

ВЛИЯНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОЛЯ НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ СОРНЫХ РАСТЕНИЙ

А. М. Шпанев, В. В. Смук, А. Ф. Петрушин

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»

195220, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14

E-mail: ashpanev@mail.ru; vvsruk@mail.ru; alfiks@mail.ru

Поступила в редакцию 02 марта 2020 г., принята к печати 25 ноября 2020 г.

В результате исследований по оценке засоренности агроценозов Меньковского филиала Агрофизического НИИ (Ленинградская обл., Гатчинский район), проводимых с помощью традиционных и современных методов, выявлено выраженное влияние микрорельефа на характер пространственного размещения сорных растений, произрастающих на паровом поле. На участках с микропонижениями рельефа зафиксировано низкое видовое (6–12 видов м^{-2}) и численное (156–368 экз. м^{-2}) обилие, а также проективное покрытие (6–12%) сорных растений. При этом от особенностей микрорельефа поля в большей степени зависело размещение малолетних видов сорных растений, чем многолетников, для которых характерно ярко выраженное произрастание куртинами. Полученные выводы подтверждаются цифровыми картами распространения сорных растений по территории обследуемого поля, а также высокими коэффициентами вариации и агрегации, которые для малолетников изменялись в пределах 26,1–409% и 8,0–9,1, для многолетников – 62,3–445,8% и 4,8–7,4. Установлено, что выявленную пространственную неоднородность размещения сорных растений на паровом поле можно визуализировать при дистанционной съемке, проводимой с помощью беспилотного летательного аппарата. Участки с микропонижениями рельефа за счет малого количества произрастающих сорных растений, их проективного покрытия и фитомассы имели в 2,3 и 3,1 раза меньшие значения вегетационного индекса NDVI по сравнению с большей частью поля и его сильнозасоренными участками. Полученные результаты подтверждают целесообразность использования индекса NDVI для выявления характера пространственного размещения сорной растительности и проведения пространственно-дифференцированных гербицидных обработок в паровом поле. Индекс NDVI на средне- и сильнозасоренных участках поля, подлежащих обработке гербицидами, варьировался от 0,17 до 0,52.

Ключевые слова: паровое поле, микрорельеф поля, сорные растения, дистанционный мониторинг засоренности, пространственная структура засоренности, вегетационный индекс NDVI.

INFLUENCE OF FIELD MICRORELIEF ON SPATIAL DISTRIBUTION OF WEEDS

A. M. Shpanev, V.V. Smuk, A.F. Petrushin

Agrophysical Research Institute

14, Grazhdanskiy pr., Saint-Petersburg, 195220

E-mail: ashpanev@mail.ru; vvsruk@mail.ru; alfiks@mail.ru

As a result of the weed distribution estimation in the agrocenoses of the Menkovo branch of the Agrophysical Research Institute (Leningrad Region, Gatchinsky District), carried out using traditional and contemporary methods, it was revealed that the microrelief has a pronounced influence on the character of the spatial distribution of weeds growing on a fallow field. A low species (6–12 species m^{-2}) and numerical (156–368 number m^{-2}) abundance, as well as low canopy cover (6–12%) of weeds, were found on the sites with the relief microdepressions. Additionally, the distribution of annual and biennial weeds depended more on the features of the field microrelief than the distribution of the perennial weeds. The latter are characterised by a pronounced growth in distinct groups. The obtained conclusions are confirmed by contour maps of the weeds spatial distribution over the territory of the research field, as well as by high coefficients of variation (which varied within 26.1–409% for annual and biennial weeds, and within 62.3–445.8% – for perennials) and aggregation (8.0–9.1 for annual and biennial weeds and 4.8–7.4 – for perennials). It was confirmed that the revealed spatial heterogeneity of the weeds distribution over a fallow field could be visualized using remote shooting carried out with an unmanned aerial vehicle. The sites with the relief microdepressions due to a small number of growing weeds, their canopy cover and phytomass had values of the vegetation index NDVI 2.3 and 3.1 times lower in comparison to the largest part of the field and its heavily weeded areas. The obtained results confirm that the NDVI index can be used to identify the character of the weeds spatial distribution and can support the spatially differentiated herbicide treatments in a fallow field. The NDVI index at the moderately and heavily weeded sites, subjected for the herbicide treatment, varied from 0.17 to 0.52.

Key words: fallow field, field microrelief, weeds, remote monitoring of weed distribution, spatial structure of weed distribution, vegetation index NDVI.

ВВЕДЕНИЕ

Сорные растения являются группой организмов, оказывающей наиболее значимое вредоносное

воздействие на сельскохозяйственные культуры, что подтверждается ежегодными сводками потерь урожая и сведениями об объемах применения гербицидов в нашей

стране. Сокращение обрабатываемых площадей сельскохозяйственных угодий и гербицидной нагрузки на агроценозы является необходимым условием для получения экологически чистой продукции, а также сохранения здоровья людей и окружающей среды. Система точного земледелия как наиболее прогрессивная из всех существующих позволяет добиться существенной экономии применяемых гербицидов и других средств защиты растений, что убедительно показано на примере передовых зарубежных стран (Timmermann et al., 2003; Yang et al., 2003; Rider et al., 2006; Franco et al., 2017).

Широкое внедрение системы точного земледелия в нашей стране сдерживается по нескольким причинам, одной из которых является недостаток знаний об особенностях пространственного распространения в агроценозах вредных организмов, включая сорные растения. Между тем из литературных источников известно, что неоднородность пространственного размещения сорных растений на возделываемых полях обусловлена различным содержанием элементов питания, а также влагообеспеченностью и кислотностью почвы (Рогожникова, Шпанев, 2014; Шпанев, Смур, 2019; Mortensen et al., 1992; Wartenberg, 1995; Pluschkel, Pallutt, 1996; Hurle, 1998). Гетерогенность пространственного распространения сорных растений на полях также может быть связана с неравномерной глубиной обработки почвы, неравномерным высевом семян, внесением органических и минеральных удобрений (Biller, 1994; Wartenberg, 1996; Izquierdo et al., 2009). На пространственное распределение сорных растений могут оказывать влияние ландшафт, рельеф, а также микрорельеф поля, определяющие приток тепла и влаги, промывной режим, а, следовательно, и содержание доступных элементов питания. Например, известно, что наибольшее количество сорных растений произрастает на наиболее обеспеченных теплом таксонах рельефа, а именно на юго-восточной и северо-западной частях водоразделов. Склон северной экспозиции во основном засорен многолетниками, а наименьшее количество однолетних сорняков произрастает в пониженной части агроландшафта (Родионова, 2002; Назранов, Хуцинова, 2018).

Изучение данных вопросов является весьма актуальным и имеет важное значение при реализации научно обоснованного подхода к защите возделываемых культур от сорной растительности и внедрении элементов точного земледелия в сельскохозяйственное производство нашей страны. При этом для изучения особенностей пространственного размещения сорных растений лучше всего подходит паровое поле, поскольку оно освобождено от культурной растительности и на нем складываются наиболее благоприятные условия для прорастания самых разных видов сеgetалов, семена и вегетативные зачатки которых находятся в пахотном горизонте.

Цель исследований заключалась в выявлении особенностей пространственного размещения сорных растений в зависимости от микрорельефа поля с помощью традиционных и современных методов оценки засоренности агроценозов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение особенностей пространственного размещения сорных растений в зависимости от микрорельефа проводилось в 2017 г. на паровом поле, расположенном в непосредственной близости от агроэкологического стационара Меньковского филиала Агрофизического НИИ (Ленинградская обл., Гатчинский р-н). Площадь поля составляет 1,4 га, оно имеет сложный рельеф из-за общего уклона в 5° и нескольких микропонижений, находящихся в центральной части и краевой зоне. Понижения хорошо просматриваются визуально как непосредственно на поле, так и на аэрофотоснимках за счет более светлого фона почвы, обусловленного длительными периодами избыточного увлажнения и недостатком основных элементов питания. Произрастающие на данных участках культуры подвержены заметному угнетению роста и развития, что отражается на формировании вегетативной массы и продуктивности. Попытка определить величину изменений микрорельефа с помощью картограммы цифровой модели рельефа оказалась несостоятельной из-за того, что изменения являлись слишком незначительными. При этом хорошо просматривался общий уклон поля и перепад высот между его верхней и нижней частями.

Для достижения поставленной цели на всей территории поля были выделены 124 элементарных участка площадью 8×8 м, что является величиной кратной ширине опрыскивателя. В середине каждого из участков путем наложения учетной рамки 0,25 м² проводилось определение видового и численного состава сорных растений, а также их проективного покрытия. Данная операция проводилась в начальный период роста сорных растений, когда у малолетних двудольных видов насчитывалось 2–4 настоящих листа, а многолетние двудольные находились в фазе розетки (7 июня). С помощью GPS-приемника AgGPS-132 фирмы Trimble (точность геоопозиционирования до 0,5 м) были получены координаты каждой учетной точки, которые в дальнейшем использовались для построения сетки проводимых учетов засоренности на цифровом изображении поля.

Для анализа пространственного размещения сорных растений на паровом поле рассчитывались коэффициенты вариации их численности ($K_{\text{вар}}$) и агрегации ($K_{\text{агр}}$). Первый из них представляет собой стандартное отклонение, выраженное в процентах к средней арифметической данной совокупности, второй – отношение дисперсии к среднему значению. Изменчивость принято считать незначительной, если коэффициент вариации не превышает 10%, средней – от 10 до 20%, значительной – более 20% (Доспехов, 1979). Коэффициент агрегации равен 1 при случайном размещении особей, больше 1 – при групповом, меньше 1 – при регулярном (Грейг-Смит, 1967).

Цифровые карты пространственного размещения сорных растений на обследуемом паровом поле составлялись с помощью программы ГИС АФИ, разработанной в лаборатории информационного обеспечения точного земледелия Агрофизического НИИ, а также программы Surfer 11.

Одновременно с классическими наземными методами учета засоренности применялась аэрофотосъемка парового поля с помощью беспилотного летательного аппарата «Геоскан 401», оснащенного камерой Sony Nex 5 (16 МП). Дистанционная съемка велась с разрешением 3 см пиксель⁻¹ 07.06.2017 г. и 18.06.2017 г.

При дистанционной оценке засоренности поля использовался нормализованный дифференцированный (разностный) вегетационный индекс NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), который тесно связан с проективным покрытием вегетирующей растительности. Расчет массива значений индекса осуществлялся по геоданным двух каналов (красного и ближнего инфракрасного) полученных цифровых изображений, а их отображение в виде соответствующих картограмм NDVI проводилось в программе QGIS.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обследованное паровое поле характеризовалось сильной засоренностью, на что указывает количество вегетирующих сорных растений в пересчете на единицу площади и их проективное покрытие – 616 экз. м⁻² и 34,4% соответственно. Также можно отметить разнообразный видовой состав сорных растений, насчитывающий 32 наименования, и высокий показатель видового обилия (13 видов м⁻²). Широкое распространение многолетних видов, на долю которых приходилось 34,4% от общего количества выявленных видов и 12,5% от общей численности сорных растений, свидетельствует о сложном корневищно-корнеотпрысково-малолетнем типе засоренности объекта исследований. Плотность видов с многолетним циклом развития составляла 77 экз. м⁻², в том числе осота полевого (*Sonchus arvensis* L.) – 72 экз. м⁻². Из многолетних наиболее часто встречались пырей ползучий (*Elitrigia repens* (L.) Nevski), бодяк щетинистый (*Cirsium setosum* (Willd.) Bess.), мята полевая (*Mentha arvensis* L.), полынь обыкновенная (*Atrémisia vulgaris* L.), режа – хвощ полевой (*Equisetum arvense* L.), щавель малый (*Rumex acetosella* L.), подорожник большой (*Plantago major* L.). Присутствие на поле полыни обыкновенной и подорожника большого, для которых характерны рудерально-сегетальные местообитания, свидетельствует о плохом фитосанитарном состоянии исследуемого поля и низкой культуре земледелия.

Среди малолетних видов сорных растений наиболее высокой частотой встречаемости и численностью отличались ромашка непахучая

(*Matricaria inodora* L.), торица полевая (*Spergula arvensis* L.), пастушья сумка (*Capsella bursa-pastoris* (L.) Medic.), горошек волосистый (*Vicia hirsute* (L.) S. F. Gray), фиалка полевая (*Viola arvensis* Murr.), марь белая (*Chenopodium album* L.), редька дикая (*Raphanus raphanistrum* L.), горец птичий (*Polygonum aviculare* L.), пикульники (*Galeopsis* spp.), гречишка вьюнковая (*Fallopia convolvulus* (L.) A. Love). На долю первых двух видов приходилось 43% от общего количества сорных растений, произрастающих на поле.

Анализ полученных данных выявил выраженную неравномерность размещения сорных растений по территории исследуемого поля. Видовое и численное обилие сорных растений на элементарных участках изменялось в пределах 6–19 видов м⁻² и 156–976 экз. м⁻², проективное покрытие – от 6 до 65%. Коэффициенты вариации имели значения 17,7, 23,9 и 42,6%.

Различия между максимальным и минимальным показателями обилия малолетних двудольных видов составляли 7,3 раза, для других групп сорных растений — значительно больше (табл. 1). Высокая степень неравномерности размещения сорных растений подтверждается также коэффициентами вариации, равными 26,1 и 62,3% для малолетних и многолетних двудольных сорняков и 409,4 и 445,8% для малолетних и многолетних злаковых. Таким образом, наиболее неравномерное размещение по площади поля было характерно для многолетних и малолетних злаковых сорных растений, представленных соответственно пыреем ползучим и мятликом однолетним (*Poa annua* L.), что объясняется их малочисленностью.

Неравномерность распространения сорных растений в пространстве парового поля оказалась свойственна всем произрастающим здесь видам. Наименьшие коэффициенты вариации отмечались у массовых видов, наибольшие – у редко встречаемых (табл. 2). Схожий результат был получен ранее при анализе пространственного размещения сорных растений в посадках картофеля (Шпанев, Смук, 2019).

Согласно значениям коэффициента агрегации, превышающим 1, все виды сорных растений имели агрегированное (скученное, пятнистое) размещение на обследуемом паровом поле. Более случайным размещением характеризовались незабудка полевая, звездчатка средняя и дымянка аптечная, у которых значения коэффициента агрегации приближались к 1 (табл. 2).

Таблица 1. Характеристика пространственного размещения биологических групп сорных растений на паровом поле со сложным микрорельефом.

Биологические группы	Густота, экз. м ⁻²			K _{вар}	K _{агр}
	сред.	мин.	макс.		
Малолетние двудольные	537	124	908	26,1	9,1
Малолетние злаковые	2	0	64	409,4	8,0
Многолетние двудольные	76	0	220	62,3	7,4
Многолетние злаковые	1	0	32	445,8	4,8

Таблица 2. Пространственное размещение отдельных видов сорных растений на паровом поле со сложным микрорельефом

Вид	Встречаемость, %	Густота, экз. м ⁻²			K _{вар}	K _{агр}
		сред.	мин.	макс.		
Ромашка непахучая	100	142	40	668	59,7	12,6
Торица полевая	100	123	16	304	36,6	4,1
Осот полевой	97,6	72	0	220	65,1	7,6
Пастушья сумка обыкновенная	99,2	71	0	196	55,4	5,4
Горошек волосистый	97,6	47	0	240	91,0	9,7
Фиалка полевая	79,8	31	0	260	137,2	13,1
Марь белая	95,2	25	0	192	92,0	5,4
Редька дикая	85,5	25	0	164	119,0	8,9
Горец птичий	76,6	18	0	184	165,4	12,1
Пикульники	84,7	15	0	120	111,8	4,7
Гречишка вьюнковая	78,2	14	0	80	115,4	4,5
Бородавник обыкновенный	52,4	8	0	80	179,6	6,2
Вероника полевая	46,0	6	0	40	155,9	3,7
Горец развесистый	37,1	4	0	60	203,3	3,7
Дымянка аптечная	46,0	4	0	20	137,5	1,8
Незабудка полевая	53,2	3	0	20	125,6	1,4
Мятлик однолетний	12,1	2	0	64	409,4	8,0
Бодяк щетинистый	12,9	2	0	76	467,4	10,1
Звездчатка средняя	27,4	2	0	16	187,2	1,4
Полынь обыкновенная	16,9	1	0	24	265,8	2,5
Пырей ползучий	8,1	1	0	32	445,8	4,8
Мята полевая	4,8	1	0	24	531,0	4,1

Характер пространственного размещения сорных растений на паровом поле хорошо отображается на цифровых картах, составленных с помощью программ ГИС АФИ и Surfer 11. На картах, где представлена информация об общей численности и проективном покрытии сорных растений, четко выделяются участки с понижением рельефа, для которых характерна слабая засоренность (рис. 1).

На слабозасоренных участках насчитывалось от 156 до 368 экз. м⁻² сорных растений при проективном покрытии 6–12%. Там же отмечалось наименьшее видовое обилие сорной растительности. Количество видов сорных растений, произрастающих на единице площади поля, на таких участках снижалось до 6–12 видов м⁻², тогда как для большей части поля был характерен показатель 8–19 видов м⁻² (табл. 3). Это происходило за счет таких видов, как фиалка полевая, марь белая, горец птичий, незабудка полевая, бородавник обыкновенный, пикульники. Отсюда следует, что от особенностей микрорельефа поля в большей степени зависит размещение малолетних видов сорных растений, чем многолетников. Для видов с многолетним циклом развития была характерна более сложная пространственная структура распространения в пределах парового поля. Ярко выраженное произрастание куртинами было свойственно для бодяка щетинистого, осота полевого, пырея ползучего, полыни обыкновенной (рис. 2).

Пространственная неоднородность размещения сорных растений на обследуемом паровом поле хорошо отображалась на аэрофотоснимках в видимом спектре,

сделанных с беспилотного летательного аппарата, и NDVI-снимках, полученных с помощью программы QGIS. Особенно отчетливо она прослеживалась на снимках, полученных во время второго полета, осуществляемого 18 июня (по прошествии 11 дней после первого полета) для детализации данных наземного учета засоренности. За период между съемками сорные растения заметно подросли и сформировали значительную надземную вегетативную массу. Значения вегетационного индекса NDVI на сильнозасоренных участках поля достигали 0,52, а на большей площади поля не превышали 0,41. Участки с микропонижениями рельефа за счет малого количества произрастающих сорных растений, их проективного покрытия и фитомассы имели наименьшие значения данного индекса. Усредненное значение индекса NDVI на таких участках составило 0,05 (максимальное – 0,17), что в 2,3 и 3,1 раза меньше по сравнению с большей частью поля и его сильнозасоренными участками.

Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности активного использования индекса NDVI не только для дистанционного мониторинга засоренности паровых полей в целом, что согласуется с литературными данными (Антонов, Сладких, 2009), но и для определения характера пространственного размещения сорных растений, в частности. Это послужит научной основой для практической реализации прецизионного подхода к борьбе с сорной растительностью на паровых полях.

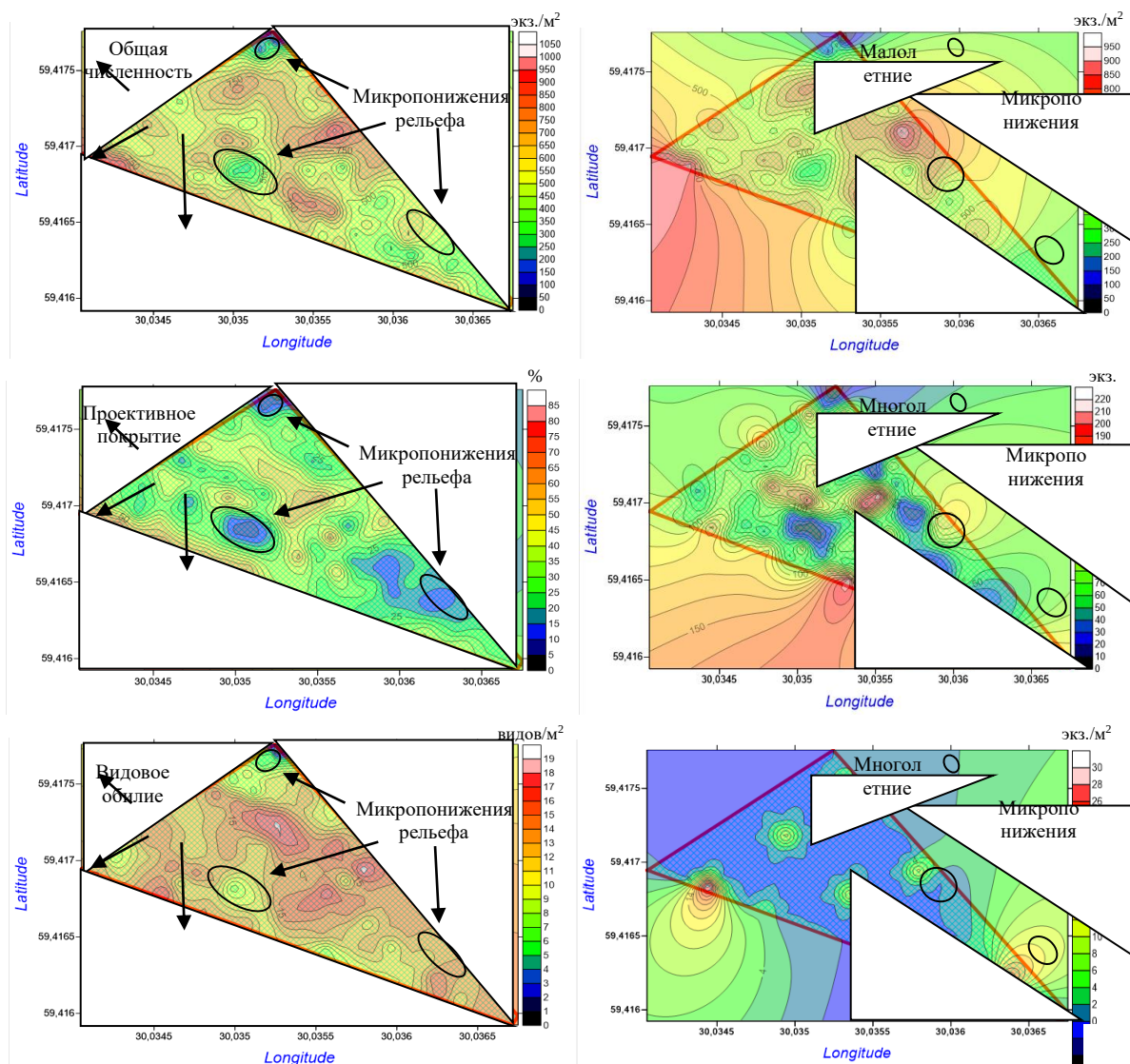


Рис. 1. Цифровые карты пространственного размещения сорных растений на паровом поле со сложным микрорельефом

Таблица 3. Сравнительный анализ засоренности различных участков микрорельефа обследуемого парового поля

Показатели	Микропонижения рельефа			Остальная часть поля		
	сред.	мин.	макс.	сред.	мин.	макс.
Видовое обилие, видов на м ²	9	6	12	14**	8	19
Проективное покрытие, %	8,6	6,0	12,0	35,4**	10,0	65,0
Численность, экз. на м ²	283	156	368	631**	276	976
– малолетние двудольные	264	124	364	549**	216	932
– малолетние злаковые	10	0	44	2*	0	64
– многолетние двудольные	9	0	24	79**	0	220
– многолетние злаковые	0	0	0	1	0	32

Примечание. * – различия достоверны при $P \geq 0,95$; ** – при $P \geq 0,99$.

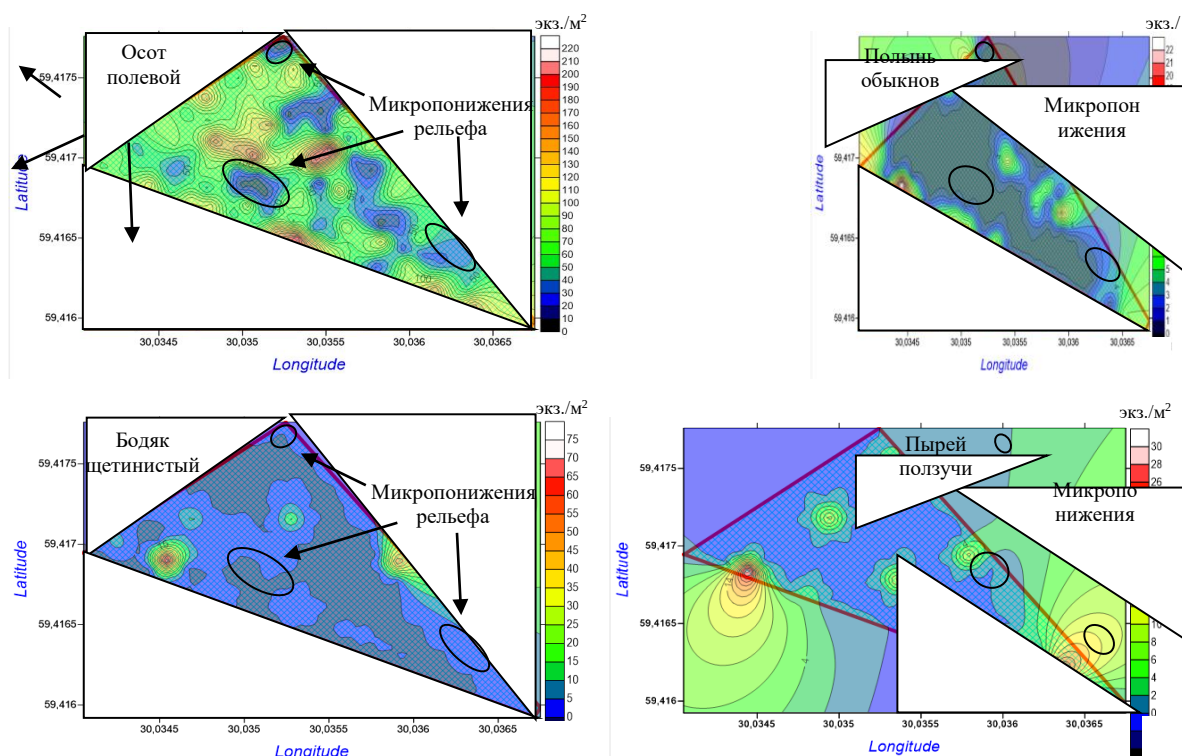


Рис. 2. Цифровые карты пространственного размещения многолетних видов сорных растений на паровом поле со сложным микрорельефом

ВЫВОДЫ

В результате исследований выявлена пространственная неравномерность размещения сорных растений на паровом поле, обусловленная особенностями его микрорельефа. На участках с микропонижениями рельефа отмечено низкое видовое и численное обилие, а также проективное покрытие сорных растений. При этом от особенностей микрорельефа поля в большей степени зависело размещение малолетних видов сорных растений, чем многолетников, для которых характерно ярко выраженное произрастание куртинами.

Пространственную неоднородность размещения сорных растений на паровом поле, обусловленную сложным рельефом местности, удастся визуализировать с помощью вегетационного индекса NDVI. Участки с микропонижениями рельефа за счет малого количества произрастающих сорных растений, их проективного покрытия и фитомассы имели в 2,3 и 3,1 раза меньшие значения индекса NDVI по сравнению с большей частью поля и его сильнозасоренными участками.

Полученные результаты подтверждают целесообразность использования индекса NDVI для выявления характера пространственного размещения сорной растительности и проведения пространственно-дифференцированных гербицидных обработок в паровом поле. Индекс NDVI на средне- и сильнозасоренных участках поля, подлежащих обработке гербицидами, варьировался от 0,17 до 0,52.

Список литературы

- Антонов В. Н., Сладких Л.А. Мониторинг состояния посевов и прогнозирование урожайности яровой пшеницы по данным ДЗЗ // Геоматика. 2009. № 4. С. 50–53.
- Грейг-Смит П. Количественная экология растений. М., 1967. 359 с.
- Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. М., 1979. 416 с.
- Назранов Х. М., Хуцинова М. М. Оценка пространственной неоднородности уровня плодородия и засоренности в пределах поля // Известия Горского государственного аграрного университета. 2018. Т. 55. № 2. С. 41–45.
- Рогожникова Е. С., Шпанев А. М. Засоренность ячменя с подсевом многолетних трав при разных уровнях минерального питания // Вестник защиты растений. 2014. № 4. С. 49–51.
- Родионова А.Е. Борьба с сорными растениями в условиях моренного агроландшафта. Тверь-СПб., 2002. 72 с.
- Шпанев А. М., Смук В. В. Пространственное размещение сорных растений в посадках картофеля // Земледелие. 2019. № 2. С. 42–45. DOI: 10.24411/0044-3913-2019-10212.

- Biller R. H. Verfahren zur Reduzierung des Aufwandes an chemischen Pflanzenschutzmitteln in der Pflanzenproduktion – eine betriebstechnische Analyse // *Landbauforschung Völkenrode*, 1994, v. 44, no. 2, pp. 205–215.
- Franco C., Pedersen S.M., Papaharalampos H., Ørum J.E. The value of precision for image-based decision support in weed management // *Precision Agriculture*, 2017, v. 18, pp. 366–382.
- Hurle K. Aktuelle und zukünftige Entwicklungen in der Unkrautbekämpfung aus der Sicht der Herbologie // *Pflanzenschutz – Nachrichten Bayer*, 1998, v. 51, no. 2, pp. 109–128.
- Izquierdo J., Blanco-Moreno J. M., Chamorro L., González-Andújar J. L., Sans F. X. Spatial distribution of weed diversity within a cereal field // *Agronomy for Sustainable Development*, 2009, v. 29, pp. 491–496.
- Mortensen D.A., Johnson G.A., Young L.J. Weed distributions in agricultural fields // *Proceedings of the International Weed Science Meeting*. Minneapolis St. Paul., 1992, pp. 113–124.
- Pluschkel U., Pallutt B. Zur Verteilung von Unkräutern auf Getreidefeldern und deren Auswirkung auf die Nutzung von Schadensschwellen // *Zeitschr. Pflanzenkrankh. Pflanzenschutz. Sonderheft.*, 1996, XV, pp. 141–147.
- Rider T.W., Vogel J.W., Dille J.A., Dhuyvetter K.C., Kastens T.L. An economic evaluation of site-specific herbicide application // *Precision Agriculture*, 2006, v. 7, pp. 379–392.
- Timmermann C., Gerhards R., Kuhbauch W. The economic impact of site-specific weed control // *Precision Agriculture*, 2003, v. 4, pp. 249–260.
- Wartenberg G. GPS: Ein Baustein des Pflanzenschutzes // *DLG-Mitteilungen*, 1995, no. 1, pp. 36–39.
- Wartenberg G. Heterogene Verteilung von Unkräutern auf Ackerflächen-umweltvert-rägliches Anwenden von Herbiziden // *Gesunde Pflanzen*, 1996, 48, no. 1, pp. 3–10.
- Yang C.-C., Prasher S.O., Landry J.-A., Ramaswamy H.S. Development of an image processing system and a fuzzy algorithm for site-specific herbicide applications // *Precision Agriculture*, 2003, v. 4, pp. 5–18.

References

- Antonov V. N., Sladkikh L. A. Monitoring sostoyaniya posevov i prognozirovaniye urozhaynosti yarovoy pshenitsy po dannym DZZ [Monitoring of crop state and yield of spring wheat based on remote sensing data] // *Geomatika*, 2009, no. 4, pp. 50–53.
- Greyg-Smit P. *Kolichestvennaya ekologiya rasteniy* [Quantitative plant ecology]. Moscow, 1967, 359 p.
- Dospekhov B. A. *Metodika polevogo opyta* [Methods of field experience]. Moscow, 1979, 416 p.
- Nazranov Kh. M., Khutsinova M. M. Otsenka prostranstvennoy neodnorodnosti urovnya plodorodiya i zasorennosti v predelakh polya [Estimation of spatial heterogeneity of the level of fertility and infestation within the field] // *Izvestiya Gorskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2018, v. 55, no. 2, pp. 41–45.
- Rogozhnikova E. S., Shpanev A. M. Zasorennost yachmenya s podsevom mnogoletnikh trav pri raznykh urovnyakh mineralnogo pitaniya [Weediness of barley with seeding of perennial grasses at different levels of mineral nutrition] // *Vestnik zashchity rasteniy*, 2014, no. 4, pp. 49–51.
- Rodionova A. E. Bor'ba s sornymi rasteniyami v usloviyakh morennogo agrolandshafta [Weed control in the conditions of moraine landscapes]. Tver-Saint Petersburg, 2002, 72 p.
- Shpanev A. M., Smuk V. V. Prostranstvennoye razmeshcheniye sornykh rasteniy v posadkakh kartofelya [Spatial placement of weeds in potato plantings] // *Zemledeliye*, 2019, no. 2, pp. 42–45. DOI: 10.24411/0044-3913-2019-10212.
- Biller R. H. Verfahren zur Reduzierung des Aufwandes an chemischen Pflanzenschutzmitteln in der Pflanzenproduktion – eine betriebstechnische Analyse // *Landbauforschung Völkenrode*, 1994, v. 44, no. 2, pp. 205–215.
- Franco C., Pedersen S.M., Papaharalampos H., Ørum J.E. The value of precision for image-based decision support in weed management // *Precision Agriculture*, 2017, v. 18, pp. 366–382.
- Hurle K. Aktuelle und zukünftige Entwicklungen in der Unkrautbekämpfung aus der Sicht der Herbologie // *Pflanzenschutz – Nachrichten Bayer*, 1998, v. 51, no. 2, pp. 109–128.
- Izquierdo J., Blanco-Moreno J. M., Chamorro L., González-Andújar J. L., Sans F. X. Spatial distribution of weed diversity within a cereal field // *Agronomy for Sustainable Development*, 2009, v. 29, pp. 491–496.
- Mortensen D.A., Johnson G.A., Young L.J. Weed distributions in agricultural fields // *Proceedings of the International Weed Science Meeting*. Minneapolis St. Paul., 1992, pp. 113–124.
- Pluschkel U., Pallutt B. Zur Verteilung von Unkräutern auf Getreidefeldern und deren Auswirkung auf die Nutzung von Schadensschwellen // *Zeitschr. Pflanzenkrankh. Pflanzenschutz. Sonderheft.*, 1996, XV, pp. 141–147.
- Rider T.W., Vogel J.W., Dille J.A., Dhuyvetter K.C., Kastens T.L. An economic evaluation of site-specific herbicide application // *Precision Agriculture*, 2006, v. 7, pp. 379–392.
- Timmermann C., Gerhards R., Kuhbauch W. The economic impact of site-specific weed control // *Precision Agriculture*, 2003, v. 4, pp. 249–260.
- Wartenberg G. GPS: Ein Baustein des Pflanzenschutzes // *DLG-Mitteilungen*, 1995, no. 1, pp. 36–39.
- Wartenberg G. Heterogene Verteilung von Unkräutern auf Ackerflächen-umweltvert-rägliches Anwenden von Herbiziden // *Gesunde Pflanzen*, 1996, 48, no. 1, pp. 3–10.
- Yang C.-C., Prasher S.O., Landry J.-A., Ramaswamy H.S. Development of an image processing system and a fuzzy algorithm for site-specific herbicide applications // *Precision Agriculture*, 2003, v. 4, pp. 5–18.