

Использование индекса NDVI для оценки развития многолетних трав в условиях пространственно-временной неоднородности на торфяных почвах

А. Д. Кирсанов, А. А. Комаров

Агрофизический научно-исследовательский институт
Санкт-Петербург, 195220, Россия
E-mails: andrkkir88@gmail.com, Zelenydar@mail.ru

Представлены результаты использования нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) для оценки развития многолетних трав в условиях пространственно-временной неоднородности на территории тестового мониторингового полигона, расположенного на северо-западе Российской Федерации (Ленинградская обл.) на торфяных почвах. Оценка проводилась с помощью данных дистанционного зондирования Земли и наземных почвенно-агрохимических исследований на полигоне площадью 9,5 га, разбитом на четыре элементарных участка. Изучение осуществлялось в разных по агроклиматическим условиям сезонах с помощью различных ресурсов (система «Вега-Science» и продукт LandViewer). С использованием комплексного анализа агроэкологической оценки состояния территории полигона за 5 лет выявлены основные лимитирующие факторы. Установлено, что в условиях значительной неоднородности параметров почвенного плодородия торфяных почв и изменчивости погодных условий с помощью только агрохимических методов весьма затруднительно прогнозировать продуктивность и сроки уборки урожая многолетних трав. При проведении агроэкологического мониторинга определена целесообразность использования индекса NDVI для оценки развития многолетних трав в условиях пространственно-временной неоднородности на торфяных почвах.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования Земли, вегетационный индекс NDVI, карта высот, агроландшафтные особенности, агроэкологический мониторинг, агрохимическая характеристика, торфяные почвы, урожайность, микрорельеф, гидротермический коэффициент (ГТК)

Одобрена к печати: 19.02.2024
DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-143-155

Введение

В современном сельскохозяйственном производстве наряду с введением в эксплуатацию новейших систем обработки и анализа спутниковых снимков (Лупян и др., 2019) актуальным остаётся вопрос дешифровки полученных данных, в том числе для оценки развития многолетних трав в условиях пространственно-временной неоднородности на торфяных почвах.

Этот подход может быть реализован в сопряжённых наземных и дистанционных исследованиях. Так, начиная с 2008 г. Агрофизический научно-исследовательский институт (АФИ) организовал стационарную сеть тестовых полигонов по комплексному мониторингу земель сельскохозяйственного назначения (Кирсанов, Комаров, 2021, 2022; Суханов и др., 2013). Мониторинговые полигоны располагались на основных типах почв, характерных для сельскохозяйственных угодий Ленинградской обл. Полигоны размещались во всех агроклиматических регионах области. Таким образом, была сформирована сеть из 12 тестовых полигонов. На полигонах в течение каждого вегетационного сезона проводились широкомасштабные исследования с использованием сопряжённых наземных и дистанционных методов.

Перспектива использования индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) для оценки состояния растительного покрова не вызывает сомнений (Кирсанов и др., 2018; Лупян и др., 2019, 2021). Однако эти исследования базировались преимущественно на оценке состояния растений, возделываемых на минеральных почвах. Для оценки состояния растений, возделываемых на органогенных торфяных почвах, таких исследований почти не проводилось.

Цель исследований состояла в использовании индекса NDVI для оценки развития многолетних трав в условиях пространственно-временной неоднородности на торфяных почвах. В работе рассмотрен полигон ООО «Племенной завод «Новоладожский» Волховского р-на, который расположен в пределах Приладожской низменной равнины на послеледниковой озёрной террасе.

На полигоне возделывались многолетние травы, которые, как известно из работы (Синицина и др., 2013), являются основным кормовым ресурсом на северо-западе Российской Федерации. В структуре посевных площадей их доля составляет 55,3–60,4 % (при 12,5–13,0 % в РФ), а в структуре кормовых культур достигает 86 %.

Материалы, методы и объекты исследования

В работе рассматривается тестовый полигон, располагающийся на сельскохозяйственных угодьях ООО «Племенной завод «Новоладожский» Волховского р-на Ленинградской обл. (Комаров, Суханов, 2010). Расположение полигона и профиль рельефа местности представлены на *рис. 1*. Рельеф плоско выровненный, пониженный, с небольшим уклоном. Культура — многолетние травы. Участок полигона размещается в пределах кормового севооборота. Площадь составляет 9,5 га. Полигон условно разбит на четыре элементарных участка. Координаты: 60° 4' 17,40" с. ш. и 32° 17' 8,76" в. д.

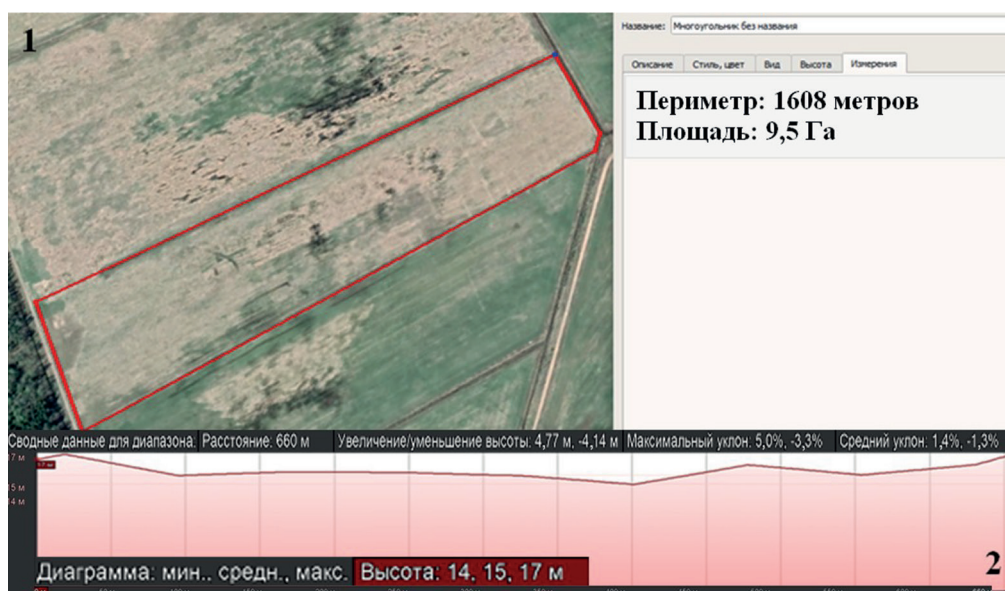


Рис. 1. Расположение полигона (1) и профиль высот (2)

Почва полигона — торфяная низинная (переходная) маломощная на озёрных песках. Мониторинговые исследования на тестовом полигоне проводились в соответствии с принятыми методическими указаниями (Методические..., 1991, 1996, 2003, 2005, 2006). Все виды анализов выполнялись по ГОСТ (Методическое..., 2005) в испытательной лаборатории АФИ.

Дистанционные исследования проводились с использованием системы «Вега-Science» (Лупян и др., 2021) и продукта LandViewer. Данные сервисы позволяют выполнять многоцелевые запросы и использовать доступные изображения наблюдения Земли с большого количества спутников, таких как Sentinel, Landsat и др. (Савин, Симакова, 2012). Оценка состояния травостоя проводилась с помощью вегетационного индекса NDVI. В работе приведены данные по сопряжённой оценке состояния травостоя многолетних трав за период 2017–2019 гг. Агрохимическая характеристика полигона представлена средними показателями за 5-летний период постоянных наблюдений (2015–2019).

Результаты и обсуждение

На основании ежегодных обследований территории полигона установлено, что агрохимическая характеристика почв была крайне неоднородна и имела неравномерные показатели как на территории полигона, так и по годам исследований (табл. 1).

Таблица 1. Средние агрохимические показатели по территории полигона

№	Органическое вещество, %	P ₂ O ₅ , мг/кг	K ₂ O, мг/кг	Ca ²⁺ , ммоль/100 г почвы	Mg ²⁺ , ммоль/100 г почвы	NO ₃ /NH ₄ , мг/кг
1	55,6	548	187	26,9	1,57	14,2/32,2
2	60,2	515	188	24,9	1,04	27,5/28,8
3	46,2	566	170	20,7	2,21	17,3/21,8
4	16,4	624	130	13,1	0,58	8,8/18,8
Хср	44,5	452,20	138,20	22,8	11,50	22,8/25,2
Сv	19,68	45,67	27,12	6,1	0,70	7,8/6,2
V, %	44,1	8,10	16,10	28,5	52	46,4/24,3

Примечание: P₂O₅ — оксид фосфора; K₂O — оксид калия; Ca — кальций; Mg — магний; NO₃/NH₄ — соединения азота нитрат/аммоний; Хср — среднее; Сv — коэффициент вариации; V — варьирование.

Значительный разброс агрохимических показателей был обусловлен неоднородностью почвенного покрова. На данном полигоне представлены органогенные торфяные почвы. Характеристика почвенного профиля дана в табл. 2. При этом степень минерализации органического вещества весьма неоднородна, как неоднородна и мощность торфяного слоя, а также распределение питательных элементов по генетическим горизонтам.

Таблица 2. Почвенный профиль торфяной низинной (переходной) почвы полигона

Генетический горизонт и его мощность, см	Органическое вещество, %	рН (KCl)	Нг, ммоль/100 г почвы	Обменные основания, ммоль/100 г почвы		Азот, мг/кг		Подвижные формы, мг/кг		
				Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	NO ₃	NH ₄	P ₂ O ₅	K ₂ O	
A _{пах}	0–19	50,5	5,8	0,58	4,75	0,69	28	2,7	310	120
T ₁	19–40	87,3	5,2	0,91	6,12	0,90	<2,8	3,4	120	80
T ₂	40–64	94,5	4,7	1,26	4,62	0,49		3,5	60	50
T ₃	64–87	91,4	4,7	2,11	8,25	0,33		8,5	30	40
T ₄	87–106	77,2	5,2	1,18	8,50	0,36		4,5	70	30
D _г	106–120	0,55	6,7	0,24	2,50	0,17		2,1	145	7

Примечание: рН (KCl) — кислотность раствора хлористого натрия; Нг, ммоль/100 г почвы — гидролитическая кислотность; A_{пах} — пахотный горизонт; T₁ — торфяной неразложенный; T₂ — средне разложенный; T₃ — торфяной разложенный; T₄ — перегнойный; D_г — подстилаящая порода, оглеенная; Ca⁺⁺ — кальций (обменный катион); Mg⁺⁺ — магний (обменный катион).

Наименьшее содержание органического вещества отмечено на элементарном участке № 4 (16,4 %). Наибольшее его содержание наблюдалось в центре полигона, на участке № 2 (60,2 %). Варьирование показателей по годам исследований имело незначительную степень неоднородности только на участке № 1 (6,42 %), средняя степень неоднородности отмечена на участке № 2 (10,54 %). На остальных участках полигона степень неоднородности

показателей по содержанию органического вещества в почве значительна. По содержанию подвижного фосфора только на участке № 3 (средневзвешенный показатель по годам исследований 566 мг/кг) зафиксирована средняя степень варьируемых показателей, коэффициент вариации 15,9 %. На остальных участках полигона отмечена высокая степень неоднородности показателей не только по содержанию подвижного фосфора, но и обменного калия, нитратного и аммонийного азота в почве.

Вариабельность содержания аммонийного азота в почве может быть связана с различной интенсивностью процессов аммонификации, а разброс показателей нитратного азота — с изменением процессов нитрификации и денитрификации, что определяется направленностью микробиологических процессов при изменении температуры воздуха и почвы.

Таким образом, на территории полигона представлена весьма значительная неоднородность агрохимических показателей, что подтверждают данные вариационного анализа (см. *табл. 1*). Известно (Демьянов, Савельева, 2010), что анализ и моделирование пространственных данных требуют применения комплексного подхода и различных методов, характеризующих ту или иную особенность явления. Сложность такого анализа обусловлена несколькими факторами: наличием больших объёмов количественной и качественной информации по исследуемому явлению, многомасштабностью и многопеременностью, различными факторами влияния. Причины, вызывающие значительную неоднородность оцениваемых показателей на территории полигона, весьма разнообразны. Среди них можно выделить природную неравномерность почвенного покрова, что связано с различной мощностью торфяного слоя и степенью его минерализации. Другой фактор, антропогенный, связан с использованием удобрений и, прежде всего, с неравномерным внесением по территории полигона жидкого навоза. Так, именно этот фактор (неравномерное внесение большого количества органических удобрений — жидкого навоза) определяет значительный разброс по содержанию подвижного фосфора и калия, азота и других подвижных элементов.

Сопряжённые с наземными исследованиями данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) (*рис. 1–4*) также демонстрируют весьма значительную неоднородность параметров почвенного плодородия и развития многолетних трав. Это создаёт трудности в проведении агротехнологических мероприятий (определении сроков и доз внесения удобрений, оптимальных сроков уборки урожая и др.). Таким образом, в условиях неоднородности параметров почвенного плодородия торфяных почв и изменчивости погодных условий весьма затруднительно прогнозировать продуктивность и сроки уборки урожая многолетних трав.

Решение проблемы возможно только при помощи новых инструментальных подходов, таких как методы геостатистики (Захарян, 2022; Комаров и др., 2021), и использования приёмов точного земледелия. Современная геостатистика — это широкий спектр статистических моделей и инструментов для анализа, обработки и представления пространственно распределённой информации (Cressie, 1993).

На основе применения методов геостатистики и сопряжённых с ними оценочных данных, полученных с помощью ДЗЗ, впервые проведена оценка показателей почвенного плодородия в связи с их высотным распределением по территории полигона, т. е. учтено влияние макро- и микрорельефа. Показано, что элементарные участки, на которые разделён полигон, имеют разный уровень высот (см. *рис. 1–3*). Первый и четвёртый участок являются наиболее высокими. Средний уровень высот на этих участках составляет 15–16 м над уровнем моря. Второй и третий — наиболее низкие участки со средним уровнем высот 15 м. Это, в свою очередь, обеспечивает разный уровень влагозапаса в условиях кратковременной засухи или избыточную обводнённость торфа в условиях избыточного увлажнения. Известно, что торф может накапливать и удерживать большое количество влаги (Парамонова и др., 2011). Поэтому на участках с большей мощностью торфяной массы в условиях переувлажнения складываются условия, неблагоприятные для уборки урожая.

В *табл. 3* представлена информация по средней урожайности элементарных участков тестового полигона в период с 2017 по 2019 г. Средняя урожайность по полигону в 2017 г. составила 29,1 ц/га кормовых единиц, варьируя в пределах от 26,2 ц/га (участок № 3) до 31,9 ц/га (участок № 1). В 2017 г. складывались неблагоприятные для уборки урожая погодные усло-

вия, вызванные обильными осадками и переувлажнением почв (ГТК = 1,95). Наибольшая урожайность была получена для самого высокого участка № 1, где растения менее страдали от избытка влаги.

Таблица 3. Урожайность многолетних трав на полигоне (кормовых единиц, ц/га)

Сельскохозяйственная культура	Урожайность кормовых единиц на участках, ц/га				Средняя урожайность, ц/га	Cv	ГТК
	1	2	3	4			
Многолетние травы (2017)	31,9	30	26,2	28,4	29,1	2,42	1,95
« « (2018)	38,1	39,7	42,8	40,5	40,3	1,96	1,1
« « (2019)	20,1	19,7	20,8	21,2	20,4	0,68	1

Примечание: ГТК — гидротермический коэффициент увлажнения Селянинова.

На рис. 2 представлена карта рельефа и изменение индекса NDVI (Кирсанов и др., 2018; Горр, Savenkov, 2019) на территории полигона за вегетационный сезон 2017 г.

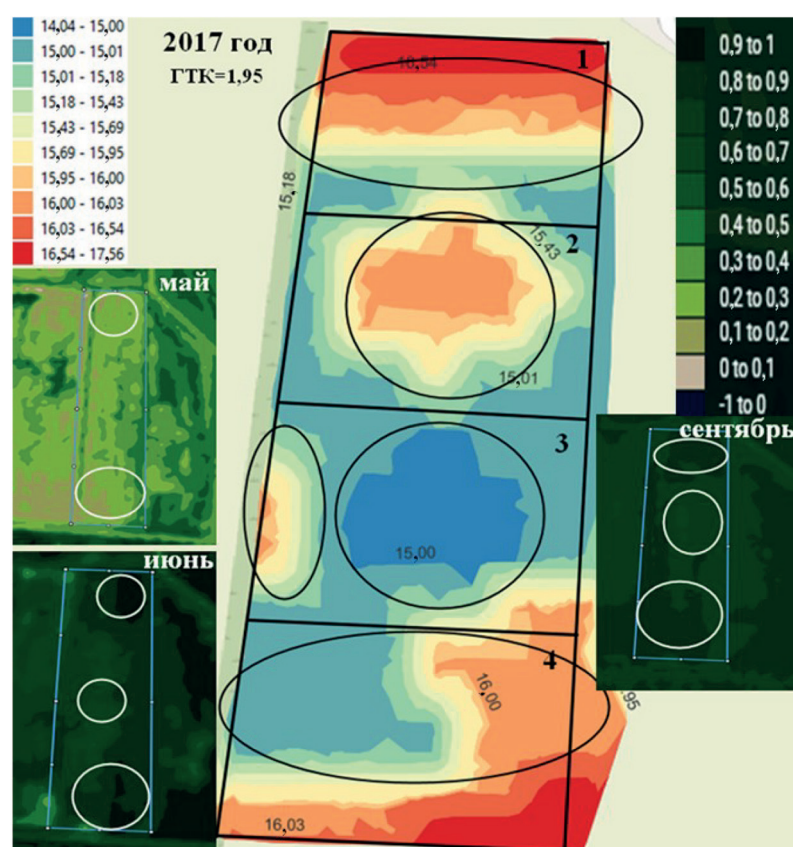


Рис. 2. Распределение индекса NDVI за вегетационный сезон 2017 г. в сочетании с картой высот

На основании анализа снимков рис. 2 можно отметить, что в мае индекс вегетации растений был на уровне 0,1–0,4 единицы, что указывает на недостаточное накопление хлорофилла и биомассы растений. Только в июне индекс вегетации достиг оптимального уровня 0,8–1,0 единиц, но обилие осадков не позволило собрать полноценный урожай. К сентябрю состояние травостоя по индексу NDVI хорошее, но уборка урожая была невозможна в связи с переувлажнением почвы. Таким образом, для анализа результатов необходимы не только показатели NDVI, но также данные о величине и распределении осадков в течение

сезона и данные о влажности почвы. Метеорологические показатели вегетационного сезона (табл. 4) подтверждают это заключение.

Метеорологические данные представлены по ближайшей метеостанции, расположенной в г. Сясьстрой, координаты: 60,137° с. ш., 32,569° в. д.

В табл. 4 данные сгруппированы по средним многолетним показателям максимальной и минимальной температуры для каждого месяца (левая часть таблицы). Для каждого года оценки также представлены показатели по максимальным и минимальным значениям. Относительно средних многолетних данных по распределению осадков по каждому году показатели представлены в виде превышения (выделено жёлтым) или снижения (выделено оранжевым) объёма осадков.

Из данных видно, что в условиях 2017 г. избыток накопления осадков наблюдался в июле (+63 мм) и августе (+27 мм). В то время как в условиях 2018 г. отмечался дефицит увлажнения, особенно в мае (−21 мм) и июне (−33 мм). В 2019 г. засушливые периоды (апрель, июнь, август) чередовались с периодами достаточного увлажнения.

Таблица 4. Метеорологические показатели за 2017–2019 гг.

Месяц	2017 г.		2018 г.			2019 г.			Средние многолетние			
	Температура (Т), °С		Температура (Т), °С		Осадки (W), мм	Температура (Т), °С		Осадки (W), мм	Температура (Т), °С		Осадки (W), мм	
	мин.	макс.	мин.	макс.		мин.	макс.		мин.	макс.		
Апрель	−26	4	45	−25	−1	33	−12	4	−24	1	9	38
Май	−15	8	−33	−24	4	−21	−14	9	9	7	16	56
Июнь	−7	15	6	−10	20	−33	−3	20	−33	12	20	73
Июль	−2	23	63	3	26	0	1	27	0	15	23	57
Август	2	24	27	4	28	12	6	31	−24	13	21	76
Сентябрь	8	26	9	9	31	9	6	28	0	9	15	53
Хср	−6,7	16,7	19,5	−7,2	18	0	−2,7	19,8	−18	9,5	17,3	58,8
Сv	12,29	9,15	33,6	14,82	13,37	23,84	8,71	11,05	17,07	5,04	5,08	13,96

Значение ГТК в 2017 г. составило 1,95. Это говорит о том, что полигон находится в зоне избыточного увлажнения. Необходимо отметить, что в среднем ГТК для данной климатической зоны составляет 1,5–1,6 (Вериго, Разумова, 1963; Гулинова, 1974). Следовательно, в 2017 г. на территории тестового полигона наблюдалось избыточное переувлажнение. Поэтому наибольшая урожайность была отмечена на первом, наиболее высоком участке, имеющем пологий склон (высоты 16–17,5 м). Именно на этом участке наблюдалось наименьшее переувлажнение в дождливый период и урожайность была на 9,6 % выше относительно средней по полигону. На втором участке, имеющем уровень высот 15,5–16,5 м, степень переувлажнения была несколько выше, что сказалось на снижении урожайности до 30 ц/га. На третьем, наиболее низком участке (15–16 м), отмечен самый высокий уровень переувлажнения, что способствовало снижению урожайности на 10 %. Таким образом, в условиях переувлажнения основным лимитирующим фактором, обеспечивающим урожайность многолетних трав, был уровень высот, где на наиболее высоких участках урожайность выше примерно на 10 %, а на низинных — ниже на 10 %.

На протяжении вегетационного периода 2018 г. складывались вполне благоприятные погодные условия для роста и уборки многолетних трав с ГТК = 1,1. Средняя урожайность многолетних трав по участкам составила 40,3 ц/га кормовых единиц. Отмечено, что в отличие от предыдущего года исследований обильная вегетация и накопление хлорофилла до 0,7–1,0 единиц NDVI наблюдалась уже в мае. Это обеспечило раннее формирование урожая и первый укос, который был проведён в начале июня. Это подтверждает космоснимок рис. 3 (см. с. 149), где видно, что вегетационный индекс в июне снижается до 0,4–0,6 единиц, что

характеризует отчуждение (уборку) биомассы растений. В июле вновь наблюдается нарастающие вегетационного индекса до 0,8–1,0 единиц, т.е. обильное накопление фитомассы и хлорофилла, что способствовало проведению второго укоса. К августу индекс вегетации вновь снижается до 0,6–0,8 единиц.

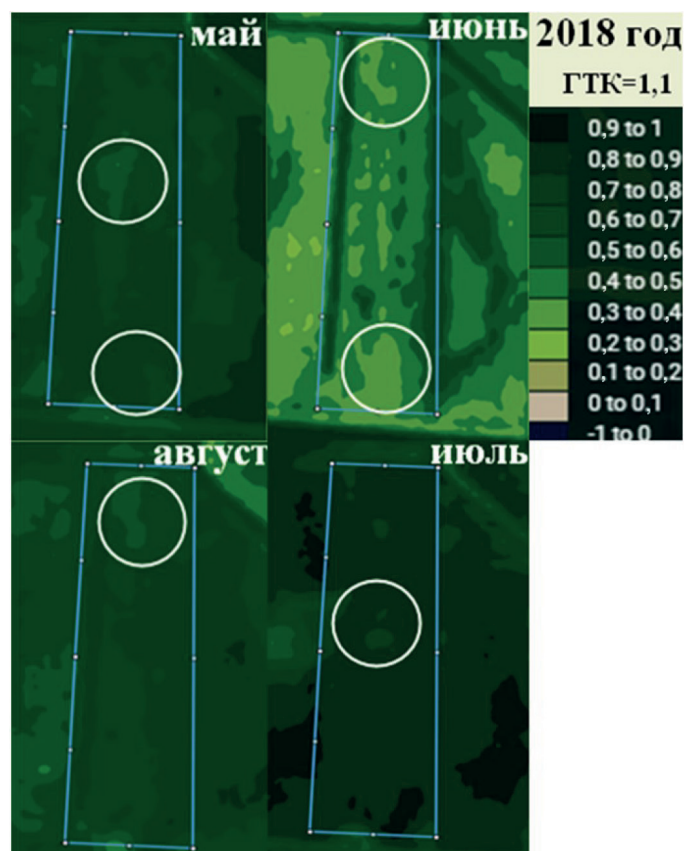


Рис. 3. Распределение индекса NDVI за вегетационный сезон 2018 г.

В условиях 2019 г., когда уровень ГТК = 1,0 обеспечивал режим осушения, вполне ожидаемо было получение двух полноценных укосов многолетних трав. Однако средняя урожайность многолетних трав по полигону в условиях сезона 2019 г. (20,5 ц/га кормовых единиц) была значительно (более чем в два раза) ниже, чем в условиях 2018 г. (40,3 ц/га кормовых единиц). Кроме отмеченного факта по распределению средневзвешенных показателей по элементарным участкам полигона следует выделить тренд уменьшения содержания обменного магния по годам исследований. В условиях 2019 г. содержание магния в почве снизилось до критически малых показателей (менее 0,1 ммоль/100 г). Поэтому именно недостаток магния оказался основным лимитирующим фактором, приводящим к снижению урожая в условиях 2019 г. Известно, что при недостатке магния в растении нарушается процесс образования хлорофилла, что вызывает хлороз (пожелтение и другие изменения цвета) и мраморность листьев, тормозится синтез азотосодержащих соединений, снижается количество аскорбиновой кислоты и глюкозы, растения отстают в росте и развитии. Кроме того, если в почве мало магния при высокой концентрации азота, фосфора и калия, то в растениях накапливаются нитраты (Русанов, 2004).

Показательно, что в условиях 2019 г. данные ДЗЗ (см. рис. 4, см. с. 150) демонстрируют значительное снижение индекса NDVI, характеризующего накопление хлорофилла и, соответственно, магния как его элементной основы. В мае индекс вегетации составлял менее 0,4–0,7 единиц по элементарным участкам полигона. К июню он возрастал до 0,7–0,8, указывая на неполную насыщенность трав хлорофиллом, а к августу падал до 0,3–0,5 единиц.

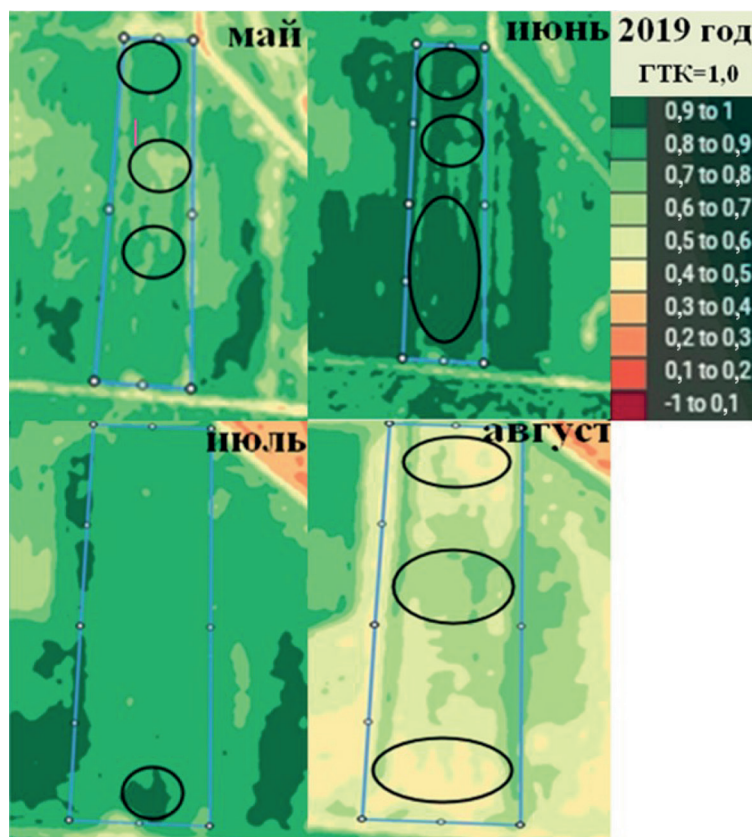


Рис. 4. Распределение индекса NDVI за вегетационный сезон 2019 г.

Таким образом, на основании сопряжённых наземных и дистанционных исследований удалось установить, что основным лимитирующим фактором в условиях вегетационного сезона 2019 г. был недостаток магния. Средневзвешенные показатели за 5 лет проведённых исследований показывают, что его содержание крайне незначительно (см. табл. 1). Кроме того, в 2019 г. на всех ключевых участках полигона содержание обменного магния снизилось до предельно малых величин (меньше 0,1 ммоль/100 г) (рис. 5).

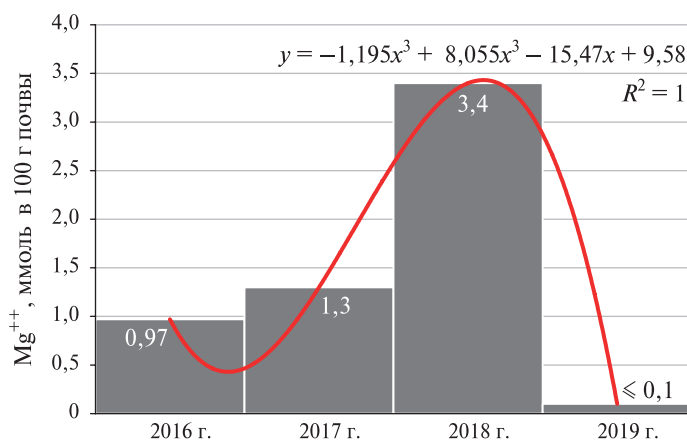


Рис. 5. Динамика содержания магния на полигоне

Действительно, низкое содержание магния в органогенных торфяных почвах — известный факт (Методические..., 2017). Если в условиях 2018 г., хотя и наблюдался дефицит магния, но он ещё не был критическим, то в условиях 2019 г. прогрессирующий его дефицит

не восполнялся своевременным внесением магнийсодержащих удобрений, поэтому недостаток магния сдерживал рост и развитие растений. Показано (Федотов, 2008), что культурные растения с урожаем выносят 12–38 кг магния с одного гектара. Возделываемые сельскохозяйственные растения без магниевых удобрений будут испытывать магниевое голодание в первую очередь как на почвах лёгкого механического состава, так и на торфяно-болотных. Доказано (Методические..., 2017), что при низком содержании магния за 4–5 лет запас подвижных соединений этого питательного элемента в почве может быть полностью исчерпан, он перейдёт в первый минимум и без внесения магниевых удобрений станет невозможным получение полноценного урожая.

Именно недостаток магния в почве привёл к потере урожая и снижению его качества. Известно, что нарушение зоотехнических требований к качеству кормов приводит к заболеланию «пастбищной тетанией» дойных коров, которым в наибольшей степени необходим магний (Методические..., 2017). Действительно, анализ качества трав за годы исследований показал уменьшение накопления магния в растениях с 0,257 % (в абсолютно сухом весе) до 0,124–0,108 %. При этом соотношение Са к Mg за годы исследований возрастало с 3,36 до 4,15–8,17 в сторону увеличения доли кальция и уменьшения магния. Снижение качества кормовых трав сопровождалось уменьшением содержания протеина с 22,66–15,19 до 6,04 %, жира — с 8,17–4,94 до 4,15 %, сахаров — с 4,10–3,36 до 2,32 %. При этом возрастало содержание сырой клетчатки с 27,8–30,6 до 32,25 %.

Таким образом, при использовании NDVI можно отметить, что по состоянию травостоя в 2019 г. отчётливо проявляется снижение показателя вегетационного индекса (относительно предыдущих сезонов 2017–2018 гг.), что, скорее всего, связано с недостатком магния, обеспечивающего функционирование фотосинтеза. Без восполнения этого элемента внесением магнийсодержащих удобрений и мелиорантов можно прогнозировать дальнейшее снижение урожайности не только многолетних трав, но и любых возделываемых на данной территории культур. Представленные данные согласуются с результатами ранее проведённых исследований (Кирсанов, Комаров, 2021, 2022).

Выводы

Впервые в условиях пространственно-временной неоднородности на торфяных почвах представлены результаты использования индекса NDVI для оценки развития многолетних трав. С использованием комплексного анализа состояния территории полигона с помощью сопряжённых ДЗЗ и наземных почвенно-агрохимических методов выявлены основные факторы, лимитирующие урожайность многолетних трав.

В результате проведённых исследований за 2017–2019 гг. можно сделать вывод, что лимитирующие факторы, сдерживающие биопродуктивность многолетних трав, весьма разнообразны.

В условиях неоднородности микрорельефа выявлена значительная вариабельность параметров почвенного плодородия как по территории полигона, так и за разные годы исследований. Это делает весьма затруднительным оценку полученных эмпирических данных с помощью стандартных методов почвенно-агрохимического анализа.

Решением проблемы становится применение методов геостатистики с использованием данных ДЗЗ по индексу NDVI, картам высот как по различным элементарным участкам (кластерам), так и в течение проводимых исследований.

На основании такого сопряжённого анализа установлена взаимосвязь между особенностями микрорельефа полигона и уровнем влагообеспеченности. Это повлияло на урожайность возделываемых культур. Так, в условиях вегетационного сезона 2017 г. с ГТК = 1,95 основным лимитирующим урожайность фактором оказалось переувлажнение органогенных почв полигона. В условиях переувлажнения на наиболее высоких участках урожайность была выше примерно на 10 %, а на низинных — ниже на 10 %. При оптимальном влагообеспечении с ГТК = 1,1 (2018) распределение урожайности уже не столь тесно связано с микрорельефом.

ефом местности, здесь большее значение имеют показатели почвенного плодородия, которые и выступают в качестве основного лимитирующего фактора.

Известно, что при недостатке магния в растениях нарушается процесс образования хлорофилла. Это вызывает хлороз листьев, что явно прослеживается по индексу NDVI. Таким образом, на основании сопряжённых наземных данных (агрохимическая характеристика и урожайность) и ДЗЗ по индексу NDVI можно сделать вывод, что в условиях 2019 г. недостаток магния оказался основным лимитирующим фактором урожайности многолетних трав.

Литература

1. *Вериго С. А., Разумова Л. А.* Почвенная влага и ее значение в сельскохозяйственном производстве. Л.: Гидрометеиздат, 1963. 289 с.
2. *Гулинова Н. В.* Методы агроклиматической обработки наблюдений. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 174 с.
3. *Демьянов В. В., Савельева Е. А.* Геостатистика: теория и практика. М.: Наука, 2010. 327 с.
4. *Захарян Ю. Г.* Геостатистика: изменение климата и агротехнологии. СПб.: Наука, 2022. 455 с.
5. *Кирсанов А. Д., Комаров А. А.* Агроэкологический мониторинг плодородия почв на примере полигона в хозяйстве ЗАО «Осьминское» Сланцевского района // Изв. Санкт-Петербургского гос. аграр. ун-та. 2021. № 4(65). С. 69–79. DOI: 10.24412/2078-1318-2021-4-69-79.
6. *Кирсанов А. Д., Комаров А. А.* Целесообразность учета агроландшафтных особенностей при проведении агроэкологического мониторинга // Агрофизика. 2022. № 2. С. 1–6. DOI: 10.25695/AGRPH.2022.02.01.
7. *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.: Агрофиз. научно-исслед. ин-т РАСХН, 2018. С. 248–257. DOI: 10.25695/agrophysica.2018.2.18806.
8. *Комаров А. А., Суханов П. А.* О мониторинге плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения в условиях Ленинградской области // Изв. Санкт-Петербургского гос. аграр. ун-та. 2010. № 21. С. 11–17.
9. *Комаров А. А., Захарян Ю. Г., Ирмулатов Б. Р.* Оценка и аналитическая аппроксимация вариограмм для сельскохозяйственных полей в условиях Акмолинского региона Казахстана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 182–191. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-182-191.
10. *Лузян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А. и др.* Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
11. *Лузян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А. и др.* Система «Вега-Science»: особенности построения, основные возможности и опыт использования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 9–31. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31.
12. Методические и организационные основы проведения агроэкологического мониторинга в интенсивном земледелии (на базе Географической сети опытов). М.: ВИУА имени Д. Н. Прянишникова, 1991. 356 с.
13. Методические указания по проведению локального мониторинга на реперных участках. М., 1996. 15 с.
14. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М., 2003. 240 с.
15. Методические указания по проведению регистрационных испытаний агрохимикатов и регуляторов роста растений. М., 2005.
16. Методические указания по проведению локального мониторинга на реперных и контрольных участках. М.: Минсельхоз, 2006.
17. Методические рекомендации по применению сульфата магния в сельскохозяйственном производстве. М., 2017. 27 с.
18. Методическое руководство «Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий» / под ред. В. И. Кириюшина, А. Л. Иванова. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2005. 784 с.
19. *Парамонова Е. Ю., Щербакова Л. Ф., Наумов П. В.* Анализ водоудерживающей способности природных и синтетических сорбентов // Изв. Самарского науч. центра Российской акад. наук. 2011. Т. 13. № 1(5). С. 1277–1279.

20. Русанов А. М. Растениям необходим магний // Картофель и овощи. 2004. № 2. С. 16–17.
21. 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.
22. Синицина С. М., Данилова Т. Н., Тюкалов Ю. А. Состояние кормопроизводства на Северо-Западе РФ и приоритеты научного обеспечения отрасли // Ресурсосберегающие технологии в луговом кормопроизводстве: сб. науч. тр. СПб., 2013. С. 224–232.
23. Суханов П. А., Комаров А. А., Кирсанов А. Д. Динамика изменения агрохимических свойств почв на тестовых полигонах Ленинградской области // Изв. Санкт-Петербургского гос. аграр. ун-та. 2013. № 33. С. 12–19.
24. Федотов В. Л. Сравнительная характеристика биогеохимии магния в ландшафтах Белорусского Поозерья // Ученые записки УО «ВГУ им. П. М. Машерова». Естественные науки. Биология. 2008. Т. 7. С. 269–277.
25. Cressie N. A. C. Statistics for Spatial Data. N. Y.: Wiley, 1993. 900 p.
26. 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. V. 52. No. 3. P. 339–347. DOI: 10.1134/S1064229319030050.

Using the NDVI index to assess the development of perennial grasses under conditions of spatial and temporal heterogeneity

A. D. Kirsanov, A. A. Komarov

Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg 195220, Russia
E-mails: andrkkir88@gmail.com, Zelenydar@mail.ru

The paper presents results of using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to assess the development of perennial grasses in conditions of spatiotemporal heterogeneity on the territory of a test monitoring site located in the north-west of the Russian Federation (Leningrad region) on peat soils. The assessment was carried out using ground research and Earth remote sensing data on a test site with an area of 9.5 hectares, divided into 4 elementary sections. The study was carried out in seasons with different agroclimatic conditions using various resources (Vega-Science System and LandViewer). Using a comprehensive analysis of the agroecological assessment of the condition of the landfill territory over 5 years, the main limiting factors were identified. The assessment was carried out using remote sensing and ground soil-agrochemical studies. It has been established that, under conditions of significant heterogeneity in the parameters of soil fertility of peat soils and variability of weather conditions, using only agrochemical methods, it is very difficult to predict the productivity and timing of harvesting perennial grasses. When conducting agroecological monitoring, the feasibility of using the NDVI index to assess the development of perennial grasses in conditions of spatiotemporal heterogeneity on peat soils was determined.

Keywords: Earth remote sensing data, NDVI vegetation index, elevation map, agrolandscape features, agroecological monitoring, agrochemical characteristics, peat soils, productivity, microrelief, hydrothermal coefficient (HTC)

Accepted: 19.02.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-143-155

References

1. Verigo S. A., Razumova L. A., *Pochvennaya vlaga i ee znachenie v sel'skokhozyaistvennom proizvodstve* (Soil moisture and its importance in agricultural production), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1963, 289 p. (in Russian).

2. Gulina N. V., *Metody agroklimaticheskoi obrabotki nablyudenii* (Methods for agroclimatic processing of observations), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1974, 174 p. (in Russian).
3. Dem'yanov V. V., Savel'eva E. A., *Geostatistika: teoriya i praktika* (Geostatistics: theory and practice), Moscow: Nauka, 2010, 327 p. (in Russian).
4. Zakharyan Yu. G., *Geostatistika: izmenenie klimata i agrotekhnologii* (Geostatistics: climate change and agricultural technologies), Saint Petersburg: Nauka, 2022, 455 p. (in Russian).
5. Kirsanov A. D., Komarov A. A., Agroecological monitoring of soil fertility on the example of a test site in the farm of ZAO Osminskoe, slantsevsky district, *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2021, No. 4(65), pp. 69–79 (in Russian), DOI: 10.24412/2078-1318-2021-4-69-79.
6. Kirsanov A. D., Komarov A. A., Accounting on agro-landscape peculiarities when conducting agroecological monitoring, *Agrofizika*, 2022, No. 2. pp. 1–6 (in Russian), DOI: 10.25695/AGRPH.2022.02.01.
7. Kirsanov A. D., Petrushin A. F., Komarov A. A., Estimation of vegetation cover development of perennial grasses based on coupled ground measurements and remote sensing data, *Application of Earth remote sensing in agriculture*, Saint Petersburg: Agrofizicheskii nauchno-issledovatel'skii institut RASKHN, 2018, pp. 248–257 (in Russian), DOI: 10.25695/agrophysica.2018.2.18806.
8. Komarov A. A., Sukhanov P. A., On monitoring soil fertility of agricultural lands in the Leningrad region, *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2010, No. 21, pp. 11–17 (in Russian).
9. Komarov A. A., Zakharyan Yu. G., Irmulatov B. R., Evaluation and analytical approximation of variograms for agricultural fields in the conditions of the Akmolinsky Region of Kazakhstan, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 3, pp. 182–191 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-182-191.
10. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A. et al., Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
11. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A. et al., Vega-Science system: design features, main capabilities and usage experience, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 6, pp. 9–31 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31.
12. *Metodicheskie i organizatsionnye osnovy provedeniya agroekologicheskogo monitoringa v intensivnom zemledelii (na baze Geograficheskoi seti opytov)* (Methodological and organizational basis for conducting agroecological monitoring in intensive farming (based on the Geographical Network of Experiments)), Moscow: VIUA im. D. N. Pryanishnikova, 1991, 356 p. (in Russian).
13. *Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu lokal'nogo monitoringa na repnykh uchastkakh* (Guidelines for conducting local monitoring at reference sites), Moscow, 1996, 15 p. (in Russian).
14. *Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu kompleksnogo monitoringa plodorodiya pochv zemel' sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya* (Methodological guidelines for conducting comprehensive monitoring of soil fertility on agricultural lands), Moscow, 2003, 240 p. (in Russian).
15. *Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu registratsionnykh ispytaniy agrokhimikatov i regulyatorov rosta rastenii* (Guidelines for conducting registration tests of agrochemicals and plant growth regulators), Moscow, 2005 (in Russian).
16. *Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu lokal'nogo monitoringa na repnykh i kontrol'nykh uchastkakh* (Guidelines for conducting local monitoring at reference and control sites), Moscow: Minsel'khoz, 2006 (in Russian).
17. *Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu sul'fata magniya v sel'skokhozyaistvennom proizvodstve* (Guidelines for the use of magnesium sulfate in agricultural production), Moscow, 2017, 27 p. (in Russian).
18. *Metodicheskoe rukovodstvo "Agroekologicheskaya otsenka zemel', proektirovanie adaptivno-landshaftnykh sistem zemledeliya i agrotekhnologii"* (Methodological guide "Agroecological assessment of land, design of adaptive landscape farming systems and agricultural technologies"), V. I. Kiryushin, A. L. Ivanov (eds.), Moscow: FGNU "Rosinformagrotekh", 2005, 784 p. (in Russian).
19. Paramonova E. Yu., Shcherbakova L. F., Naumov P. V., Analysis of water-holding ability of natural and synthetic sorbents, *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2011, Vol. 13, No. 1(5), pp. 1277–1279 (in Russian).
20. Rusanov A. M., Plants need magnesium, *Kartofel' i ovoshchi*, 2004, No. 2, pp. 16–17 (in Russian).
21. Savin I. Yu., Simakova M. S., Satellite technologies for inventory and monitoring of soils in Russia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 104–115 (in Russian).
22. Sinitsina S. M., Danilova T. N., Tyukalov Yu. A., The state of feed production in the North-West of the Russian Federation and the priorities of scientific support for the industry, *Resursosberegayushchie tekhnologii v lugovom kormoproizvodstve*, Saint Petersburg, 2013, pp. 224–232. (in Russian).

23. Sukhanov P. A., Komarov A. A., Kirsanov A. D., Dynamics of changes in agrochemical properties of soils at test sites in the Leningrad region, *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2013, No. 33, pp. 12–19 (in Russian).
24. Fedotov V. L., Comparative characteristics of magnesium biogeochemistry in the landscapes of the Belarusian Lake District, *Uchenye zapiski UO "VGU im. P. M. Masherova"*, *Estestvennye nauki, Biologiya*, 2008, Vol. 7, pp. 269–277 (in Russian).
25. Cressie N. A. C., *Statistics for Spatial Data*, New York: Wiley, 1993, 900 p.
26. 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, No. 3, pp. 339–347, DOI: 10.1134/S1064229319030050.