УДК 633.2:528.8 DOI: 10.25695/AGRPH.2022.02.01

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ УЧЕТА АГРОЛАНДШАФТНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АГРОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

А. Д. Кирсанов, А. А. Комаров

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»,
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14,
E-mail: andrkkir88@gmail.com; Zelenydar@mail.ru

Поступила в редакцию 05 апреля 2022 г., принята к печати 31 мая 2022 г.

В работе представлены результаты мониторинговых исследований, проведенных в ЗАО «Осьминское» из сети тестовых полигонов Ленинградской области. Данная система наблюдений была сформирована в 2008 г. и предназначена для проведения комплексного агроэкологического мониторинга почв земель сельскохозяйственного назначения в регионе. Она охватывала двенадцать региональных тестовых полигонов, расположенных в основных агроклиматических, почвенных и агроландшафтных зонах Ленинградской области.

Основная задача проводимых на полигоне исследований заключалась в выявлении характера влияния микрорельефа полигона и уровня влагообеспеченности на урожайность возделываемых культур. Для решения поставленной задачи был проведен сопряженный анализ вегетационных индексов NDVI, рассчитанных на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), и результатов наземных определений урожайности и основных агрохимических показателей на тех же участках за период с 2014 по 2016 гг.

В ходе проведенных исследований установлено, что в условиях сезонов 2014 и 2015 гг. влагообеспеченность была ниже уровня, характерного для данной климатической зоны. При нетипично низкой влагообеспеченности наиболее высокие показатели продуктивности отмечены на самых низких участках. В условиях избыточной влагообеспеченности (2016 г.) наибольшей продуктивностью также характеризовались самые низкие участки полигона.

Данное исследование подтверждает, что характер микро- и макрорельефа в совокупности с уровнем влагообеспеченности оказывает лимитирующее влияние на урожайность многолетних трав на полигоне, что в свою очередь свидетельствует о целесообразности учета агроландшафтных особенностей при проведении агроэкологического мониторинга.

Представленные данные имеют как теоретическое, так и практическое значение, поскольку позволяют оптимизировать внесение удобрений и сроки уборки многолетних трав в системе точного земледелия.

Ключевые слова: агроландшафтные особенности, агроэкологический мониторинг, плодородие почв, урожайность, микрорельеф, гидротермический коэффициент.

ACCOUNTING ON AGRO-LANDSCAPE PECULIARITIES WHEN CONDUCTING AGROECOLOGICAL MONITORING

A. D. Kirsanov, A. A. Komarov

Agrophysical Research Institute, 195220, 14 Grazhdansky Ave., St. Petersburg, Russia
E-mail: andrkkir88@gmail.com, Zelenydar@mail.ru

The paper presents the monitoring results at the test site «Osminskoye»of Leningrad region. The results of agro-ecological land assessment are considered. The observation system was found in 2008 and was designed to conduct a comprehensive agro-ecological monitoring of agricultural soils in the region. It covered twelve regional test sites located in the main agro-climatic, soil and agro-landscape zones of the Leningrad region.

The main objective of the study at the site was to identify the relationship between the microrelief of the site and the level of moisture availability, and crop yields. For this purpose, the conjugate analysis of remote sensing data on the vegetation index NDVI and measured data on grass yields, and basic agrochemical indicators for the period from 2014 to 2016 for the same plots were used.

Based on the conducted studies it was found that in the conditions of the 2014 and 2015 growing seasons, the level of moisture supply was lower than the average for this climatic zone. With the atypically low moisture supply, the lowest areas of the microrelief turned out to be more productive. The same sites in the conditions of excessive moisture supply (2016) were also the most productive.

This study confirms that micro-relief, together with the level of moisture availability, have a limiting effect on the yield of perennial grasses at the site. This, in turn, indicates the necessity of accounting on agro-landscape features, when agro-ecological monitoring is carried out.

The presented data are of both theoretical and practical importance, since they allow optimizing the differentiation of fertilizer application and the harvesting time of perennial grasses in the precision farming systems.

Key words: Agro-landscape features, agro-ecological monitoring, soil fertility, yield, microrelief, hydrothermal coefficient.

ВВЕДЕНИЕ

Полигон ЗАО «Осьминское» входит в состав сети региональных тестовых полигонов, которая в первую очередь предназначена для проведения комплексного агроэкологического мониторинга почв земель сельскохозяйственного назначения (Комаров, Суханов, 2010).

В статье «Агроэкологический мониторинг плодородия почв на примере полигона в хозяйстве ЗАО «Осьминское» Сланцевского района» были рассмотрены данные об уровне влагообеспеченности, урожайности (определенной с использованием вегетационного индекса NDVI) и основные агрохимические показатели за период с 2017 по 2019 гг. включительно (Кирсанов, Комаров, 2021). В настоящей работе проанализированы данные за временной интервал с 2014 по 2016 гг. Это необходимо для того, чтобы не только расширить объем представленных исследований, но и рассмотреть более широкий интервал изменения агроклиматических условий.

На основании сопоставления данных дистанционного зондирования участков с результатами наземного учета за шестилетний период вполне отчетливо выявляется особенность распределения показателей почвенного плодородия и урожайности возделываемых культур. При этом акцент делается на необходимости учета агроклиматических условий и распределения высоты элементарных участков при проведении агроэкологического мониторинга.

Основная задача исследования, проведенного на полигоне ЗАО «Осьминское» Сланцевского района Ленинградской области, заключалась в выявлении характера влияния микрорельефа полигона и уровня влагообеспеченности на урожайность возделываемых культур. Для решения поставленной задачи был проведен сопряженный анализ вегетационных индексов NDVI, рассчитанных на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), и результатов наземных определений основных агрохимических показателей и урожайности возделываемых культур.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования осуществлялись на тестовом полигоне ЗАО «Осьминское» Сланцевского района Ленинградской области, подробно описанном ранее (Комаров, Суханов, 2010).

Мониторинговые исследования на тестовом полигоне проводились в соответствии с принятой методикой (Методические указания 2003, 1991, 2005, 2006, 1996). Все виды анализов выполнялись по соответствующим ГОСТам (Методические указания, 2005).

В данной статье рассматриваются результаты наблюдений за период с 2014 по 2016 гг. В качестве инструмента для обработки и анализа изображений использовался сервис Sentinel Hub (https://apps.sentinel-hub.com). По функционалу данный сервис схож с сервисом LandViewer, который использовался ранее (Кирсанов и др., 2018). Он позволяет выполнять многоцелевые запросы, а также находить и использовать доступные снимки Земли с большого количества спутников, таких как Sentinel, Landsat и др. (Савин, Симакова, 2012).

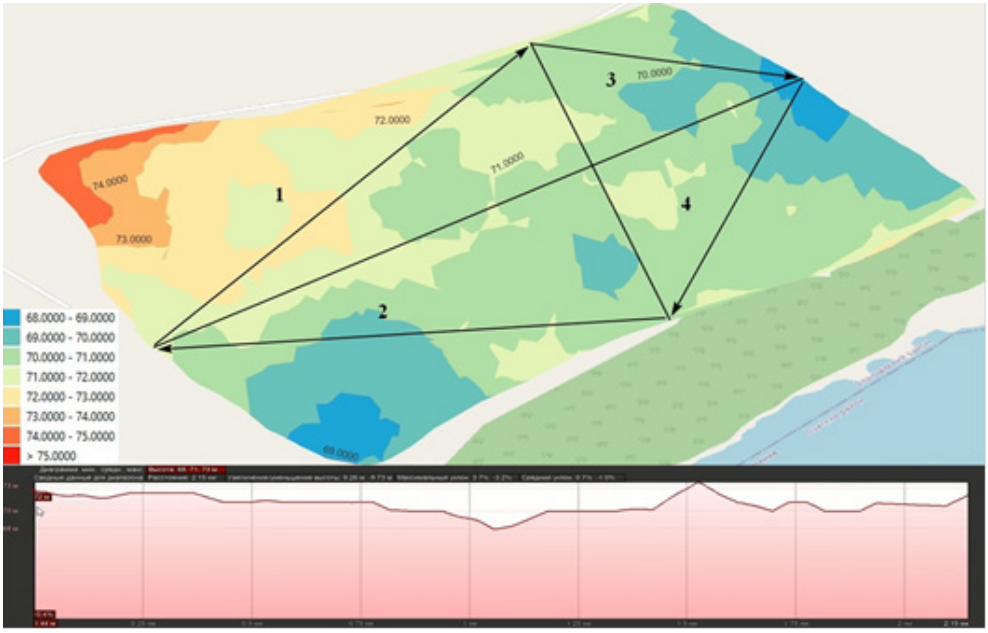


Рис. 1. Карта высот и схема отбора образцов

Посредством интерпретации данных дистанционного зондирования (космических снимков) при помощи сервиса Google Earth Pro была сформирована карта высот. Карта высот совмещена с наземными учетными площадками, в том числе со схемой отбора почвенных и растительных образцов. На основании указанных данных был построен профиль рельефа местности (рис. 1).

Из рис. 1 видно, что профиль рельефа построен вдоль маршрута отбора почвенных образцов на тестовом полигоне. В нижней части рисунка представлена информация о перепаде высот на полигоне. Уклон местности незначителен (от 68 до 75 м относительно уровня моря), высота средняя (71 м).

Основные агрохимические показатели по элементарным участкам полигона за годы проведения исследований (с 2014 по 2016 гг.) представлены в таблице.

Агрохимические показатели характеризовались значительной вариабельностью как по территории полигона, так и по годам исследований (табл.). Наиболее существенной изменчивостью отличались показатели содержания подвижного фосфора и обменного калия в почве. Значительная неоднородность была характерна для показателей гидролитической кислотности. Отмечен незначительный разброс показателей pH (2015–2016 гг.), содержания в почве органического вещества (2014–2015 гг.), обменного магния (2015–2016 гг.) и аммонийного азота (2014–2015 гг.).

Таблица. Основные агрохимические показатели за 2014–2016 гг.

№ п/п	Орган. в-во, %	Подвижные формы, мг кг$^{-1}$ (по Кирсанову)		pH	Нг ммоль в 100 г почвы	Обменные формы, ммоль в 100 г почвы		Азот, мг кг$^{-1}$	
		P_2O_5	K_2O	KCl		Ca++	Mg++	NO_3	NH_4
2014 г.									
1–4	2,75–3,24	150–512	65–96	5,8–6,6	2,16–2,97	7,12–9,75	2,04–3,19	<2,8–2,90	15,11–17,93
V, %	6,9	66,5	25,8	11	14,7	15	19,2	–	7,3
2015 г									
1–4	3,14–3,76	178–224	72–90	5,9–6,3	1,67–2,31	7,12–9,00	1,21–1,34	<2,8	6,54–7,62
V, %	8,2	9,4	9,8	2,8	28,2	11,1	4,7	–	6,6
2016 г.									
1–4	2,98–3,79	181–412	71–182	5,5–6,0	1,37–2,41	6,62–8,37	0,86–1,03	3,90–5,20	6,09–11,3
V, %	11,5	32,7	41,9	3,7	22,2	11,0	8,3	12,0	28,3

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведенных исследований установлено, что помимо неоднородности по агрохимическим показателям (табл.), участки, на которые разделен полигон, характеризуются различной высотой (рис. 1). Несмотря на незначительный уклон (1–3°), высота и распределение по ней агрохимических показателей оказывают значительное влияние на уровень урожайности (Heil et al., 2018).

Так, первый и третий участок являются наиболее высокими. Средние показатели высоты на них – 70–71 м над уровнем моря. Второй и четвертый участки – самые низкие. Средние показатели высоты на них ниже 70 м, при этом на элементарных участках имеются понижения микрорельефа до 69–68 м.

Сопряженные данные об урожайности и ГТК (за 2014 г.) представлены на рис. 2. Для большей информативности добавлены снимки полей со значениями индекса NVDI (Кирсанов и др., 2018; Gopp et al., 2019).

На тестовом полигоне в 2014 г. выращивались многолетние травы второго года пользования, представленные преимущественно злаковым травостоем (рис. 2). Средняя урожайность по участкам составила 206 ц га$^{-1}$. Наибольший показатель урожайности (209 ц га$^{-1}$) отмечен на четвертом участке, на втором участке зафиксирован несколько более низкий показатель (206 ц га$^{-1}$). На первом и третьем участках урожайность была низкой и составила 196 и 203 ц га$^{-1}$ соответственно.

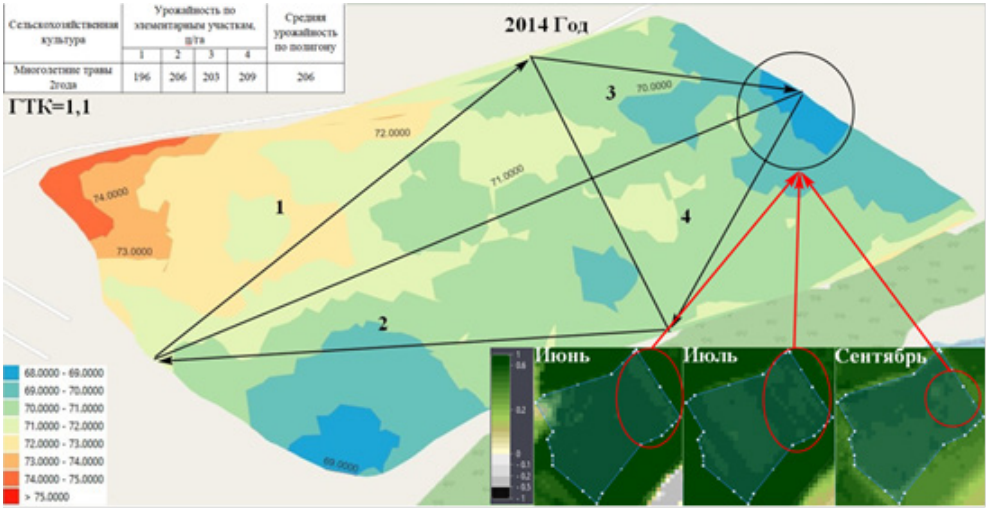


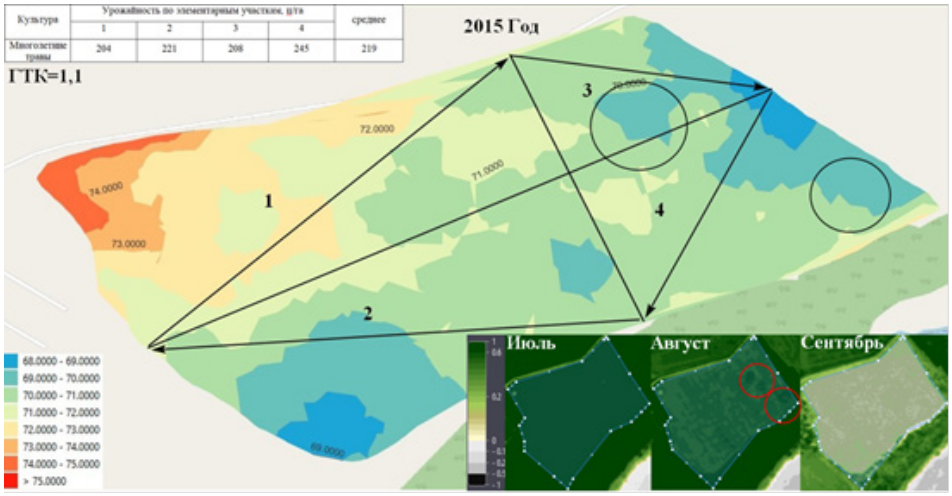
Рис. 2. Сопоставление показателей высоты со значениями NDVI и урожайностью

В соответствии с классификацией климата по условиям влагообеспеченности, полигон расположен в зоне обеспеченного увлажнения. ГТК для данной климатической зоны в среднем составляет 1,5–1,6 (Вериго, Разумова, 1963; Гулинова, 1974). В 2014 г. значение ГТК составило 1,1. То, что в 2014 г. значение ГТК оказалось ниже среднего, свидетельствует о нетипичной для данной климатической зоны засухе. При ГТК = 1,1 наибольшей продуктивностью характеризовались самые низкие участки, такие как 2 и 4, наименьшей — самые высокие. Действительно, достаточная влагообеспеченность имеет важное значение для оптимизации роста и развития многолетних трав (биомассы) (Вериго, Разумова, 1963).

На основании анализа распределения агрохимических показателей по территории полигона установлено, что содержание гумуса в пахотном горизонте на первом и третьем элементарных участках выше, чем на втором и четвертом. Такое распределение характерно и для других основных агрохимических показателей. Таким образом, можно сделать вывод, что в 2014 г. при ГТК = 1,1 наиболее оптимальными агрохимическими показателями характеризовались более возвышенные участки. Вместе с тем урожайность на данных участках, более обеспеченных элементами питания, была ниже, чем на менее обеспеченных. Это, на первый взгляд, противоречит основным постулатам агрохимии. Однако, если рассматривать проблему комплексно, то можно выявить фактор доминирования, которым, судя по всему, является уровень влагообеспеченности участка.

В 2015 г. на тестовом полигоне выращивались многолетние травы (рис. 3). Средняя урожайность составила 219 ц га$^{-1}$.

Самые высокие показатели урожайности (221 и 245 ц га$^{-1}$) отмечены на втором и четвертом элементарных участках, наиболее низкие — на первом (204 ц га$^{-1}$) и третьем (208 ц га$^{-1}$).



Культура	Урожайность по элементарным участкам, ц/га				среднее
	1	2	3	4	
Многолетние травы	204	221	208	245	219

Рис. 3. Сопоставление показателей высоты со значениями NDVI и урожайностью

Как видно из рис. 3, 2015 г. по погодным условиям был схож с 2014 г. Об этом можно судить по двум параметрам: гидротермическому коэффициенту, значение которого сохранилось на уровне 1,1, и урожайности, средний показатель которой также остался на уровне 2014 г.

Из общей картины несколько выделяются показатели урожайности на втором и четвертом участке полигона. Они увеличились примерно на 10% по сравнению с 2014 г. В первую очередь это обусловлено неоднородностью микро- и макрорельефа. Данная информация получена в результате мониторинга состояния посевов на основе оценки вегетационного индекса NDVI. На тестовом полигоне имеются микропонижения, на которых отмечается избыточное увлажнение, что в свою очередь приводит к угнетению роста и подавлению развития возделываемых культур (в данном случае – многолетних трав).

Анализ элементов почвенного плодородия в динамике проведенных исследований (во времени) и по территории полигона (в пространстве) позволил выявить следующее. Так, из данных, представленных в таблице, видно, что в 2015 г. произошло некоторое увеличение содержания органического вещества в почве элементарных участков. При этом прослеживается тенденция к снижению содержания обменных форм Ca^{2+} и Mg^{2+}, подвижных форм P_2O_5 и K_2O, а также резкое уменьшение содержания аммонийного азота. Содержание нитратного азота сохранилось на уровне 2014 г. В условиях 2015 г. наиболее оптимальные агрохимические показатели зафиксированы на первом и третьем элементарных участках, хотя их урожайность была ниже. Такие же закономерности отмечены и в 2014 г.

В 2016 г. на тестовом полигоне выращивались многолетние травы (рис. 4). Средняя урожайность составила 260,9 ц га$^{-1}$. Наибольшей продуктивностью отличались второй и четвертый элементарные участки. Урожайность на втором участке составила 270,1 ц га$^{-1}$, на четвертом – 290,5 ц га$^{-1}$. Более низкими показателями продуктивности характеризовались первый и третий участки. Их урожайность составила 250,4 и 250,8 ц га$^{-1}$ соответственно.

Значение гидротермического коэффициента увлажнения в 2016 г. существенно увеличилось и составило 2,1, что соответствует зоне избыточного увлажнения.

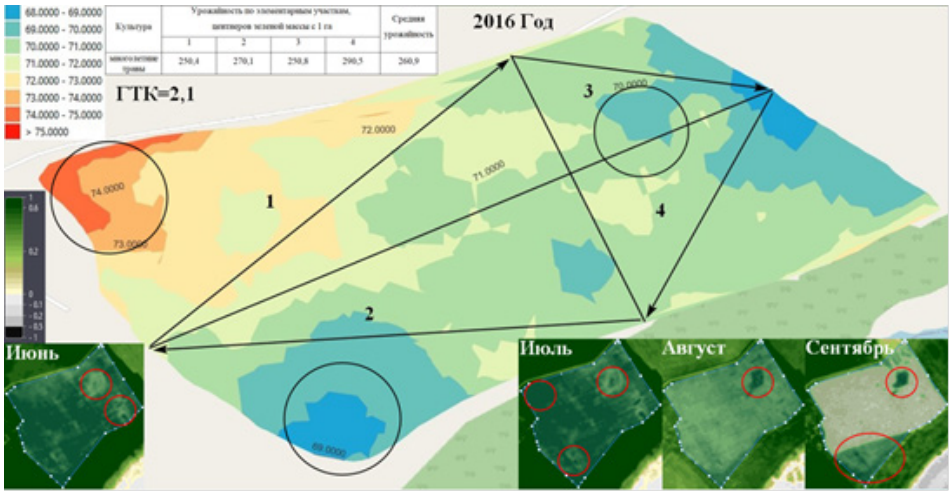


Рис. 4. Сопоставление показателей высоты со значениями NDVI и урожайностью

В условиях избыточного количества осадков мелиоративная осушительная система, представленная на данном полигоне закрытым дренажом, не справлялась с отводом избыточной влаги. На момент проведения обследования большинство распространенных на полигоне микропонижений были заполнены водой. Пахотный горизонт на большей части участка был перенасыщен влагой. Это хорошо прослеживается на снимках полей со значениями спектрального индекса NVDI. При этом можно отметить неравномерность распределения значений индекса NVDI по срокам наблюдения и элементарным участкам, что свидетельствует о неравномерном росте и развитии растений по территории полигона и во времени (рис. 4).

В 2016 г. зафиксировано незначительное увеличение содержания органического вещества в почве тестового полигона (до 3,79% на отдельных элементарных участках). Также необходимо отметить значительное снижение содержания обменных форм магния (до 0,86–1,03 ммоль 100 г$^{-1}$ почвы), что может крайне негативно отразиться на продуктивных свойствах почв. В остальном прослеживается тенденция к улучшению основных агрохимических показателей относительно 2014 и 2015 гг.

ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о том, что несмотря на более высокую обеспеченность элементами питания почв участков тестового полигона, находящихся на возвышенности, урожайность на них является более низкой по сравнению с менее обеспеченными участками. Полученные данные ставят под сомнение целесообразность принятой в настоящее время оценки неоднородности качества почв только по агрохимическим показателям. Исследования однозначно показывают, что агроландшафтные условия оказывают значительное влияние на распределение урожайности возделываемых культур по территории с неоднородным уклоном и различной высотой.

Наиболее высокие показатели урожайности отмечены на участках, расположенных в более низкой части полигона. Данная тенденция прослеживалась как в годы с недостаточной влагообеспеченностью (2014–2015 гг.), так и в 2016 году, характеризующемся избыточной влагообеспеченностью.

Результаты настоящего исследования подтверждают, что характер микро- и макрорельефа в совокупности с уровнем влагообеспеченности оказывает лимитирующее влияние на урожайность многолетних трав на тестовом полигоне. Это в свою очередь обосновывает важность учета агроландшафтных особенностей при проведении агроэкологического мониторинга и организации мероприятий в системе точного земледелия.

Список литературы

Вериго С. А., Разумова Л. А. Почвенная влага и ее значение в сельскохозяйственном производстве. Л.: Гидрометеоиздат, 1963. 289 с.

Гулинова Н. В. Методы агроклиматической обработки наблюдений. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 174 с.

Комаров А. А., Суханов П. А. О мониторинге плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения в условиях Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2010. № 21. С. 11–17.

Кирсанов А. Д., Комаров А. А. Агроэкологический мониторинг плодородия почв на примере полигона в хозяйстве ЗАО «Осьминское» Сланцевского района // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2021. № 4 (65). С. 69–79.

Кирсанов А. Д., Петрушин А. Ф., Комаров А. А. Оценка развития растительного покрова многолетних трав на основании сопряженных наземных измерений и данных дистанционного зондирования // Применение средств дистанционного зондирования земли в сельском хозяйстве. СПб.: Агрофизический научно-исследовательский институт РАСХН, 2018. С. 248–257.

Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М., 2003. 240 с.

Методические и организационные основы проведения агроэкологического мониторинга в интенсивном земледелии (на базе географической сети опытов). М.: ВИУА им. Прянишникова, 1991. 356 с.

Методическое руководство «Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий» / Под ред. академиков РАСХН В. И. Кирюшина и А. Л. Иванова. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2005. 784 с.

Методические указания по проведению локального мониторинга на реперных и контрольных участках. М.: Минсельхоз, 2006.

Методические указания по проведению локального мониторинга на реперных участках. М., 1996. 15 с.

Методические указания по проведению регистрационных испытаний агрохимикатов и регуляторов роста растений. М., 2005.

Савин И. Ю., Симакова М. С. Спутниковые технологии для инвентаризации и мониторинга почв в России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 104–115.

Heil K., Heinemann P., Schmidhalter U. Modeling the effects of soil variability, topography, and management on the yield of barley // Frontier in Environmental. 2018. Vol. 6, pp. 1–16.

Gopp N.V., Savenkov O.A. Relationships between the NDVI, yield of spring wheat, and properties of the plow horizon of eluviated clay-illuvial chernozems and dark gray soils // Eurasian soil science. 2019. Vol. 52. № 3. pp. 339–347.

References

Verigo S. A., Razumova L. A. *Pochvennaya vlaga i yeye znacheniye v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve* [Soil moisture and its importance in agricultural production]. L.: Gidrometeoizdat, 1963, 289 p.

Gulinova N. V. *Metody agroklimaticheskoy obrabotki nablyudeniy* [Methods of agroclimatic processing of observations]. L.: Gidrometeoizdat, 1974, 174 p.

Komarov A. A., Sukhanov P. A. O monitoringe plodorodiya pochv zemel' sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya v usloviyakh Leningradskoy oblasti [Monitoring of soil fertility of agricultural lands in the conditions of the Leningrad region] // *Izvestiya Sankt-Petersburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2010, no. 21, pp. 11–17.

Kirsanov A.D., Komarov A.A. Agroekologicheskiy monitoring plodorodiya pochv na primere poligona v khozyaystve ZAO «Os'minskoye» Slantsevskogo rayona [Agroecological monitoring of soil fertility on the example of a landfill of the farm JSC «Osminskoye» of the Slantsevskiy district] // I*zvestiya Sankt-Petersburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2021, no. 24(65), pp. 269–79.

Kirsanov A. D., Petrushin A. F., Komarov A.A. *Otsenka razvitiya rastitel'nogo pokrova mnogoletnikh trav na osnovanii sopryazhennykh nazemnykh izmereniy i dannykh distantsionnogo zondirovaniya* [Assessment of the development of the vegetation cover of perennial grasses on the basis of coupled ground measurements and remote sensing data] // Primeneniye sredstv distantsionnogo zondirovaniya zemli v sel'skom khozyaystve. Saint-Petersburg: Agrophysical Research Institute of the Russian Academy of Agricultural Sciences, 2018, pp. 248–257.

Metodicheskiye ukazaniya po provedeniyu kompleksnogo monitoringa plodorodiya pochv zemel' sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya [Methodological guidelines for the comprehensive monitoring of soil fertility of agricultural lands]. Moscow, 2003, 240 p.

Metodicheskiye i organizatsionnyye osnovy provedeniya agroekologicheskogo monitoringa v intensivnom zemledelii (na baze geograficheskoy seti opytov) [Methodological and organizational foundations for conducting agroecological monitoring in intensive farming (based on the Geographic network of experiments)]. Moscow: All-Russian Research Institute of Fertilizers and Agrosoil Science named after D. N. Pryanishnikov, 1991, 356 p.

Metodicheskoye rukovodstvo «Agroekologicheskaya otsenka zemel', proyektirovaniye adaptivno-landshaftnykh sistem zemledeliya i agrotekhnologiy» [Methodological guide «Agroecological assessment of lands, design of adaptive-landscape systems of agriculture and agricultural technologies»] / Edited by Academicians of the Russian Academy of Agricultural Sciences V. I. Kiryushin and A. L. Ivanov. Moscow: «Rosinformagrotech», 2005.

Metodicheskiye ukazaniya po provedeniyu lokal'nogo monitoringa na repernykh i kontrol'nykh uchastkakh [Methodical instructions for conducting local monitoring at reference and control sites]. Moscow: Ministry of Agriculture, 2006.

Metodicheskiye ukazaniya po provedeniyu lokal'nogo monitoringa na repernykh uchastkakh [Methodical instructions for conducting local monitoring at reference sites]. Moscow, 1996, 15 p.

Metodicheskiye ukazaniya po provedeniyu registratsionnykh ispytaniy agrokhimikatov i regulyatorov rosta rasteniy [Guidelines for the registration tests of agrochemicals and plant growth regulators]. Moscow, 2005.

Savin I. Yu., Simakova M. S. Sputnikovyye tekhnologii dlya inventarizatsii i monitoringa pochv v Rossii [Satellite technologies for inventory and monitoring of soils in Russia] // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, vol. 9, no. 5, pp. 104–115.

Heil K., Heinemann P., Schmidhalter U. Modeling the effects of soil variability, topography, and management on the yield of barley // Frontier in Environmental. 2018. Vol. 6. pp. 1–16.

Gopp N. V., Savenkov O. A. Relationships between the NDVI, yield of spring wheat, and properties of the plow horizon of eluviated clay-illuvial chernozems and dark gray soils // Eurasian soil science. 2019. Vol. 52. № 3. pp. 339–347.