних двух десятилетий с выращиванием в основном яровой пшеницы как монокультуры.

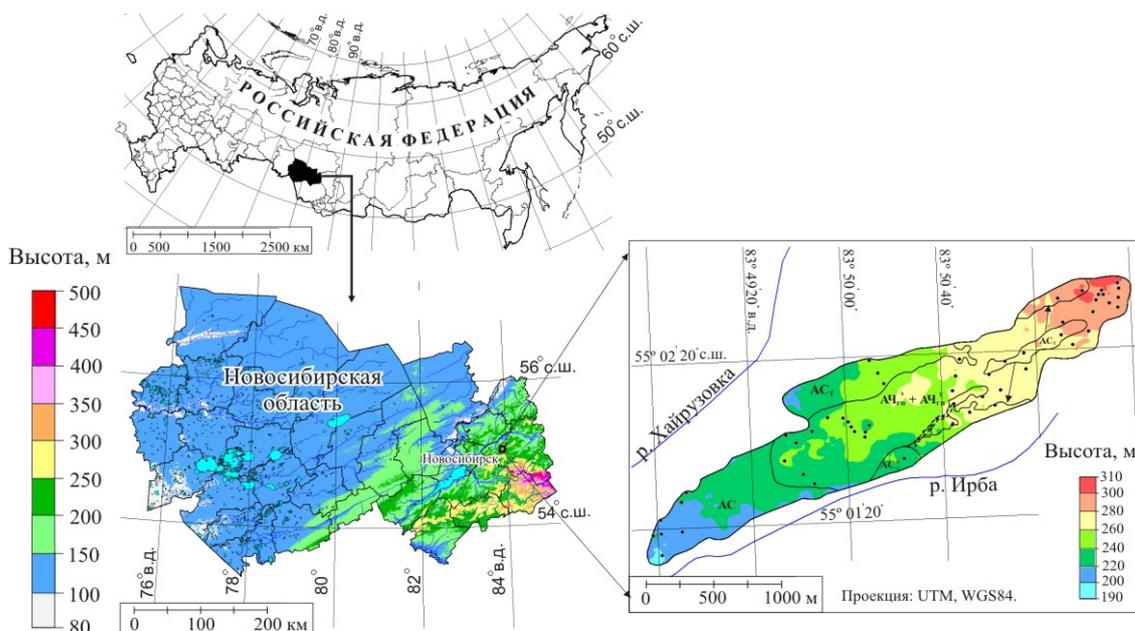


Рисунок 1. Карта территории исследования и схема отбора почвенных проб: сплошной линией показаны контуры почв, расположенные на разных гипсометрических уровнях; пунктирной – ложбина стока; точками – схема отбора почвенных проб. Аббревиатура с обозначением почв – см. табл. 1.

Таблица 1

Преобладающие почвы на территории исследования

Название почв по классификации почв России (2004, 2008)	Формула профиля	Название почв по классификации WRB (2014)
Агрочернозем глинисто-иллювиальный элювиированный насыщенный сильногумусированный тяжелосуглинистый (АЧ _{Ги} ^Э)	PU – AUel – BI – BICca – Cca	Luvic Greyzemic Chernozems (Siltic, Aric, Pachic)
Агрочернозем глинисто-иллювиальный элювиированный насыщенный среднегумусированный тяжелосуглинистый (АЧ _{Ги} ^Э)	PU – AUel – BI – BICca – Cca	Luvic Greyzemic Chernozems (Siltic, Aric, Pachic)
Агрочернозем глинисто-иллювиальный тёмноязыковатый насыщенный среднегумусированный тяжелосуглинистый (АЧ _{Ги} ^Т)	PU – AU – BIyu – BICca – Cca	Haplic Chernozems (Siltic, Aric, Pachic)
Агротемно-серая насыщенная среднегумусированная тяжелосуглинистая (АС _Т)	PU – AUel – BEL – BT – C	Luvic Greyzemic Phaeozems (Siltic, Aric)
Агросерая ненасыщенная среднегумусированная тяжелосуглинистая (АС)	P – AEL – BEL – BT – C	Luvic Retic Greyzemic Phaeozems (Siltic, Aric)

Содержание органического углерода в почвах с пересчетом на гумус определили методом бихроматного окисления по Тюрину; pH водной суспензии (pH_{вод}) – потенциметрическим методом при соотношении почва : раствор (H₂O_{дист}) равным 1:2,5; гранулометрический состав – пирофосфатным методом по Качинскому (Агрохимические методы..., 1975; Практикум..., 2001). Определение содержания валового магния (Mg_{вал}) в почвах выполнили в сухих порошкообразных образцах методом атомно-эмиссионной спектроскопии, подвижной (обменной) формы магния – методом атомно-абсорбционной спектроскопии с использованием нескольких экстрагирующих растворов: Mg_{ПФ1} – 1 М KCl при соотношении почва : раствор равным 1:2,5 (ГОСТ 26487-85); Mg_{ПФ2} – 1 М CH₃COONH₄ (pH = 7,0) при соотношении 1:10 (по Масловой); Mg_{ПФ3} – 0,1 М C₄H₄O₅(NH₄)₂ при соотношении 1:20 (по Николову); Mg_{ПФ4} – 0,5 М CH₃COOH при соотношении 1:25 (по Чирикову). По методу Масловой в почвенных вытяжках с 1 М CH₃COONH₄ также определили содержание обменных кальция и калия. Содержание водорастворимого магния определили при соотношении почва : раствор (H₂O_{дист}) равным 1:5 двумя методами (из одной и той же вытяжки): Mg_{вод1} – атомно-абсорбционной спектроскопии; Mg_{вод2} – капиллярного электрофореза. Определение содержания валового магния в растениях (Mg_{раст}) выполнили методом атомно-абсорбционной спектроскопии с применением двух способов пробоподготовки:

$Mg_{\text{раст1}}$ – мокрым озолением образцов в смеси серной и хлорной кислот (Практикум..., 2001); $Mg_{\text{раст2}}$ – сухим озолением образцов в течение 4 ч при 500°C и количественным переносом с 1 M HCl (Handbook..., 1998). Содержание магния в почвах и растениях представили на элемент и рассчитали на воздушно-сухую массу. Согласно Международной системе единиц (SI, СИ), содержание магния в почвах выразили в «смоль(экв)·кг⁻¹», что равнозначно «ммоль(экв)·100 г⁻¹» или «мг-экв·100 г⁻¹», однако использование последнего в настоящее время не допустимо (Воробьева и др., 2012).

Статистическую обработку данных провели в пакетах Microsoft Office Excel 2007 и Statistica v.6.1. В таблицах привели такие статистические параметры, как среднее арифметическое и стандартное отклонение ($M \pm s$), диапазон значений (min – max), объем выборки (n), а также коэффициенты корреляции Спирмена и Пирсона. Оценку значимости различий между изученными параметрами почв и растительности провели с использованием t-критерия Стьюдента и U-критерия Манна-Уитни.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При изучении параметров плодородия почв Предсалаирья (см. табл. 2) с учетом их группировки по содержанию гумуса (Классификация..., 2004) установлено, что агрочерноземы в верхней части склона на высотах 280-310 м (BC_I) относятся к сильногумусированным (5-8%), тогда как агрочерноземы, агротемно-серые и агросерые почвы в средней и нижней частях склона на высотах 190-280 м (BC_{II-IV}) – к среднегумусированным (3-5%). Вниз по склону выявлено снижение содержания в почвах гумуса в 1,5-2,0 раза, что в свою очередь может способствовать ухудшению структуры, снижению поглотительной и водоудерживающей способности почв (Явтушенко, Макаров, 1996; Каштанов, Явтушенко, 1997; Жилко и др., 1999; Танасиенко, 2003; Хмелев, Танасиенко, 2009; и др.). Почвы характеризовались слабокислой (5,1-5,5) и близкой к нейтральной (5,6-6,0) реакцией среды, что создает благоприятные условия для роста и развития большинства сельскохозяйственных культур и жизнедеятельности почвенной микрофлоры.

Наибольшее содержание обменных кальция и калия отмечено в сильногумусированных почвах в верхней части склона (BC_I). В среднегумусированных почвах вниз по склону содержание данных элементов было ниже, особенно в средней части на BC_{II-III} (в 1,2-1,3 раза). Содержание физической глины в почвах склона варьировало в широком диапазоне – от 40 до 60%, в целом же почвы характеризовались тяжелосуглинистым гранулометрическим составом с облегчением в средней части склона (BC_{II-III}) за счет существенного снижения количества мелкой пыли (см. табл. 2). Распределение фракций физической глины было неравномерным, что связано, по-видимому, с избирательным выносом почвенного материала при стоке талых и ливневых вод. Так, в среднегумусированных почвах вниз по склону установлено уменьшение содержания средне- и мелкопылеватых частиц и увеличение доли илистой фракции. Перераспределение и селективный вынос почвенных частиц, обладающих высокой поглотительной способностью и обогащенных элементами питания, отмечены в работах многих исследователей на эрозионно опасных склонах (Чернышев, Иванова, 1993; Жилко и др., 1999; Дубовик Е., Дубовик Д., 2013; Танасиенко и др., 2013; Губина, 2016; Савельева, 2016; Gabbasova et al., 2016; и др.).

Основным источником магния для растений является почва. В сильногумусированных агрочерноземах в верхней части склона (BC_I) среднее валовое содержание магния составило 0,81%, что сопоставимо с литературными данными. Например, среднее валовое содержание магния в различных типах почв России следующее (в % на сухое вещество): в подзолистых – 0,5, лесостепных – 0,7, в черноземах – 0,9, в сероземах – 1,45 (Панников, Минеев, 1977; Аристархов, 2000). Кубанские черноземы содержат 0,8-1,1% валового магния (Шеуджен и др., 2015), черноземы Сербии – в среднем 0,67% (Jakovljević et al., 2003). В среднегумусированных почвах Предсалаирья вниз по склону (BC_{II-IV}) отмечено постепенное снижение содержания валового магния в ряду агрочерноземы (0,88%) → агротемно-серые (0,83%) → агросерые (0,79%), и подобная закономерность установлена нами ранее по содержанию в почвах валовых фосфора и калия (Нечаева и др., 2019а; 2019б). Однако валовое содержание магния является лишь одним из показателей, характеризующих потенциальное плодородие почв, тогда как основным источником питания для растений считается магний, находящийся в почвенном поглощающем комплексе (подвижный, обменный) и в почвенном растворе (водорастворимый, легкообменный) (Мазаева, 1967; Годунова и др., 2013; Якименко, 2018; и др.).

Таблица 2

Свойства почв и параметры растительности в условиях склонового агроландшафта

Показатели	Высотные ступени (ВС) и почвы			
	BC _I (280-310 м)	BC _{II} (260-280 м)	BC _{III} (220-260 м)	BC _{IV} (190-220 м)
	AЧ _{ГИ} ^Э (n = 16)	AЧ _{ГИ} ^Э +AЧ _{ГИ} ^Т (n = 14)	АС _Т (n = 13)	АС (n = 12)
Параметры почвенного плодородия				
Гумус, %	<u>7,37 ± 1,49</u> 3,67 – 9,14	<u>5,02 ± 1,18*</u> 3,50 – 6,81	<u>3,66 ± 0,69*</u> 2,48 – 5,00	<u>3,60 ± 0,94*</u> 1,98 – 5,28
pH _{вод}	<u>5,84 ± 0,18</u> 5,55 – 6,16	<u>5,72 ± 0,14**</u> 5,46 – 5,95	<u>5,73 ± 0,16</u> 5,40 – 5,96	<u>5,83 ± 0,17</u> 5,47 – 6,09
Ca ²⁺ , смоль(экв)·кг ⁻¹ (1 М CH ₃ COONH ₄)	<u>20,5 ± 2,8</u> 13,7 – 23,9	<u>16,8 ± 2,7*</u> 12,3 – 21,7	<u>15,5 ± 2,4*</u> 12,7 – 20,9	<u>17,7 ± 3,1*</u> 13,2 – 21,1
K ⁺ , смоль(экв)·кг ⁻¹ (1 М CH ₃ COONH ₄)	<u>0,51 ± 0,07</u> 0,40 – 0,60	<u>0,40 ± 0,05*</u> 0,32 – 0,52	<u>0,41 ± 0,09*</u> 0,33 – 0,70	<u>0,48 ± 0,12</u> 0,35 – 0,72
Фракции физической глины, %				
Пыль средняя	<u>12,4 ± 1,3</u> 9,2 – 14,8	<u>13,5 ± 1,9</u> 10,2 – 16,4	<u>10,9 ± 1,1*</u> 8,8 – 12,6	<u>11,3 ± 1,3**</u> 9,1 – 14,2
Пыль мелкая	<u>20,8 ± 1,7</u> 17,6 – 22,8	<u>16,5 ± 1,5*</u> 13,8 – 19,2	<u>15,8 ± 1,5*</u> 12,6 – 17,9	<u>15,5 ± 1,6*</u> 13,0 – 19,2
Ил	<u>16,7 ± 3,8</u> 11,9 – 25,5	<u>15,4 ± 3,0</u> 11,6 – 20,6	<u>17,6 ± 3,0</u> 10,4 – 20,5	<u>22,7 ± 4,4*</u> 18,1 – 33,5
Физическая глина	<u>49,9 ± 3,0</u> 44,2 – 57,0	<u>45,4 ± 3,0*</u> 41,0 – 51,7	<u>44,3 ± 1,9*</u> 40,1 – 46,5	<u>49,5 ± 3,9</u> 46,2 – 59,9
Магниевое состояние почв, включая содержание валового магния (Mg _{вал}), подвижной (Mg _{пф1-4}) и водорастворимой (Mg _{вод1-2}) форм элемента, смоль(экв) Mg ²⁺ ·кг ⁻¹ воздушно-сухой массы				
Mg _{вал}	<u>67 ± 12</u> 49 – 99	<u>73 ± 15</u> 39 – 95	<u>68 ± 10</u> 55 – 90	<u>65 ± 9</u> 51 – 79
Mg _{пф1} (1 М KCl)	<u>3,2 ± 0,6</u> 3,2 – 4,5	<u>2,5 ± 0,3*</u> 2,0 – 2,9	<u>2,2 ± 0,3*</u> 1,4 – 2,5	<u>2,4 ± 0,2*</u> 2,0 – 2,7
Mg _{пф2} (1 М CH ₃ COONH ₄)	<u>4,0 ± 0,4</u> 3,0 – 4,8	<u>2,8 ± 0,4*</u> 2,1 – 3,5	<u>2,6 ± 0,4*</u> 1,7 – 3,3	<u>2,9 ± 0,3*</u> 2,6 – 3,5
Mg _{пф3} (0,1 М C ₄ H ₄ O ₅ (NH ₄) ₂)	<u>3,6 ± 0,5</u> 2,6 – 4,4	<u>3,1 ± 0,4**</u> 2,6 – 4,1	<u>2,8 ± 0,6*</u> 1,6 – 3,8	<u>3,1 ± 0,4**</u> 2,6 – 4,1
Mg _{пф4} (0,5 М CH ₃ COOH)	<u>3,8 ± 0,5</u> 2,8 – 4,4	<u>3,2 ± 0,4*</u> 2,8 – 3,7	<u>3,0 ± 0,7*</u> 1,7 – 3,7	<u>3,1 ± 0,4*</u> 2,4 – 3,7
Mg _{вод1} (атомно-абсорб. спектрометрия)	<u>0,08 ± 0,01</u> 0,05 – 0,10	<u>0,08 ± 0,02</u> 0,06 – 0,12	<u>0,06 ± 0,01*</u> 0,05 – 0,07	<u>0,07 ± 0,02</u> 0,05 – 0,10
Mg _{вод2} (капиллярный электрофорез)	<u>0,09 ± 0,02</u> 0,05 – 0,15	<u>0,07 ± 0,01**</u> 0,05 – 0,10	<u>0,04 ± 0,01*</u> 0,02 – 0,06	<u>0,08 ± 0,05</u> 0,03 – 0,19
Ca/Mg (молярное) (1 М CH ₃ COONH ₄)	<u>5,1 ± 0,7</u> 3,4 – 6,5	<u>6,0 ± 0,8*</u> 4,8 – 7,9	<u>6,0 ± 1,2**</u> 4,7 – 8,5	<u>6,2 ± 1,0*</u> 4,8 – 7,7
K/Mg (молярное) (1 М CH ₃ COONH ₄)	<u>0,13 ± 0,02</u> 0,10 – 0,16	<u>0,15 ± 0,02**</u> 0,11 – 0,20	<u>0,16 ± 0,05**</u> 0,12 – 0,27	<u>0,17 ± 0,04*</u> 0,12 – 0,24
Запасы надземной фитомассы (ЗНФ) и содержание магния в растениях, % Mg на воздушно-сухую массу				
ЗНФ, г·м ⁻² (овсяно-гороховая смесь) (n = 16)	<u>134 ± 29</u> 78 – 190	<u>144 ± 32</u> 102 – 210	<u>172 ± 37</u> 143 – 214	<u>143 ± 29</u> 92 – 165
Mg _{раст1} , % (мокрое озоление)	<u>0,19 ± 0,04</u> 0,14 – 0,27	<u>0,18 ± 0,03</u> 0,14 – 0,24	<u>0,17 ± 0,05</u> 0,14 – 0,22	<u>0,14 ± 0,02**</u> 0,12 – 0,17
Mg _{раст2} , % (сухое озоление)	<u>0,25 ± 0,05</u> 0,19 – 0,34	<u>0,23 ± 0,03</u> 0,17 – 0,28	<u>0,26 ± 0,06</u> 0,23 – 0,34	<u>0,21 ± 0,02**</u> 0,19 – 0,23

Примечание.

Над чертой указаны среднеарифметическое и стандартное отклонение (M ± s), под чертой – диапазон значений (min – max), n – объем выборки. * – показатели, статистически значимо отличающиеся от таковых на BC_I при p < 0,01; ** – отличия значимы при p < 0,05. Обозначения почв – см. табл. 1.

Обращает на себя внимание тот факт, что в почвенно-агрохимических исследованиях нет общепринятой терминологии относительно форм соединений химических элементов, как синонимы используют «подвижный», «обменный», «доступный», «усвояемый» и другие. Для вытеснения обменных катионов из почвенного поглощающего комплекса чаще всего используют растворы хлористого аммония, натрия или калия, а также раствор уксуснокислого аммония. Наиболее мягким вытеснителем считается уксуснокислый аммоний, так как при его взаимодействии с не насыщенными основаниями почвами образуется уксусная кислота, относящаяся к слабым кислотам и не оказывающая сильного разрушающего воздействия на почву. В случае использования в качестве вытеснителей хлоридов калия, натрия или аммония образуется соляная кислота, относящаяся к разряду сильных кислот и способная переводить в раствор необменные формы катионов и значительные количества полуторных окислов (Практикум..., 2001). В России стандартным является метод ЦИНАО для определения содержания обменного (подвижного) магния в почвах (ГОСТ 26487-85) с использованием в качестве экстрагирующего раствора 1 н. KCl (что равнозначно 1 М KCl). При решении вопроса о применении магниевых и магниесодержащих удобрений М.М. Мазаева (1967, 1977) также считала необходимым использовать вытяжку с 1 н. KCl при соотношении почва : раствор равным 1:2,5 для определения легкоподвижного магния. В почвах Предсалаирья, помимо определения магния в вытяжке с 1 М KCl, были использованы и другие экстрагенты (1 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$, 0,1 М $\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_5(\text{NH}_4)_2$, 0,5 М CH_3COOH) с возможностью одновременного определения (в одной и той же вытяжке) других элементов минерального питания (например, подвижные формы фосфора, калия и кальция). Исходя из химического состава экстрагентов, можно предположить, что на соединения почвенного магния должны действовать такие механизмы как катионный обмен (в первую очередь) и растворение магниесодержащих минералов, а также возможен гидролиз органических соединений в условиях кислой реакции среды (Орлов, 1992). Поэтому содержание магния в почвах с использованием четырех вышеперечисленных экстрагирующих растворов обозначали как подвижный (обменный) магний.

Доля подвижного магния от валового содержания элемента в почвах Предсалаирья составила 3,3-6,0%. Среднее содержание подвижного магния в сильногумусированных почвах в верхней части склона (BC_I) варьировало от 3,2 до 4,0 смоль(экв)·кг⁻¹ в зависимости от экстрагента, в среднегумусированных почвах вниз по склону (BC_{II-IV}) этот показатель был существенно ниже (см. табл. 2). При этом наиболее чувствительными среди четырех экстрагентов к снижению содержания подвижного магния в среднегумусированных почвах оказались 1 М растворы $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ и KCl. Между используемыми вытяжками по определению подвижного магния установлены тесные положительные корреляции заметной и высокой силы связи (табл. 3), однако наиболее тесная связь выявлена между 1 М KCl и 1 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ ($r = 0,87$ при $p < 0,01$ и $n = 55$).

Большее количество подвижного магния в сильногумусированных почвах в верхней части склона вероятно обусловлено более высоким содержанием гумусовых кислот, усиливающих химическое выветривание магниесодержащих минералов. В тоже время снижение содержания подвижного магния в среднегумусированных почвах в средней и нижней частях склона может быть связано с миграцией элемента с поверхностным стоком в составе почвенных растворов, фракций физической глины и почвенного органического вещества (Шикула, Ломакин, 1978; Каштанов, Явтушенко, 1997; Нечаева и др., 2017; Gopp et al., 2017b). Так, в исследованиях на агросерой почве склона в лесостепи Западной Сибири (Gopp et al., 2017a) морфометрические величины рельефа, описывающие геометрические формы и поверхностный сток, объяснили 40% вариации содержания магния. Положительные корреляции от умеренной до высокой силы связи подвижного магния в почвах склона с гумусом, физической глиной, фракцией мелкой пыли подтверждают выше сказанное (см. табл. 3).

Если сравнить полученные нами результаты по содержанию в почвах подвижного (обменного) магния, экстрагируемого 1 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ ($\text{Mg}_{\text{пф2}}$), с литературными данными по почвам агроценозов в лесостепи Западной Сибири, то, несмотря на длительное экстенсивное землепользование (без внесения удобрений), почвы в условиях склонового агроландшафта относительно богаты элементом. Например, в длительном полевом опыте на серой лесной среднесуглинистой почве в Искитимском районе НСО (Якименко, 2019), содержание обменного магния в целинном участке варьировало от 1,18 (0-20 см) до 2,36 смоль(экв) Mg²⁺·кг⁻¹ (80-100 см); в варианте без удобрений в течение 29 лет опыта этот показатель снизился до 1,01 смоль(экв)·кг⁻¹ в слое 0-20 см. В пахотном горизонте (0-25 см) агросерой среднесуглинистой почвы в

Новосибирском районе НСО (Gopp et al., 2017a) содержание обменного магния в элювиальной части склона составило в среднем 1,5, в транзитной – 1,2 смоль(экв)·кг⁻¹. Для сравнения в слое 0-30 см агросерой тяжелосуглинистой почвы в нижней части склона содержание Mg_{пф2} варьировало от 2,6 до 3,5 смоль(экв)·кг⁻¹ (см. табл. 2).

В ряде российских и зарубежных научных работ, выполненных в разных почвенно-климатических условиях, предложены различные уровни и градации обеспеченности почв доступным для растений магнием с учетом используемых экстрагентов, гранулометрического состава почв, вида выращиваемых культур (Мазаева, 1967; Норкина и др., 1988; Аристархов, 2000; Тихомирова и др., 2011; Таврыкина и др., 2013; Zebire et al., 2019; и др.). В настоящее время для агрохимической службы России в ЦИНАО разработаны и предложены к использованию следующие показатели: (1) группировка по содержанию в почвах обменного магния с учетом их гранулометрического состава и методов химического определения элемента; (2) оптимальные уровни содержания обменного магния в почвах для основных сельскохозяйственных культур. Например, для тяжелосуглинистых и глинистых почв предложены следующие градации (Аристархов, 2002) по содержанию обменного магния, экстрагируемого 1 М KCl (мг-экв Mg²⁺·100 г⁻¹, что равнозначно смоль(экв)·кг⁻¹): очень низкое – <0,50; низкое – 0,51-1,00; среднее – 1,01-2,00; повышенное – 2,10-3,00; высокое – 3,10-4,00; очень высокое – >4,00. Оптимальное содержание обменного магния для зерновых культур на тяжелосуглинистых и глинистых почвах составляет 0,45-0,60, для зернобобовых культур – 0,60-0,70 мг-экв Mg²⁺·100 г⁻¹. В соответствии с данной градацией тяжелосуглинистые почвы Предсалаирья в верхней части склона с варьированием содержания подвижного магния, экстрагируемого 1 М KCl (Mg_{пф1}), от 3,2 до 4,5 смоль(экв)·кг⁻¹ относятся к высоко и очень высоко обеспеченным магнием; почвы в средней и нижней частях склона с содержанием Mg_{пф1} от 1,4 до 2,9 смоль(экв)·кг⁻¹ – к среднему и повышенному уровню обеспеченности. Наши результаты подтверждают литературные данные (Аристархов, 2002) о том, что по содержанию подвижного магния большинство пахотных почв Западно-Сибирского экономического района России (около 80%) характеризуются как повышено обеспеченные данным макроэлементом (>2,0 смоль(экв)·кг⁻¹).

Поступление магния в растение зависит от концентрации сопутствующих катионов в почвенном растворе. Известно, что между кальцием и магнием, калием и магнием имеет место антагонизм. Например, при внесении в повышенных дозах калийных удобрений задерживается поступление магния (Норкина и др., 1988; Воеводина, Воеводин, 2015). При этом калий снижает не только общее количество магния в растении, но, что особо важно, содержание магния хлорофилла. Поэтому представляется важным при оценке магниевое состояние почв агроценозов рассматривать не только количественные, но и качественные показатели, такие как соотношение Ca/Mg и K/Mg. Наиболее оптимальные условия магниевое питания растений в пахотных почвах складываются при соотношении Ca/Mg в диапазоне от 1:1 до 5:1, K/Mg – 0,5:1 и 1:1 (Таврыкина и др., 2013; Михайловская и др., 2015; Богдевич и др., 2014; Jakovljević et al., 2003; и др.). На кислых почвах соотношение K/Mg может составлять 2:1, вследствие чего снижается доступность магния растениям. Соотношение Ca/Mg в сильногумусированных почвах в верхней части склона составило в среднем 5:1, в среднегумусированных почвах в средней и нижней частях склона – 6:1 за счет снижения содержания подвижного магния, экстрагируемого 1 М CH₃COONH₄ (см. табл. 2). Если соотношение Ca/Mg в почвах склона в целом было близко к оптимальным значениям, то соотношение K/Mg – очень широким (от 1:6 до 1:8) из-за низкого содержания обменного калия, что подтверждается результатами по изучению калийного состояния почв склонового агроландшафта (Нечаева и др., 2019а).

Доля водорастворимого магния от валового содержания элемента в почвах склона была незначительной и варьировала в среднем от 0,06 до 0,13%. Наибольшее содержание как подвижного, так и водорастворимого магния установлено в сильногумусированных агрочерноземах в верхней части склона. Результаты по содержанию водорастворимого магния в почвах, полученные методами атомно-абсорбционной спектроскопии и капиллярного электрофореза (из одной и той же вытяжки) очень близки (см. табл. 2). Однако более чувствительным к снижению содержания водорастворимого магния в среднегумусированных агрочерноземах и агротемно-серых почвах (в 1,3 и 2,2 раза) в средней части склона (BC_{II-III}) по сравнению с сильногумусированными почвами в верхней части склона (BC_I) оказался метод капиллярного электрофореза.

Таблица 3

Коэффициенты корреляции Спирмена и Пирсона (выделены серым цветом) между параметрами почв и растительности

Параметры	Mg _{общ}	Mg _{ПФ1}	Mg _{ПФ2}	Mg _{ПФ3}	Mg _{ПФ4}	Mg _{вод1}	Mg _{вод2}	Mg _{раст1}	Mg _{раст2}	Гумус	pH _{вод}	Физ. глина	Пыль средняя	Пыль мелкая	Ил	ЗНФ
Mg _{общ}	–															
Mg _{ПФ1} (1 М КСl)	x	–														
Mg _{ПФ2} (1 М CH ₃ COONH ₄)	x	0,87	–													
Mg _{ПФ3} (0,1 М C ₄ H ₄ O ₅ (NH ₄) ₂)	x	0,69	0,66	–												
Mg _{ПФ4} (0,5 М CH ₃ COOH)	x	0,77	0,73	0,53	–											
Mg _{вод1} (атомно-абсорб. спектрометрия)	x	0,38	0,37	x	0,30	–										
Mg _{вод2} (капиллярный электрофорез)	x	0,57	0,56	0,49	0,44	0,45	–									
Mg _{раст1} (мокрое озоление)	x	0,30	0,36	x	x	x	x	–								
Mg _{раст2} (сухое озоление)	x	0,39	0,39	x	x	x	x	0,67	–							
Гумус	x	0,81	0,74	0,46	0,70	0,42	0,54	0,38	0,39	–						
pH _{вод}	x	0,40	0,43	0,46	0,28	x	x	x	x	x	–					
Физ. глина	x	0,52	0,58	0,53	0,31	x	0,45	x	x	x	0,53	–				
Пыль средняя	x	x	x	x	x	x	x	0,34	x	0,43	x	x	–			
Пыль мелкая	x	0,76	0,68	0,45	0,57	0,31	0,42	x	0,36	0,78	x	0,39	x	–		
Ил	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-0,53	0,37	0,52	-0,58	-0,40	–	
Запасы надземной фитомассы (ЗНФ)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	–

Примечание.

Жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции заметной и высокой силы связи и рассчитаны с $p < 0,01$; без выделения – умеренной силы связи и рассчитаны с $p < 0,05$; крестиком – статистически незначимы

Содержание водорастворимого магния в исследованных нами тяжелосуглинистых почвах склона и легкообменного магния (экстрагируемого 0,0025 М CaCl₂) в среднесуглинистой почве полевого опыта (Якименко, 2019) имело довольно близкие величины, несмотря на значительные различия по содержанию подвижного магния, экстрагируемого 1 М CH₃COONH₄. Так, в серой лесной почве целинного участка содержание легкообменного магния варьировало от 0,10 (0-20 см) до 0,16 смоль(экв)·кг⁻¹ (80-100 см); в вариантах без удобрений (контроль) и с внесением NP и NPK-удобрений данный показатель значительно снизился в слое 0-40 см – до 0,05-0,07 смоль(экв)·кг⁻¹. В пахотном горизонте тяжелосуглинистых почв Предсалаирья содержание водорастворимого магния менялось в широком диапазоне (от 0,02 до 0,19 смоль(экв)·кг⁻¹) с наибольшими средними величинами в сильногумусированных агрочерноземах (0,08-0,09 смоль(экв)·кг⁻¹) в верхней части склона на ВС₁ (см. табл. 2).

Инвентаризация почв склонового агроландшафта по магниевому состоянию с составлением цифровых карт содержания валового магния, подвижной (обменной) и водорастворимой форм элемента (рис. 2) позволила более наглядно определить географическое расположение почв с различной обеспеченностью культур магнием и выявить почвенные ареалы, в которых необходим более пристальный контроль за уровнем магниевого питания растений.

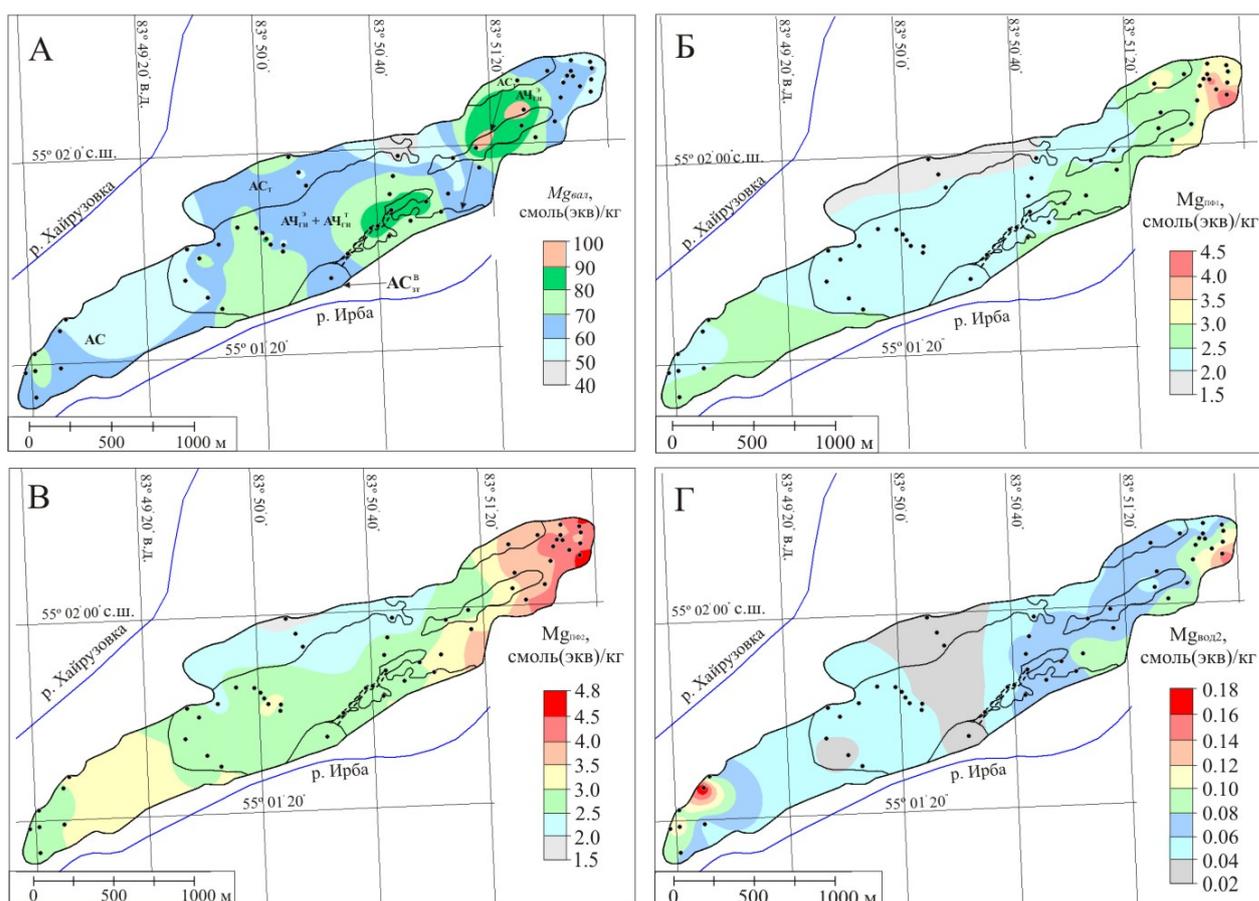


Рисунок 2. Магниевое состояние почв склонового агроландшафта.

Содержание магния: А – валового ($Mg_{вал}$), Б и В – подвижного ($Mg_{пф1}$ в вытяжке с 1 М KCl и $Mg_{пф2}$ – с 1 М CH₃COONH₄), Г – водорастворимого ($Mg_{вод2}$).

Условные обозначения: сплошной линией показаны контуры почв; пунктирной – ложбина стока; точками – схема отбора почвенных проб. Аббревиатура с обозначением почв – см. табл. 1.

Существенных различий в запасах надземной фитомассы овсяно-гороховой смеси, произрастающей на сильно- и среднегумусированных почвах, не выявлено (см. табл. 2). Известно, что содержание магния в растениях зависит от многих факторов: от вида, фазы развития и физиологического состояния растений, условий питания. Например, зерновые культуры потребляют мало магния, но очень чувствительны к его недостатку, особенно в ранний период их

развития (Аристархов, 2000). Содержание магния в растениях менее 0,20% считается проявлением дефицита, 0,25-1,00% – достаточным (оптимальным), более 1,50% – высоким или даже токсичным (Handbook..., 1998). Однако магний относится к наименее токсичным элементам в условиях их избытка (Ильин, Гармаш, 1985). От недостатка магния страдают, прежде всего, бобовые, картофель, ряд овощных культур. Характерным признаком магниевое голодания растений является пожелтение листьев, заметное в первую очередь в нижних, более старых листьях, а также ломкость, морщинистость или скручивание листьев, замедление роста, запаздывание фаз развития растений (Мазаева, 1967, 1977; Афанасьев, 2005; Тихомирова, 2011; Tanol, Kobayashi, 2015). Содержание магния в надземной фитомассе овсяно-гороховой смеси, отобранной в фазу кушения злакового компонента, с пробоподготовкой сухим озолением образцов в 1,3-1,6 раза выше, чем мокрым озолением (см. табл. 2). Однако как при сухом, так и мокрым озолении образцов содержание магния в растениях на среднегумусированных агросерых почвах было существенно ниже, чем в сильногумусированных агрочерноземах. Это может быть связано, на наш взгляд, со снижением поглощения магния растениями, произрастающих на почвах с более низкой влажностью (13,4%) в нижней части по сравнению с почвами в верхней (22,2%) и средней (16,7-18,2%) частями склона. Установлены положительные корреляции умеренной силы связи между содержанием магния в растениях и подвижного магния в почвах, экстрагируемого 1 М КСl и 1 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (см. табл. 3). В целом содержание магния в травосмеси соответствовало оптимальному уровню при использовании метода сухого озоления.

ВЫВОДЫ

1. В условиях склонового агроландшафта Предсалаирья на юго-востоке Западной Сибири сильногумусированные почвы (5-8% гумуса, агрочерноземы) в верхней части склона лучше обеспечены подвижным магнием, чем среднегумусированные почвы (3-5%, агрочерноземы, агротемно-серые и агросерые) в средней и нижней частях склона. Среднее содержание подвижного магния в сильногумусированных почвах варьировало от 3,2 до 4,0 смоль(экв)·кг⁻¹ в зависимости от экстрагента, в среднегумусированных почвах – от 2,2 до 3,2 смоль(экв)·кг⁻¹.

2. Результаты по содержанию водорастворимого магния в почвах склона, полученные методами атомно-абсорбционной спектроскопии и капиллярного электрофореза (из одной и той же вытяжки) очень близки: в среднем 0,06-0,08 и 0,04-0,09 смоль(экв)·кг⁻¹. Однако более чувствительным к снижению содержания водорастворимого магния в среднегумусированных почвах в средней части склона по сравнению с сильногумусированными почвами в верхней части был метод капиллярного электрофореза.

3. Среднее валовое содержание магния в почвах склона варьировало от 0,79 до 0,88%. Доля подвижного магния от валового содержания элемента в почвах составила в среднем 3,3-6,0%, водорастворимого магния – 0,06-0,13%. В среднегумусированных почвах вниз по склону установлено постепенное снижение содержания валового магния в ряду агрочерноземы → агротемно-серые → агросерые, и подобная закономерность выявлена нами ранее по содержанию в почвах валовых фосфора и калия.

4. Существенных различий в запасах надземной фитомассы овсяно-гороховой смеси, произрастающей на сильно- и среднегумусированных почвах, не выявлено. Содержание магния в травосмеси, определенное методом сухого озоления составило в среднем 0,21-0,26% и соответствовало оптимальному уровню, мокрым озолением – было ниже в 1,3-1,6 раза.

5. Между содержанием подвижного (обменного) магния в почвах, определенного с использованием различных экстрагентов (1 М КСl, 1 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$, 0,1 М $\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_5(\text{NH}_4)_2$, 0,5 М CH_3COOH), установлены положительные корреляции, однако наиболее тесная связь выявлена с количеством магния в 1 М КСl и 1 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ ($r = 0,87$ при $p < 0,01$ и $n = 55$). Последние два экстрагента оказались наиболее чувствительными к снижению содержания подвижного магния, а также выявлены положительные корреляции между количеством магния в почвах, экстрагируемого 1 М КСl и 1 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$, и содержанием магния в растениях. Поэтому для оценки магниевое состояние почв Предсалаирья целесообразнее использовать 1 М КСl или 1 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ с возможностью одновременного определения в одной и той же почвенной вытяжке других показателей (обменные кальций и калий, рН солевой и т.д.) в зависимости от экстрагента.

6. В соответствии с грациями по содержанию в почвах подвижного (обменного) магния, экстрагируемого 1 М КСl, разработанными в ЦИНАО для агрохимслужбы России, сильногумусированные тяжелосуглинистые почвы Предсалаирья в верхней части склона с

варьированием содержания магния от 3,2 до 4,5 смоль(экв)·кг⁻¹ относятся к высоко и очень высоко обеспеченным; среднегумусированные почвы в средней и нижней частях склона с содержанием магния от 1,4 до 2,9 смоль(экв)·кг⁻¹ – к среднему и повышенному уровню обеспеченности. Наши результаты подтверждают литературные данные о том, что по содержанию подвижного магния большинство пахотных почв Западно-Сибирского экономического района России (около 80%) характеризуются как повышено обеспеченные (>2,0 смоль(экв)·кг⁻¹).

ФИНАСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена по государственному заданию ИПА СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Бугровской Г.А., Галузо Н.А., Кривчун А.Ю., Смоленцеву Н.Б., Черепахиной Л.Д. за помощь в проведении лабораторно-аналитических работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Агрохимические методы исследования почв*. М.: Наука, 1975. 656 с.
2. Алтухов А.И., Сычев В.Г., Винничек Л.Б. Развитие производства и рынка минеральных удобрений // *Плодородие*. 2019. № 3. С. 6-9. doi: [10/25680/S19948603.2019.108.02](https://doi.org/10/25680/S19948603.2019.108.02)
3. Аристархов А.Н. *Оптимизация питания растений и применения удобрений в агроэкосистемах* / Под редакцией академика РАСХН В.Г. Минеева. М.: ЦИНАО, 2000. 524 с.
4. Аристархов А.Н. Агрохимическое обоснование применения магниевых удобрений // *Плодородие*. 2002. № 2(5). С. 15-17.
5. Афанасьев Р.А. Магний в системе почва – растение – животное // *Плодородие*. 2005. № 5(26). С. 19-21.
6. Башкин В.Н., Лучицкая О.А., Козлов М.Я., Волошина О.Н. Дифференциация почв и содержание в них подвижных форм некоторых биофильных элементов в связи с рельефом // *Почвоведение*. 1991. № 12. С. 15-23.
7. Безуглов В.Г., Гогмачадзе Г.Д., Синиговец М.Е. Состояние с эрозией почв в России // *АгроЭкоИнфо*. 2008. № 1 (2).
8. Богдевич И.М., Ломонос О.Л., Таврыкина О.М. Динамика степени кислотности, обеспеченности кальцием и магнием пахотных и луговых почв Беларуси в результате известкования // *Почвоведение и агрохимия*. 2014. № 1(52). С. 159-172.
9. Воробьева Л.А., Ладонин Д.В., Лопухина О.В., Рудакова Т.А., Кирюшин А.В. *Химический анализ почв. Вопросы и ответы*. М. 2012. 186 с.
10. Воеводица Л.А., Воеводин О.В. Магний для почвы и растений // *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации*, 2015. № 2 (18). С. 70-81.
11. ГОСТ 26487-85. Почвы. Определение обменного кальция и обменного (подвижного) магния методами ЦИНАО. Москва: Издательство стандартов, 1985.
12. Годунова Е.И., Чижикова Н.П., Шкабарда С.Н. Природные запасы магния в почвах Ставропольской возвышенности при разном уровне агрогенного воздействия в агроландшафте // *Достижения науки и техники АПК*. 2013. № 4. С. 9-11.
13. Гопп Н.В., Нечаева Т.В., Савенков О.А., Смирнова Н.В., Смирнов В.В. Применение цифровой модели высот (ASTERGDEM, 30 м) для оценки пространственной изменчивости содержания основных макроэлементов в агросерой почве склона // *Агрохимия*. 2016. № 4. С. 46-54.
14. Гопп Н.В., Нечаева Т.В., Савенков О.А., Смирнова Н.В., Смирнов В.В., Смирнов А.В. Цифровое картографирование степени окультуренности пахотных почв Предсалаирской дренированной равнины // *Почвы и окружающая среда*. 2018. № 1(1). С. 32-44. doi: [10.31251/pos.v1i1.7](https://doi.org/10.31251/pos.v1i1.7)
15. Гопп Н.В., Савенков О.А., Нечаева Т.В., Смирнова Н.В., Смирнов А.В. Использование NDVI в цифровом картографировании содержания фосфора в почвах и оценка обеспеченности им растений // *Исследование Земли из космоса*. 2019. № 2. С. 65-73. doi: [10.31857/S0205-96142019265-73](https://doi.org/10.31857/S0205-96142019265-73)
16. Губина Д.А. Изменение гранулометрического состава пахотных почв подтаежной зоны Томской области при водной эрозии // *Плодородие*. 2014. № 6. С. 23-24.
17. Дубовик Е.В., Дубовик Д.В. Агрохимические свойства серых лесных почв склонового агроландшафта // *Агрохимия*. 2013. № 11. С. 19-25.
18. Жилко В.В., Жукова И.И., Черныш А.Ф., Цыбулька Н.Н., Тишук Л.А. Потери гумуса и макроэлементов, вызываемые водной эрозией, из дерново-палево-подзолистых почв Белоруссии // *Агрохимия*. 1999. № 10. С. 41-46.
19. Ильин В.Б., Гармаш Т.А. Влияние тяжелых металлов на рост, развитие и урожайность сельскохозяйственных культур // *Агрохимия*. 1985. № 6. С. 90-100.
20. Каштанов А.Н., Явтушенко В.Е. *Агроэкология почв склонов*. М.: Колос, 1997. 240 с.
21. *Классификация и диагностика почв СССР* / Составители: В.В. Егоров, В.М. Фридланд, Е.Н. Иванова, Н.Н. Розов, В.А. Носин, Т.А. Фриев. М.: Колос, 1977. 224 с.

22. *Классификация и диагностика почв России* / Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
23. Мазаева М.М. О критическом содержании магния в почвах // *Агрохимия*. 1967. № 10. С. 93-105.
24. Мазаева М.М. Об обеднении дерново-подзолистой почвы магнием и возможность проявления необеспеченности им растений при длительном систематическом применении NPK-удобрений // *Агрохимия*. 1977. № 9. С. 97-101.
25. Михайловская Н.А., Таврыкина О.М., Пуятин Ю.В., Погирницкая Т.В. Влияние обеспеченности дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы обменным магнием на ее биологическую активность и урожайность сельскохозяйственных культур // *Вестні Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук*. 2015. № 2. С. 36-46.
26. Нечаева Т.В., Быкова С.Л. Роль агрохимии в условиях современного земледелия в России // *Живые и биокосные системы*. 2014. № 7
27. Нечаева Т.В., Смирнова Н.В., Гопп Н.В., Савенков О.А. Изменение агрохимических параметров плодородия пахотных почв склона на юге Западной Сибири // *Плодородие*. 2017. № 2(95). С. 2-5.
28. Нечаева Т.В., Гопп Н.В., Савенков О.А., Смирнова Н.В. Калийное состояние почв склонового агроландшафта на юго-востоке Западной Сибири // *Земледелие*. 2019а. № 1. С. 10-14. doi: [10.24411/0044-3913-2019-10103](https://doi.org/10.24411/0044-3913-2019-10103)
29. Нечаева Т.В., Гопп Н.В., Савенков О.А., Смирнова Н.В. Фосфатное состояние почв склонового агроландшафта на юго-востоке Западной Сибири // *Сборник научных трудов Государственного Никитского ботанического сада*. 2019б. Т. 148. С. 68-76. doi: [10.25684/NBG.scbook.148.2019.07](https://doi.org/10.25684/NBG.scbook.148.2019.07)
30. Норкина И.А., Пименов Е.А., Шильников И.А., Мельникова М.Н., Брагин И.В., Аристархова Г.Г. *Рекомендации по применению магниесодержащих удобрений в условиях интенсивных технологий возделывания сельскохозяйственных культур*. М., 1988. 22 с.
31. *Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных почвенных карт землепользований*. М.: Колос, 1973. 73 с.
32. Орлов А.Д. *Эрозия и эрозионноопасные земли Западной Сибири*. Новосибирск: Наука, 1983. 208 с.
33. Орлов Д.С. *Химия почв*. М.: Изд-во МГУ, 1992. 400 с.
34. Панинников В.Д., Минеев В.Г. *Почва, климат, удобрение и урожай*. М. 1977. 416 с.
35. Погуленко А.А. Экологическая устойчивость агроландшафтов при использовании в пашне // *Сибирский вестник сельскохозяйственных наук*. 2013. № 4. С. 5-11.
36. *Полевой определитель почв России*. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
37. *Практикум по агрохимии*. 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. академика РАСХН В.Г. Минеева. М.: Издательство МГУ, 2001. 689 с.
38. Савельева Д.А. Особенности трансформации некоторых показателей гумусного состояния пахотных почв в эрозионных ландшафтах подтайги Томской области // *Земледелие*. 2016. № 7. С. 19-23.
39. Савоськина О.А. Почвозащитные приемы обработки – важнейший резерв снижения потерь биофильных элементов на эрозионноопасных землях // *Агрохимический вестник*. 2011. № 1. С. 19-23.
40. Станилевич И.С., Пуятин Ю.В., Богдевич И.М. Качество зерна ярового тритикале в зависимости от обеспеченности дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы обменным магнием и доз минеральных удобрений // *Почвоведение и агрохимия*. 2018. № 2(61). С. 80-88.
41. Таврыкина О.М., Богдевич И.М., Пуятин Ю.В., Довнар В.А., Третьяков Е.С., Маркевич Д.В. Влияние возрастающих уровней обеспеченности дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы обменным магнием и удобрений на урожайность и качество зеленой массы кукурузы // *Агрохимия*. 2013. № 10. С. 39-45.
42. Танасиенко А.А. *Специфика эрозии почв в Сибири*. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2003. 176 с.
43. Танасиенко А.А., Чумбаев А.С., Якутина О.П., Миллер Г.Ф. Условия и интенсивность эрозионно-аккумулятивных процессов в лесостепи Предсалаирья // *Почвоведение*. 2013. № 11. С. 1397-1408. doi: [10.7868/S0032180X13110099](https://doi.org/10.7868/S0032180X13110099)
44. Тихомирова В.Я. Влияние свойств почв, удобрений, известии и погодных условий на обеспеченность магнием сельскохозяйственных растений // *Агрохимия*. 2011. № 5. С. 84-89.
45. Тихомирова В.Я., Сорокина О.Ю., Кузьменко Н.Н. Градация обеспеченности магнием дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы для культуры льна-долгунца // *Агрохимия*. 2011. № 8. С. 8-13.
46. Труфанова О.М., Рахимгалиева С.Ж., Худякова В.М. Формы соединений магния в темно-каштановых почвах Западного Казахстана при различном хозяйственном использовании // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2014. № 37. С. 56-61.
47. Хмелев В.А., Танасиенко А.А. *Земельные ресурсы Новосибирской области и пути их рационального использования*. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2009. 349 с.
48. Чернышев Е.П., Иванова Н.Б. Потери органических и минеральных веществ почвами центра и юга Русской равнины при снеготаянии // *Почвоведение*. 1993. № 2. С. 73-83.
49. Шеуджен А.Х., Бондарева Т.Н., Онищенко Л.М., Бочко Т.Ф., Лебедовский И.А., Осипов М.А., Есипенко С.В. Содержание и формы соединений магния в черноземе выщелоченном Западного Предкавказья в условиях агрогенеза // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2015. № 112. С. 1722-1732.

50. Шикла Н.К., Ломакин М.М. Потери питательных веществ из серых оподзоленных почв с поверхностным стоком. // *Почвоведение*. 1978. № 4. С. 113-121.
51. Явтушенко В.Е., Макаров Н.Б. Потери органического вещества и элементов питания растений из почвы в результате водной эрозии // *Агрохимия*. 1996. № 4. С. 117-123.
52. Якименко В.Н. Потребление калия и магния картофелем и изменение их содержания в почве полевого опыта // *Плодородие*. 2018. № 5. С. 19-22. doi: [10.25680/S19948603.2018.104.06](https://doi.org/10.25680/S19948603.2018.104.06)
53. Якименко В.Н. Изменение содержания калия и магния в профиле почвы длительного полевого опыта // *Агрохимия*. 2019. № 3. С. 19-29. doi: [10.1134/S0002188119030153](https://doi.org/10.1134/S0002188119030153)
54. Якутина О.П., Нечаева Т.В., Смирнова Н.В. Режимы основных элементов питания и продуктивность растений на эродированных почвах юга Западной Сибири // *Проблемы агрохимии и экологии*. 2011. № 1. С. 16-22.
55. Якутина О.П., Нечаева Т.В., Смирнова Н.В. Плодородие почв склона, структура и качество урожая яровой пшеницы на юге Западной Сибири // *Почвы и окружающая среда*. 2018. № 1(3). С. 126-142. doi: [10.31251/pos.v1i3.37](https://doi.org/10.31251/pos.v1i3.37)
56. Яхияев М.А., Салихов Ш.К., Абдулкадырова С.О., Асельдерова А.Ш., Сурхаева З.З., Казанбиева П.Д., Ибрагимова Э.И., Алиева Д.З., Адилова М.А., Абусуева Б.А., Абусуева З.С. Содержание магния в окружающей среде и заболеваемость населения артериальной гипертензией // *Гигиена и санитария*. 2019. Т. 98. № 5. С. 494-497. doi: [10.18821/0016-9900-2019-98-5-494-497](https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-5-494-497)
57. Bezuglova O.S. Soil and human health // *Science Almanac of Black Sea Region Countries*. 2017. No. 2 (10). p. 68-73. doi: [10.23947/2414-1143-2017-10-2-68-73](https://doi.org/10.23947/2414-1143-2017-10-2-68-73)
58. Gabbasova I.M., Suleimanov R.R., Komissarov M.A., Garipov T.T., Sidorova L.V., Khaziev F.K., Khabirov I.K., Fruehauf M., Liebelt P. Temporal changes of eroded soils depending on their agricultural use in the southern Cis-Ural region // *Eurasian Soil Science*. 2016. T. 49. No. 10. p. 1204-1210. doi: [10.1134/S1064229316100070](https://doi.org/10.1134/S1064229316100070)
59. Gopp N.V., Nechaeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V. The methods of geomorphometry and digital soil mapping for assessing spatial variability in the properties of agrogray soils on a slope // *Eurasian Soil Science*. 2017a. Vol. 50. No. 1. p. 20-29. doi: [10.1134/S1064229317010082](https://doi.org/10.1134/S1064229317010082)
60. Gopp N.V., Nechaeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V. Indicative capacity of NDVI in predictive mapping of the properties of plow horizons of soils on slopes in the south of Western Siberia // *Eurasian Soil Science*. 2017b. Vol. 50. No. 11. p. 1331-1342. doi: [10.1134/S1064229317110060](https://doi.org/10.1134/S1064229317110060)
61. IUSS Working Group WRB. *World Reference Base for Soil Resources International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. World Soil Resources Reports No.106. FAO, Rome, 2014. 181 p.
62. *Handbook of reference methods for plant analysis* / Edited by Yash P. Kalra. Boca Raton, Boston, London, New York, Washington: CRC Press, 1998. 287 p.
63. Jakovljević Miodrag D., Kostić Nikola M., Antić-Mladenović Svetlana B. The availability of base elements (Ca, Mg, Na, K) in some important soil types in Serbia // *Зборник Матице српске за природне науке / Proceedings for Natural Sciences, Matica Srpska Novi Sad*. 2003. No. 104. p. 11-21. doi: [10.2298/ZMSPN0304011J](https://doi.org/10.2298/ZMSPN0304011J)
64. Lai R. *Sustainable development and management of land and water resources* // FAO Netherlands conference on agriculture and the environment, Hertogenbosch. Background docum. No1. Rome, 1991. 22 p.
65. Mikkelsen R. Soil and Fertilizer Magnesium // *Better Crops*. 2010. Vol. 94. No. 2.
66. Marschner H. *Mineral nutrition of higher plants*. 3rd ed. London, 2011. 672 p.
67. Shiwakoti S., Zheljzkov V.D., Gollany H.T., Kleber M. and Xing B. Macronutrients in soil and wheat as affected by a long-term tillage and nitrogen fertilization in winter wheat–fallow rotation // *Agronomy*. 2019. 9, 178. doi: [10.3390/agronomy9040178](https://doi.org/10.3390/agronomy9040178)
68. Tanol K., Kobayashi N.I. Leaf senescence by magnesium deficiency // *Plants*. 2015. No. 4(4). p. 756-772.
69. Yakutina O.P., Nechaeva T.V., Smirnova N.V. Consequences of snowmelt erosion: Soil fertility, productivity and quality of wheat on GreyzemicPhaeozem in the south of West Siberia // *Agriculture, Ecosystem and Environment* (200). 2015. p. 88-93. doi: [10.1016/j.agee.2014.10.021](https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.021)
70. Zebire D.A., Ayele T., Ayana M. Characterizing soils and the enduring nature of land uses around the Lake Chamo Basin in South-West Ethiopia // *Journal of Ecology and Environment*. 2019. 43:15. doi: [10.1186/s41610-019-0104-9](https://doi.org/10.1186/s41610-019-0104-9)

Поступила в редакцию 13.12.2019

Принята 19.12.2019

Опубликована 30.12.2019

Сведения об авторах:

Нечаева Таисия Владимировна - кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); nechaeva@issa-siberia.ru

Гопп Наталья Владимировна - кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории географии и генезиса почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); gopp@issa-siberia.ru

Савенков Олег Александрович - кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); savenkov@issa-siberia.ru

Смирнова Наталья Валентиновна - кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); smirnova@issa-siberia.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

MAGNESIUM IN SOILS AND PLANTS OF A SLOPING AGROLANDSCAPE IN THE SOUTH-EAST OF WEST SIBERIA

© 2019 T.V. Nechaeva , N.V. Gopp , O.A. Savenkov, N.V. Smirnova 

Address: Institute of Soil Science and Agrochemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia. E-mail: nechaeva@issa-siberia.ru

The aim of the study. To carry out a comparative assessment of the magnesium status in soils, situated on the various hypsometric levels of sloped agrolandscape and with different soil organic matter content by measuring total, mobile (exchangeable) and water-soluble magnesium in soils and to compare different analytical methods for determining magnesium in soils and plants.

Location and time of the study. The study site was located in the Cis-Salair drained plain in the south-east of West Siberia (55°02'20"N; 83°50'00"E), administratively being within the boundaries of the Toguchin district of the Novosibirsk region, Russia. Altitude increments were marked on the slope positions of the investigated plot of 225 hectares in area and 4 km in length: the upper part of the slope BC_I (280-310 m a.s.l.), the midslope BC_{II} (260-280 m) and BC_{III} (220-260 m), and the lower slope BC_{IV} (190-220 m) (see figure 1). Soil and plant samples were collected in July 2013.

Materials and methods. Prevailing soils were podzolized and leached chernozems, dark-gray and gray-forest soils according to the classification of soils of the USSR (1977), which correspond to clayey-illuvial eluvial and dark-tongue agrochernozems, agro-dark gray soils and agro-gray soils according to the Russian soil classification (2004, 2008), or Luvisc Greyzemic Chernozems, Haplic Chernozems, Luvisc Greyzemic Phaeozems, Luvisc Retic Greyzemic Phaeozems by WRB Soil Classification (2014) (see table 1, figure 1). Individual soil samples (n=55) were taken with a drill from 0-30 cm layer (ploughed horizon) according to an irregular grid. The aboveground phytomass stock of oat-pea mixture (n=38) was collected using the hay cutting method on the 0.25 m² area. The geographical coordinates of the soil and plant sampling sites were determined using the geopositioning system (GPS, Garmin eTrex Vista).

The soil samples were analyzed for organic carbon content by dichromate digestion. Overall the studied soils were grouped according to soil organic matter (SOM) content into high-SOM (5–8%) and medium-SOM soils (3–5%). Total magnesium (Mg_{tot}) was measured in dry powdered samples by atomic emission spectrometry; mobile (exchangeable) magnesium was measured by atomic absorption spectrometry using 1 M KCl, 1 M CH₃COONH₄, 0.1 M C₄H₄O₅(NH₄)₂ and 0.5 M CH₃COOH as extracting solutions. The same extracts were used to measure water-soluble magnesium atomic absorption spectrometry and capillary electrophoresis. The content of total magnesium in plants was determined by atomic absorption spectrometry using two methods of sample digestion, namely wet ashing in a mixture of sulfuric and perchloric acids and dry ashing followed by quantitative transfer of the digest with 1 M HCl. Magnesium content in soils and plants was presented per element and calculated on the air-dry mass basis. Statistical analyses (descriptive statistics, correlation analysis, calculation of student criterion and Mann-Whitney U-test) were performed using Microsoft Office Excel 2007 and Statistica v.6.1.

Results. The average content of total magnesium in the slope soils varied from 0.79 to 0.88%. The proportion of mobile magnesium in its total content in soils averaged 3.3-6.0%, whereas that of water-soluble magnesium was 0.06-0.13%. In medium-SOM soils down along the slope the total magnesium content gradually decreased: agrochernozems → agro-dark gray soils → agro-gray soils (see table 2, figure 2). The similar pattern was revealed an earlier for the content of total phosphorus and total potassium in the slope soils. The average content of mobile magnesium in the high-SOM soils on the upper part of the slope (BC_I) varied from 3.2 to 4.0 cmol(+)·kg⁻¹, depending on the extractant used. The medium-SOM soils (BC_{II-IV}) contained 2.2 to 3.2 cmol(+)·kg⁻¹ of mobile magnesium. Atomic absorption spectrometry and capillary

electrophoresis produced very close values water-soluble magnesium content in soils: on average, 0.06-0.08 and 0.04-0.09 $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. However, capillary electrophoresis proved to be more sensitive to the decreased content of water-soluble magnesium in the midslope medium-SOM soils. Magnesium content in aboveground phytomass of an oat-pea mixture, collected in the tillering phase of its cereal component, determined by dry ashing, averaged 0.21-0.26%, which corresponded to the optimal level of the element; estimated by wet ashing it was 1.3-1.6 times lower (see table 2).

Conclusions. Under the conditions of the sloping agrolandscape of the Cis-Salair in the south-eastern part of West Siberia, high-SOM soils in the upper part of the slope are characterized by higher content of mobile magnesium as compared with the medium-SOM soils mid- and downslope. We believe that for assessing magnesium status of soils it is more expedient to use 1 M KCl or 1 M $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ to determine mobile (exchangeable) magnesium. Moreover, these extractants can be used for simultaneous determination of other soil properties, i.e. exchangeable calcium and potassium content, pH_{salb} etc.

Key words: humus; soil organic matter; magnesium: total, mobile (exchangeable), water-soluble forms; erosion; slope; altitude steps; phytomass reserves; magnesium in plants; Novosibirsk region

How to cite: Nechaeva T.V., Gopp N.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V. Magnesium in soils and plants of a sloping agrolandscape in the south-east of West Siberia // *The Journal of Soils and Environment*. 2019. 2(4). e91. doi: [10.31251/pos.v2i4.91](https://doi.org/10.31251/pos.v2i4.91) (in Russian with an English abstract).

REFERENCES

1. *Agrochemical soil research methods*. Moscow: Nauka Publ., 1975, 656 p. (in Russian)
2. Altuhov A.I., Sychov V.G., Vinnichuk L.B. Development of production and market of mineral fertilizers, *Plodorodiye*, 2019, No. 3(108), p. 6-9. doi: [10.25680/S19948603.2019.108.02](https://doi.org/10.25680/S19948603.2019.108.02) (in Russian)
3. Aristarkhov A.N. *Optimization of plant nutrition and the use of fertilizers in agroecosystems*. Moscow: CINAO Publ., 2000, 524 p. (in Russian)
4. Aristarkhov A.N. Agrochemical justification for the use of magnesium fertilizers, *Plodorodiye*, 2002, No. 2(5), p. 15-17. (in Russian)
5. Afanas'yev R.A. Magnesium in the soil - plant - animal system, *Plodorodiye*, 2005, No. 5(26), p. 19-21. (in Russian)
6. Bashkin V.N., Luchitskaya O.A., Kozlov M.Ya., Voloshina O.N. Differentiation of soils and content of biophylous elements in them as related to topography, *Pochvovedenie*, 1991, No. 12, p. 15-23. (in Russian)
7. Bezuglov V.G., Gogmachadze G.D., Sinigovets M.E. State with soil erosion in Russia, *AgroEcoInfo*, 2008, No. 1(2). (in Russian)
8. Bogdevitch I.M., Lomonos O.L., Tavrykina O.M. Dynamics of acidity, calcium and magnesium supply in the arable and grassland soils of Belarus in the course of liming, *Pochvovedenie i agrokhimia*, 2014, No. 1(52), p. 159-172. (in Belarus)
9. Vorobyova L.A., Ladonin D.V., Lopukhina O.V., Rudakova T.A., Kiryushin A.V. *Chemical Analysis of Soil. Questions and Answers*. Moscow, 2012, 186 p. (in Russian)
10. Voyevodina L.A., Voyevodin O.V. Magnesium for soil and plants, *Scientific journal of Russian scientific research institute of land improvement problems*, 2015, No. 2(18), p. 70-81. (in Russian)
11. GOST 26487-85 Soils. Determination of exchangeable calcium and exchangeable (mobile) magnesium by CINAO methods. Moscow: Standard Publishing House, 1985. (in Russian)
12. Godunova E.I., Chizhikova N.A., Shkabarda S.N. Natural enough magnesium in soil Stavropol Height at different levels in agricultural landscapes agrogenno impact, *Achievements of Science and Technology of AIC*, 2013, No. 4, p. 9-11. (in Russian)
13. Gopp N.V., Nechaeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V. The Use of a digital model (ASTER GDEM, 30 m) to estimate the spatial variability of the content of basic macronutrients in agrostroj soil slope, *Agrokhimia*, 2016, No. 4, p. 46-54. (in Russian)
14. Gopp N.V., Nechaeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V., and Smirnov A.V. Digital mapping of the degree of soil cultivation of the plowing soils of the Cis-Salair drained plain, *The Journal of Soils and Environment*, 2018, No. 1(1), p. 32-44. doi: [10.31251/pos.v1i1.7](https://doi.org/10.31251/pos.v1i1.7) (in Russian with English abstract)
15. Gopp N.V., Savenkov O.A., Nechaeva T.V., Smirnova N.V., Smirnov A.V. Application of NDVI in Digital Mapping of Phosphorus Content in Soils and Phosphorus Supply Assessment in Plants, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, Vol. 55, No. 9, p. 1322-1328. doi: [10.31857/S0205-96142019265-73](https://doi.org/10.31857/S0205-96142019265-73) (in Russian)
16. Gubina D.A. Changes of the particle size distribution in arable soils of the subtaiga zone in the Tomsk region under water erosion, *Plodorodiye*, 2014, No. 6(81), p. 23-24. (in Russian)
17. Dubovik E.V., Dubovik D.V. Agrochemical properties of grey forest soils in sloped agrolandscape, *Agrokhimia*, 2013, No. 11, p. 19-25. (in Russian)
18. Zhilko V.V., Zhukova I.I., Chernysh A.F., Tsybul'ka N.N., Tishuk L.A. Losses of humus and macronutrients caused by water erosion from sod-pale-podzolic soils of Belarus, *Agrokhimia*, 1999, No. 10, p. 41-46. (in Russian)

19. Il'in V.B., Garmash T.A., Garmash N.Yu. The influence of heavy metals on the growth, development and productivity of crops, *Agrokhimia*, 1985, No. 6, p. 90-100. (in Russian)
20. Kashtanov A.N., Yavtushenko V.E. *Agroecology of slope soils*. Moscow, Kolos Publ., 1997, 240 p. (in Russian)
21. *Classification and diagnostics of Soils of the USSR* / Compiled by: V.V. Egorov, V.M. Friedland, E.N. Ivanova, N.N. Rozova, V.A. Nosin, T.A. Friev. Moscow: Kolos Publ., 1977. 224 p. (in Russian)
22. *Classification and diagnostics of Soils of Russian* / Authors and compilers: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimova. Smolensk: Oykumena Publ., 2004. 342 p. (in Russian)
23. Mazayeva M.M. On the critical content of magnesium in soils, *Agrokhimia*, 1967, No. 10, p. 93-105. (in Russian)
24. Mazayeva M.M. On the depletion of sod-podzolic soil with magnesium and the possibility of manifestation of plant insecurity during prolonged systematic use of NPK fertilizers, *Agrokhimia*, 1977, No. 9, p. 97-101. (in Russian)
25. [Mikhailovskaya N.A., Tavrykina O.M., Putyatin Yu. V., Pogirnitskaya T.V. Influence of the supply of fluvisol sandy loam soil with exchangeable magnesium on its biological activity and the yield of crops, *Herald of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of Agrarian Sciences*, 2015, No. 2. p. 36-46. \(in Belarus\)](#)
26. [Nechaeva T.V., Bykova S.L. The role of agrochemistry in the conditions of modern agriculture in Russia, *Zhivye i biokosnye sistemy*, 2014, No. 7. \(in Russian\)](#)
27. [Nechaeva T.V., Smirnova N.V., Gopp N.V., Savenkov O.A. Changes in the agrochemical parameters of fertility of sloped arable soils in the southern regions of Western Siberia, *Plodorodie*, 2017, No. 2\(95\), p. 2-5. \(in Russian\)](#)
28. [Nechaeva T.V., Gopp N.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V. Potassium Status of the Slope Agricultural Landscape in the South-East of Western Siberia, *Zemledelie*, 2019a, No. 1, p. 10-14. doi: 10.24411/0044-3913-2019-10103 \(in Russian\)](#)
29. [Nechaeva T.V., Gopp N.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V. Phosphate state of soils of the slope agricultural landscape in the south-east of Western Siberia, *Works of the State Nikin. Botan. Gard*, 2019b, Vol. 148, p. 68-76. doi: 10.25684/NBG.scbook.148.2019.07 \(in Russian\)](#)
30. Norkina I.A., Pimenov E.A., Shilnikov I.A., Melnikova M.N., Bragin I.V., Aristarhova G.G. *Recommendations on the use of magnesium-containing fertilizers in conditions of intensive crop cultivation technologies*. Moscow, 1988. 22 p. (in Russian)
31. *Union manual on soil surveys and development of large scale soil maps of land use*. Moscow: Kolos, 1973. 73 p. (in Russian)
32. Orlov A.D. *Erosion and eroded of land in Western Siberia*. Novosibirsk: Nauka, 1983. 208 p. (in Russian)
33. Orlov D.S. *Soil chemistry*. Moscow: Moscow State University Publishing House, 1992. 400 p. (in Russian)
34. Pannikov V.D., Mineev V.G. *Soil, climate, fertilizer and crop*. M. 1977. 416 p. (in Russian)
35. [Pogulenko A.A. Ecological stability of agrolandscapes used as plowed land, *Siberian Herald of Agricultural Science*, 2013, No. 4, p. 5-11. \(in Russian\)](#)
36. *Field guide for Russian soil*. Moscow: Dokuchaev Soil Science Institute, 2008. 182 p. (in Russian)
37. *Workshop on agrochemistry: Tutorial*. 2nd edition, revised and enlarged / Edited by academician V.G. Mineev. Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2001. 689 p. (in Russian)
38. [Saveleva D.A. Transformation peculiarities of some indicators of humus state of arable soils in erosion landscapes in sub-taiga zone of Tomsk region, *Zemledelie*, 2016, No. 7, p. 19-23. \(in Russian\)](#)
39. [Savoskina O.A. Soil-protecting devices of treatment - the most important reserve of biophilus elements' losses decrease on erosion dangerous lands, *Agrochemical Herald*, 2011, No. 1, p. 19-23. \(in Russian\)](#)
40. [Stanilevich I.S., Putyatin Yu. V., Bogdevich I.M. The quality of spring triticale grain depending on the exchangeable magnesium supply of sod-podzolic loamy soil and rates of mineral fertilizers, *Pochvovedenie i Agrokhimia*, 2018, No. 2\(61\), p. 80-88. \(in Belarus\)](#)
41. [Tavrykina O.M., Bogdevich I.M., Putyatin Yu.V., Dovnar V.A., Tret'yakov E.S., Markevich D.V. Effect of increasing levels of exchangeable magnesium in sandy loamy soddy-podzolic soil and fertilizers on the yield and quality of corn green mass, *Agrokhimia*, 2013, No. 10, p. 39-45. \(in Russian\)](#)
42. Tanasienko A.A. *Specific features of soil erosion in Siberia*. Novosibirsk: Published by Siberian branch of RAS, 2003. 176 p. (in Russian)
43. [Tanasienko A.A., Chumbaev A.S., Yakutina O.P., Miller G.F. Conditions and intensity of erosion-accumulation processes in the forest-steppe of the Cis-Salair, *Pochvovedenie*, 2013, No. 11, p. 1397-1408. doi: 10.7868/S0032180X13110099 \(in Russian\)](#)
44. [Tikhomirova V. Ya. Effect of soil environment, mineral fertilizers, potassium, weather conditions on the magnesium supply of agricultural crops, *Agrokhimia*, 2011, No. 5, p. 84-89. \(in Russian\)](#)
45. [Tikhomirova V.Ya., Sorokina O.Yu., Kuzmenko N.N. Magnesium supply scale for sandy loamy soddy-podzolic soil of fiber flax plantations, *Agrokhimia*, 2011, No. 8, p. 8-13. \(in Russian\)](#)
46. [Trufanova O.M., Rahemgalieva S. Zh., Khudyakova V.M. Forms of magnesium compounds in dark chestnut soils of Western Kazakhstan with different agricultural use, *Izvestiya SPbSAU*, 2014, No. 37, p. 56-61. \(in Russian\)](#)
47. Khmelev V.A., Tanasienko A.A. *Land resources of the Novosibirsk region and ways of their rational use*. Novosibirsk: Published by Siberian branch of RAS, 2009. 349 p. (in Russian)
48. [Chernishev E.P., Ivanova N.B. Losses of organic and mineral substances by soils of the center and south of the Russian Plain during snowmelt, *Pochvovedenie*, 1993, No. 2, p. 73-83. \(in Russian\)](#)

49. Sheudzhen A.Kh., Bondareva T.N., Onishchenko L.M., Bochco T.F., Lebedovsky I.A., Osipov M.A., Esipenko S.V. The content and the forms of magnesium compound in leached black soil (chernozem) of Western Ciscaucasia in the agrogenesis, *Scientific Journal of KubSAU*, 2015, No. 112(08) (in Russian)
50. Shikula N.K., Lomakin M.M. Loss of nutrients from gray podzolized soils with surface runoff, *Pochvovedenie*, 1978. No. 4. p. 113-121. (in Russian)
51. Yavtushenko V.E., Makarov N.B. Loss of organic matter and plant nutrients from soil due to water erosion, *Agrokhimia*, 1996, No. 4, p. 117-123. (in Russian)
52. Yakimenko V.N. Consumption of potassium and magnesium by potatoes and change their content in soil of the field experiment, *Plodorodie*, 2018, No. 5(104), p. 19-22. doi: [10.25680/S19948603.2018.104.06](https://doi.org/10.25680/S19948603.2018.104.06) (in Russian)
53. Yakimenko V.N. Change of potassium and magnesium content in soil profile of long-term field experiment, *Agrokhimia*, 2019, No. 3, p. 19-29. doi: [10.1134/S0002188119030153](https://doi.org/10.1134/S0002188119030153) (in Russian)
54. Yakutina O.P., Nechaeva T.V., Smirnova N.V. The main nutritious regimes and plant production on the eroded soils in the south of West Siberia, *Agrochemistry and ecology problems*, 2011. No. 1. p. 16-22. (in Russian)
55. Yakutina O.P., Nechaeva T.V., Smirnova N.V. Fertility of soils on slope, yield structure and quality of spring wheat in the south of Western Siberia, *The Journal of Soils and Environment*, 2018, No.1(3), p. 126-142. doi: [10.31251/pos.v1i3.37](https://doi.org/10.31251/pos.v1i3.37) (in Russian with English abstract)
56. Yahyaev M.A., Salikhov Sh.K., Abdulkadyrova S.O., Aselderova A.Sh., Surkhayeva Z.Z., Kazanbiyeva P.D., Ibragimova E.I., Alieva D.Z., Adilova M.A., Abusueva B.A., Abusueva Z.S. Contents of magnesium in the environment and population morbidity rate of arterial hypertension, *Hygiene and sanitation*, 2019. T. 98. No. 5. p. 494-497. doi: [10.18821/0016-9900-2019-98-5-494-497](https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-5-494-497) (in Russian)
57. Bezuglova O.S. Soil and human health, *Science Almanac of Black Sea Region Countries*, 2017, No. 2(10). p. 68-73. doi: [10.23947/2414-1143-2017-10-2-68-73](https://doi.org/10.23947/2414-1143-2017-10-2-68-73) (in Russian)
58. Gabbasova I.M., Suleimanov R.R., Komissarov M.A., Garipov T.T., Sidorova L.V., Khaziev F.K., Khabirov I.K., Fruehauf M., Liebelt P. Temporal changes of eroded soils depending on their agricultural use in the southern Cis-Ural region, *Eurasian Soil Science*, 2016, T. 49, No. 10, p. 1204-1210. doi: [10.1134/S1064229316100070](https://doi.org/10.1134/S1064229316100070)
59. Gopp N.V., Nechaeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V. The methods of geomorphometry and digital soil mapping for assessing spatial variability in the properties of agrogray soils on a slope, *Eurasian Soil Science*, 2017a, Vol. 50, No. 1, p. 20-29. doi: [10.1134/S1064229317010082](https://doi.org/10.1134/S1064229317010082)
60. Gopp N.V., Nechaeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V. Indicative capacity of NDVI in predictive mapping of the properties of plow horizons of soils on slopes in the south of Western Siberia, *Eurasian Soil Science*, 2017b, Vol. 50, No. 11, p. 1331-1342. doi: [10.1134/S1064229317110060](https://doi.org/10.1134/S1064229317110060)
61. IUSS Working Group WRB. *World Reference Base for Soil Resources International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. World Soil Resources Reports No.106. FAO, Rome, 2014. 181 p.
62. *Handbook of reference methods for plant analysis* / Edited by Yash P. Kalra. Boca Raton, Boston, London, New York, Washington: CRC Press, 1998. 287 p.
63. Jakovljević Miodrag D., Kostić Nikola M., Antić-Mladenović Svetlana B. The availability of base elements (Ca, Mg, Na, K) in some important soil types in Serbia, *Зборник Матице српске за природне науке / Proceedings for Natural Sciences, Matica Srpska Novi Sad*, 2003, No. 104, p. 11-21. doi: [10.2298/ZMSPN0304011J](https://doi.org/10.2298/ZMSPN0304011J)
64. Lai R. *Sustainable development and management of land and water resources* // FAO Netherlands conference on agriculture and the environment, Hertogenbosch. Background docum. No 1. Rome, 1991. 22 p.
65. Mikkelsen R. Soil and Fertilizer Magnesium, *Better Crops*, 2010, Vol. 94, No. 2.
66. Marschner H. *Mineral nutrition of higher plants*. 3rd ed. London, 2011. 672 p.
67. Shiwakoti S., Zheljzkov V.D., Gollany H.T., Kleber M. and Xing B. Macronutrients in soil and wheat as affected by a long-term tillage and nitrogen fertilization in winter wheat-fallow rotation, *Agronomy*, 2019, 9, 178. doi: [10.3390/agronomy9040178](https://doi.org/10.3390/agronomy9040178)
68. Tanol K., Kobayashi N.I. Leaf senescence by magnesium deficiency, *Plants*, 2015, No. 4(4). p. 756-772.
69. Yakutina O.P., Nechaeva T.V., Smirnova N.V. Consequences of snowmelt erosion: Soil fertility, productivity and quality of wheat on GreyzemicPhaeozem in the south of West Siberia, *Agriculture, Ecosystem and Environment* (200), 2015, p. 88-93. doi: [10.1016/j.agee.2014.10.021](https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.021)
70. Zebire D.A., Ayele T., Ayana M. Characterizing soils and the enduring nature of land uses around the Lake Chamo Basin in South-West Ethiopia, *Journal of Ecology and Environment*, 2019, 43:15. doi: [10.1186/s41610-019-0104-9](https://doi.org/10.1186/s41610-019-0104-9)

Received 13 December 2019

Accepted 19 December 2019

Published 30 December 2019

About the authors:

Nechaeva Taisia V. - Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Agrochemistry in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); nechaeva@issa-siberia.ru

Gopp Natalya V. - Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Soil Geography and Genesis in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); gopp@issa-siberia.ru

Savenkov Oleg A. - Candidate of Biological Sciences, Researcher in the Laboratory of Agrochemistry in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); savenkov@issa-siberia.ru

Smirnova Natalya V. - Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Agrochemistry in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); smirnova@issa-siberia.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)