

Математическое моделирование процессов в агропромышленном комплексе и проблемы управления

УДК 631.17

УЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОДУКЦИОННОГО ПРОЦЕССА РАСТЕНИЙ

В. Л. Баденко¹, В. В. Терлеев¹, В. Миршель², О. Г. Никонова¹

¹ ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, Россия, 195251

² Лейбниц-Центр Агрolandшафтных исследований (ZALF),

Эберсвальдер штрассе, Мюнхеберг, Германия, 15374

E-mail: vbadenko@gmail.com

Поступила в редакцию 02 ноября 2012 г., принята к печати 07 марта 2013 г.

В работе представлены результаты методических разработок по учету пространственной вариативности гидрофизических свойств почв при принятии решений по управлению адаптивно-ландшафтными технологиями земледелия на основе количественных показателей продукционного процесса растений (посевов пшеницы), полученных с использованием динамической модели продукционного процесса сельскохозяйственных растений AGROTOOL. Исследования проведены в среде специального программного комплекса, созданного на основе интеграции динамической модели AGROTOOL и геоинформационной системы. Разработана схема применения предлагаемых подходов при информационной поддержке принятия решений по управлению продукционным процессом. Приведены данные компьютерных экспериментов, позволяющие выявить условия, при которых существующая вариативность гидрофизических свойств либо оказывает влияние на продукционный процесс растений, либо указанное влияние нивелируется.

Ключевые слова: геоинформационная система, динамическая модель продукционного процесса растений, гидрофизические свойства почвы.

ВВЕДЕНИЕ

При решении задач по повышению эффективности использования земельных ресурсов и получению высоких и устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур наибольший интерес представляют рост и развитие сельскохозяйственных растений (продукционный процесс) на конкретном поле. Соответствующие технологии информационного обеспечения процесса принятия решений требуют оценки качества и количества растениеводческой продукции, что невозможно без применения метода моделирования, а использование при этом динамических имитационных моделей агроэкосистем (Полуэктов и др., 2006) является перспективным направлением. Однако несоответствие моделей процессам и явлениям, реально имеющим место на полях, приводит к потере всех преимуществ управления с использованием современных информационных технологий, нерациональному ис-

пользованию ресурсов и развитию экологически неблагоприятных процессов (Арефьев и др., 1998). Следует также учитывать, что решение задач по повышению эффективности сельскохозяйственного производства, сохранению и расширенному воспроизводству плодородия почв может быть достигнуто только на основе геосистемного, ландшафтного подхода к обоснованию систем земледелия и мелиорации (Арефьев и др., 2010). Практическая реализация геосистемного подхода требует использования технологий географических информационных систем (ГИС) (Баденко, Осипов, 1998). Гидрофизические свойства почвы во многом определяют интенсивность и величину продукционного процесса растений, ширину оптимума условий для роста и развития агрокультур, а почва является непосредственным и часто единственным объектом мелиорации (Шейн и др., 2001). При этом остается актуальной задача по разработке методов получения, анализа и использования

количественной информации о гидрофизических свойствах почвы (Terleev *et al.*, 2010; Терлеев и др., 2012б). Данные задачи тесно связаны с разработками новых технологий адаптивно-ландшафтного земледелия (Якушев и др., 2008а, 2008б), которые обеспечивают большую отдачу при учете пространственного распределения (вариабельности) гидрофизических свойств почвы. В этой связи учет указанной вариабельности при моделировании динамики почвенной влаги и, соответственно, при прогнозировании роста и развития сельскохозяйственных растений является актуальной задачей.

Вопрос об учете пространственного распределения гидрофизических свойств почвы для управления ростом и развитием сельскохозяйственных растений поднимался давно, например в работе Е. В. Жуковского и др. (1983). Очевидно, что при ведении сельского хозяйства на Северо-Западе России следует учитывать наличие существенной пространственной вариабельности (изменчивости), характерной для дерново-подзолистых почв (Самсонова, 2008). Важным фактором появления такой вариабельности является сооружение в указанном регионе России осушительных мелиоративных систем. Они, как показывают многолетние исследования (Апарин и др., 2009), существенно влияют на процесс почвообразования и в значительной мере определяют неоднородность почвенного покрова. Следует заметить, что достигнуты успехи в получении и анализе количественной информации о пространственно-распределенных физических свойствах дерново-подзолистых почв (Гончаров и др., 2008; Моисеев, 2011). Однако большинство исследователей интересуется вариабельностью агрохимических свойств (Литвинович, 2007; Полуэктов, Терлеев, 2010). При этом исследователи после выявления достоверной неоднородности почвенного покрова делают вывод о необходимости учета данного фактора для создания соответствующих технологий земледелия, однако, несмотря на наличие отдельных публикаций (Благовещенский и др., 2007), количество методических разработок пока не является достаточным.

Целью настоящей работы является разработка подходов к учету пространственной

вариабельности гидрофизических свойств почв на основе количественных показателей продукционного процесса растений (посевов пшеницы), полученных с помощью динамической модели AGROTOOL, для обоснования управленческих решений в практическом адаптивно-ландшафтном земледелии. Данная постановка задачи основывается на том факте, что достоверность результатов, получаемых в AGROTOOL, особенно для условий Северо-Запада России, не вызывает сомнений: динамическая модель апробирована на репрезентативном объеме независимых данных полевых опытов (Терлеев и др., 2012а).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являются сельскохозяйственные угодья, рассматриваемые как компоненты агроландшафтного комплекса. Предметом исследования является продукционный процесс агроэкосистем на сельскохозяйственных полях. При проведении настоящего исследования возникла методическая проблема, связанная с тем, что в системе AGROTOOL при моделировании используется одна пространственная координата (вертикальная) – это точечная модель. Научная гипотеза заключается в том, что использование геоинформационных технологий позволит решить данную проблему и совершенствовать модель роста и развития сельскохозяйственных растений на основе учета пространственной вариабельности гидрофизических свойств почв, что повысит обоснованность выбора агроландшафтных мероприятий и эффективность современных адаптивно-ландшафтных систем земледелия.

Для проведения исследований влияния пространственной вариабельности гидрофизических свойств почвы на продукционный процесс растений был разработан специальный комплекс моделирования – информационно-аналитическая система (ИАС) (Баденко и др., 2011б). Данный комплекс состоит из ГИС, интегрированной с AGROTOOL, а для моделирования гидрофизических свойств почв в состав ИАС включен программный комплекс *Агрогидрология* (Полуэктов, Терлеев, 2005).

Для разрешения противоречия между точечным характером моделирования динамики почвенной влаги в AGROTOOL (Полуэктов и др., 2003) и необходимостью анализа влияния пространственной вариабельности гидрофизических свойств почв на продукционный процесс растений использовался следующий методический подход. При построении ИАС считалось, что база данных (БД) ГИС состоит из объектов, которые рассматривались как тройка: $O = \{id, pos, att\}$. Тем самым подчеркивается, что объекты имеют пространственную – pos и атрибутивную – att составляющие, которые при использовании геореляционной схемы организации БД связываются через идентификатор id . При интеграции в среду ГИС точечных моделей требуется построение объектов O_M – тех квазиоднородных пространственных объектов, для которых предполагается, что результаты моделирования по AGROTOOL в любой точке будут одинаковыми. При этом сначала формируется графическая часть объектов, а потом для указанных объектов вычисляются атрибуты в результате моделирования. Такой подход соответствует общей идеологии современных технологий земледелия, которая предполагает разделение поля на квазиоднородные участки – единицы управления – и адаптацию агротехнологий для каждого из таких участков (Баденко и др., 2009). Для согласования структуры моделей и ГИС в общем случае перед использованием модели AGROTOOL в среде ГИС необходима трансформация существующих (исходных) объектов БД ГИС $O_I = \{id, pos, att\}$ для исследуемых сельскохозяйственных полей в объекты $O_M = \{id, pos, att\}$, необходимые для работы модели:

$$O_I = \{id, pos, att\} \quad O_M = \{id, pos, att\}. \quad (1)$$

Так, в связи с тем, что обычно трудно выделить теоретически обоснованные объекты $O_M = \{id, pos, att\}$, то в качестве таких объектов в конкретном исследовании предлагается использовать прямоугольные области со сторонами, ориентированными в пространстве параллельно границам сельскохозяйственного поля. Выбор данных

областей будет более обоснован, если использовать квадратные области, согласованные с областями агрохимического обследования указанного поля. В качестве объектов $O_I = \{id, pos, att\}$ выступают точечные объекты, в которых определяются гидрофизические свойства почвы на поле. Для определения атрибутов объектов O_M используется метод, основанный на вычислении значений гидрофизических свойств в центрах тяжести (центроидах) фигуры O_M с помощью интерполяции значений указанных свойств в O_I . При этом используется метод Шепарда. Пусть, например, на поле имеется N объектов O_I . Тогда значения атрибута (гидрофизические свойства почвы) для объектов O_M будет вычисляться на основе соответствующих атрибутов $O_I (att_i)$ следующим образом:

$$att_K = \frac{\sum_{i=1}^N w_i * att_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (2)$$

В соотношении (2) веса $w_i = 1 / d_i^2$, где d_i^2 , – суть расстояния между центроидами O_M и i -тым объектом O_I . При этом следует учитывать, что в AGROTOOL моделирование происходит в метровом слое почвы, который разделен на десять равных слоев. Поэтому значения для каждого гидрофизического свойства в исходных точках также следует распределить по таким же десяти слоям и использовать данные значения в интерполяции (2), которая применяется также для получения соответствующих десяти значений для объектов O_M . Затем указанные значения связываются со всем объектом O_M и считаются в нем постоянными. Такой метод предлагается в качестве общего, он представлен на рис. 1 в виде блок-схемы. В качестве комментария укажем: в схеме предполагается, что определение водно-физических свойств почв как более консервативных будет проводиться, в отличие от агрохимического обследования, гораздо реже.



Рис. 1 Блок-схема схема применения предлагаемых подходов при информационной поддержке принятия решений по управлению продукционным процессом.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Апробация предлагаемой методики проводилась на базе данных ГИС, описывающей сельскохозяйственные угодья Меньковской опытной станции (МОС) Агрофизического НИИ, расположенные в Гатчинском районе Ленинградской области. В настоящей работе представлена часть результатов, касающихся исследования методами математического моделирования продукционного процесса пшеницы на поле площадью 3 га. С целью определения значений гидрофизических свойств почв на данном поле и заполнения БД ГИС были заложены 6 почвенных разрезов на глубину до 1 м и отобраны образцы из генетических горизонтов почвенного профиля (Баденко и др., 2011а). В ходе экспериментальных исследований в каждом из указанных горизонтов определялись следующие агрофизические показатели почвы, необходимые для проведения моделирования в среде AGROTOOL: почвенно-гидрологические константы (максимальная гигроскопичность - МГ, влажность устойчи-

вого завядания - ВЗ, наименьшая влагоемкость - НВ и полная влагоемкость – ПВ); плотность сложения и плотность твердой фазы почвы; коэффициент фильтрации почвенной влаги.

Для выбора точек отбора образцов использовались геоинформационные технологии. При этом в качестве критериев для выбора характерных точек использовались два варианта почвенной карты, имеющиеся в распоряжении МОС, данные о рельефе местности, данные о вымочках, а также данные об урожайности пшеницы (продуктивность агроэкосистемы), которые были получены в ходе дифференцированной уборки урожая по технологии точного земледелия с дискретностью $5 \times 5 \text{ м}^2$. Некоторые результаты лабораторных исследований по гидрофизическим свойствам почвы представлены в таблице. Данные получены на пневматическом прессе (*Soilmoisture Model 1000 Pressure Membrane Extractor, 15 bar*) по методике, описанной Арефьевым и др. (2011), они использовались для построения экспериментальной ОГХ.

Таблица. Экспериментальные данные о гидрофизических свойствах почв.

№	Горизонт (верх-низ, см)	ПВ, см ³ ·см ⁻³	Объемная влажность почвы, см ³ ·см ⁻³				НВ, см ³ ·см ⁻³	ВЗ, см ³ ·см ⁻³
		0.0 кПа	-15 кПа	-122 кПа	-415 кПа	-33 кПа	1520 кПа	
31	Апах (0–24)	0.443	0.339	0.253	0.136	0.308	0.233	
	А2В (24–48)	0.367	0.207	0.079	0.058	0.149	0.056	
	В1 (48–...)	0.382	0.183	0.085	0.063	0.128	0.084	
32	Апах (0–32)	0.513	0.310	0.199	0.127	0.262	0.126	
	А2Вg (32–53)	0.402	0.281	0.163	0.124	0.229	0.099	
	В (53–...)	0.363	0.135	0.070	0.065	0.086	0.061	
33	Апах (0–36)	0.523	0.372	0.283	0.170	0.319	0.158	
	А2В (36–57)	0.393	0.288	0.178	0.121	0.243	0.094	
	В (57–...)	0.396	0.342	0.169	0.121	0.299	0.072	
34	Апах (0–28)	0.471	0.340	0.208	0.159	0.282	0.148	
	А2В (28–55)	0.342	0.236	0.140	0.113	0.193	0.068	
	В (55–...)	0.309	0.221	0.203	0.187	0.208	0.155	
35	Апах (0–23)	0.458	0.275	0.190	0.147	0.247	0.129	
	А2В (23–43)	0.415	0.216	0.123	0.072	0.212	0.052	
	В (43–...)	0.365	0.114	0.047	0.043	0.097	0.032	
30	Апах (0–24)	0.475	0.301	0.214	0.138	0.283	0.123	
	А2В (24–49)	0.353	0.219	0.146	0.088	0.231	0.064	
	В (49–...)	0.344	0.112	0.118	0.051	0.114	0.033	

ВЗ - влажность устойчивого завядания, НВ - наименьшая влагоемкость, ПВ - полная влагоемкость.

Исследования показали, что на анализируемом участке почвенный покров представлен окультуренными песчаными и супесчаными разновидностями дерново-среднеподзолистой почвы. При агрохимическом обследовании поле было разбито на части площадью 0,5 га: данная область считается однородной с агрохимической точки зрения. В нашем исследовании указанная область агрохимического обследования была разделена на четыре части: квадратные области по 0,125 га. Таким образом, для проведения исследований в среде ИАС в БД ГИС были сформированы квадратные области площадью 0,125 га. Атрибуты указанных объектов вычислялись по данным из таблицы с использованием соотношения (2): дискретность 10 см по почвенному профилю до глубины 1 м. На рис. 2 изображены объекты моделирования (O_M) и их центроиды, а также исходные точки отбора образцов (O_I) – точки, обозначенные номерами 30-35. На рис. 2 представлен также фрагмент БД ГИС – ре-

зультат интерполяции для каждой области моделирования с применением метода Шепарда (2).

После вычисления значения гидрофизических свойств почв в каждой указанной области появилась возможность проанализировать распределение гидрофизических свойств почв по полю на глубину до одного метра в слоях толщиной 10 см. На рис. 3 представлены данные о вариабельности гидрофизических свойств почвы на исследуемом поле БД ГИС. В качестве основного показателя, представляющего интерес для растениеводства, был выбран диапазон доступной влаги (НВ-ВЗ) см³·см⁻³. Видно, что данный показатель изменяется от 0.11 до 0.17 см³·см⁻³. При этом максимальными значениями характеризовались разные слои почвенного профиля и разные точки поля. Это позволяет говорить о существенной вариабельности гидрофизических свойств почвы на опытном поле.

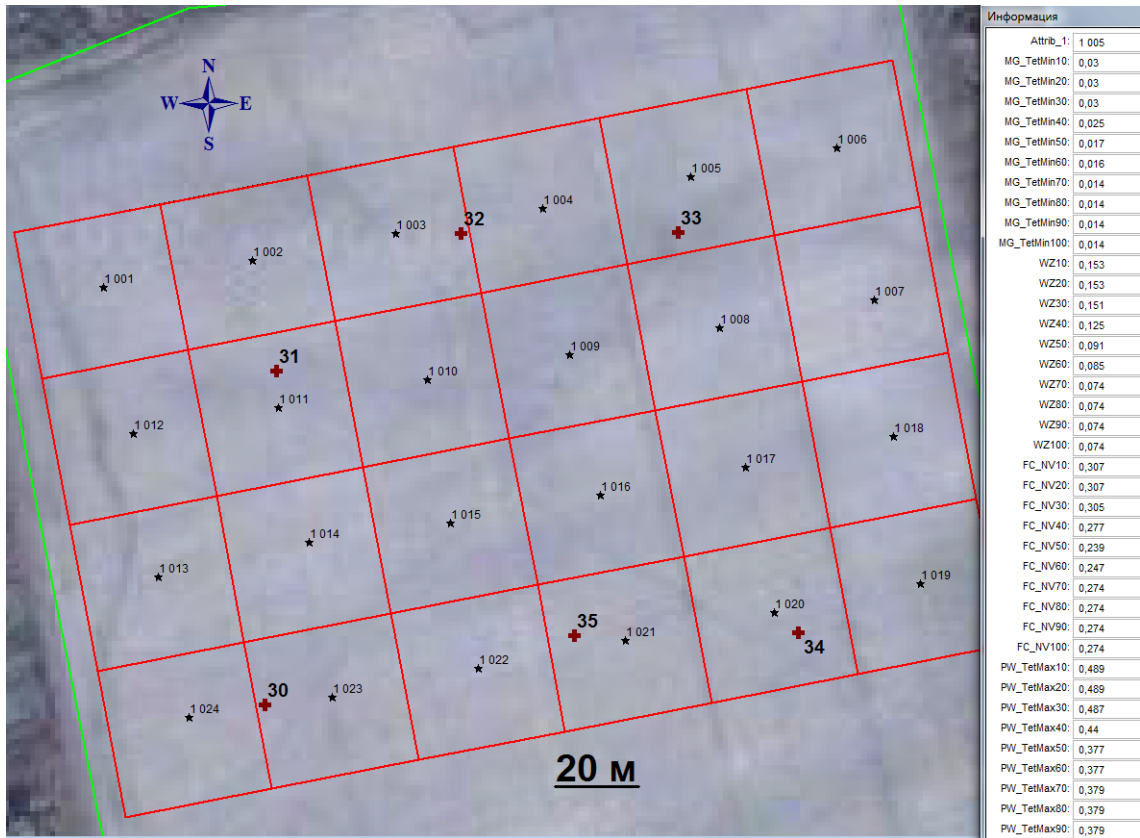


Рис. 2 Разделение исследуемого поля на относительно однородные квадратные области по 0,125 га и точки отбора образцов (точки 30-35). Представлена часть БД ГИС, используемая при моделировании в AGROTOOL

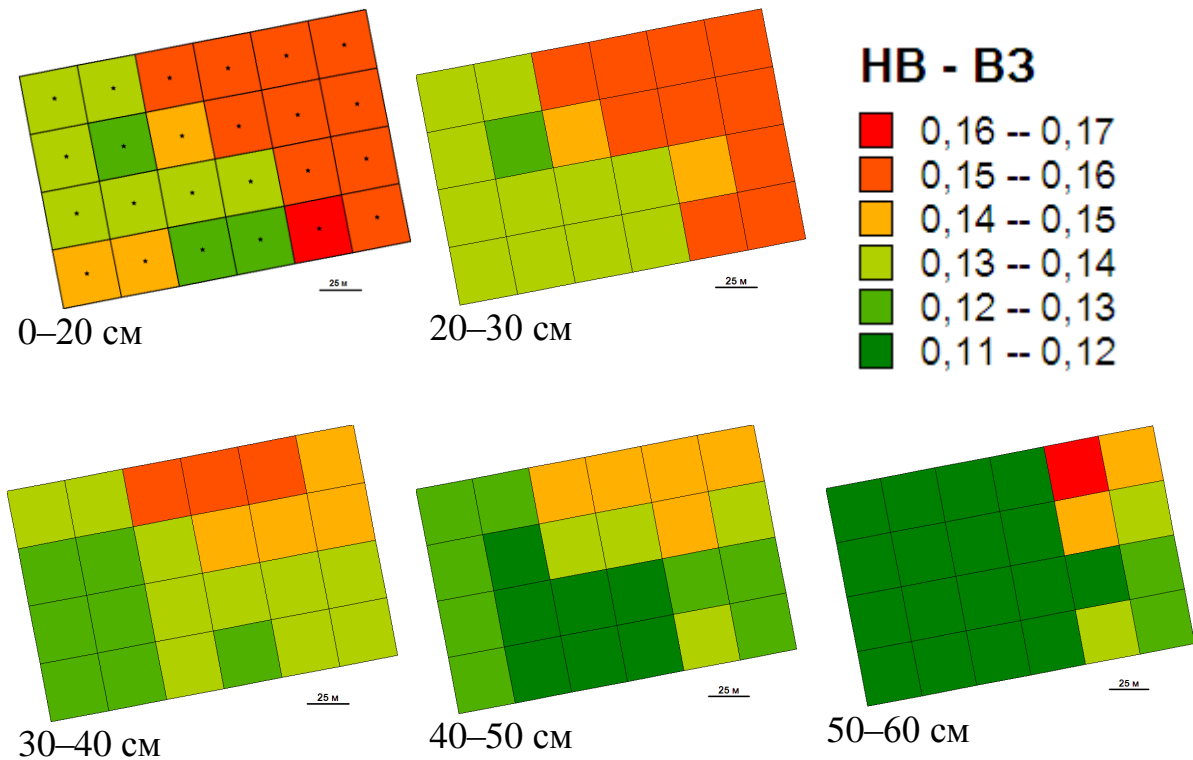


Рис. 3. Вариабельность диапазона почвенной доступной влаги (НВ-ВЗ; $\text{см}^3 \cdot \text{см}^{-3}$) на исследуемом поле

В результате проведенных модельных экспериментов в среде, разработанной ИАС, было обнаружено, что степень влияния вариабельности гидрофизических свойств по глубине и по площади поля на продукционный процесс растений достоверно зависит от погодных условий, в частности - от осадков. Исследования проводились в период 2007–2011 гг. в условиях полевого опыта с культурой яровой пшеницы. При этом для 2008 и 2010 гг. имелась возможность сравнивать результаты моделирования с данными натурных измерений на указанном поле. Полученные результаты показывают, что вариабельность урожая и фаз развития пшеницы наблюдалась только в 2008 и 2011 гг. Например, вариабельность фаз развития для указанных годов достигала 5 дней, в то время как в другие годы вариабельность урожая и фаз развития практически отсутствовала (рис. 4). На рис. 5 представлено сравнение разницы между наибольшим и наименьшим урожаем по всему полю (вариабельность

урожая) в 2008 и 2010 гг. при разных нормах азотных удобрений.

Можно предложить объяснение такому факту на основе анализа динамики влагозапаса в метровом слое почвы, который является одним из результатов моделирования и определяется на каждый день периода вегетации. Специфические погодные условия создавали благоприятный влагозапас в метровом слое почвы в 2007, 2009 и 2010 гг. (рис. 6). В 2008 году динамика влагозапаса за вегетационный период имеет характерную куполообразную форму с выпуклостью вниз, что является неблагоприятным для продукционного процесса пшеницы и усиливает влияние вариабельности гидрофизических характеристик. А в 2010 году кривая динамики влагозапаса, наоборот, имеет выпуклость вверх, что является благоприятным для продукционного процесса пшеницы и нивелирует влияние вариабельности гидрофизических характеристик.

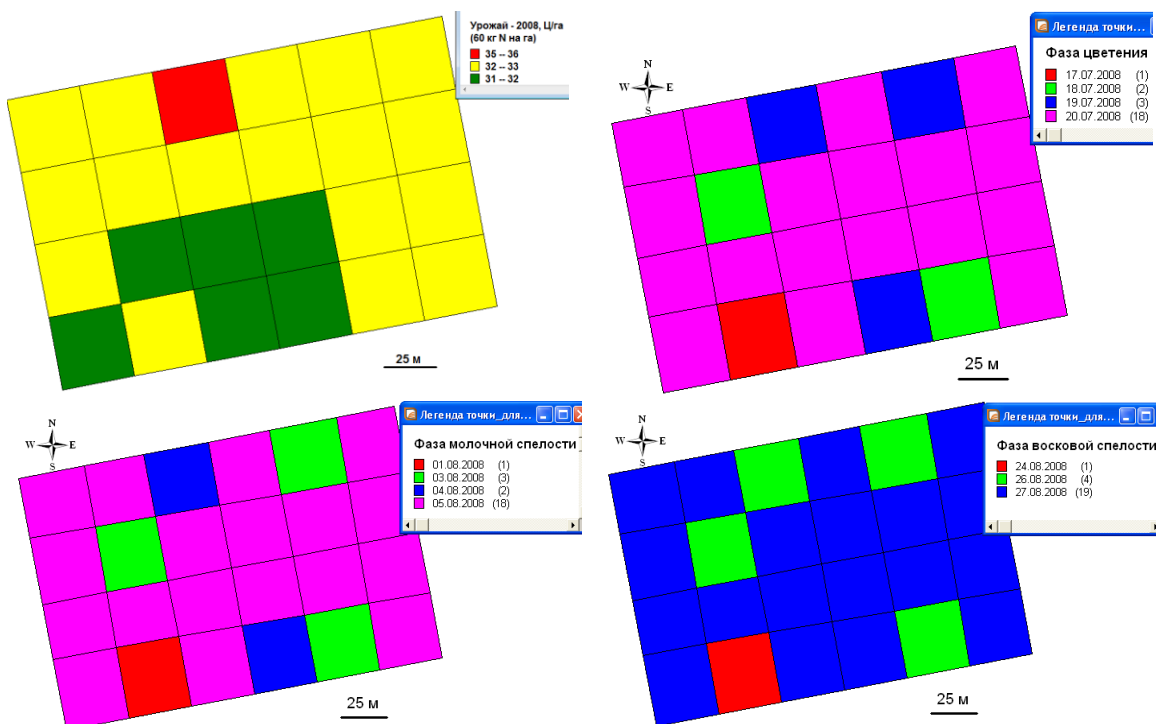


Рис. 4. Урожай и наступление различных фенофаз для яровой пшеницы в 2008 г. (норма азотных удобрений 60 кг N га⁻¹)

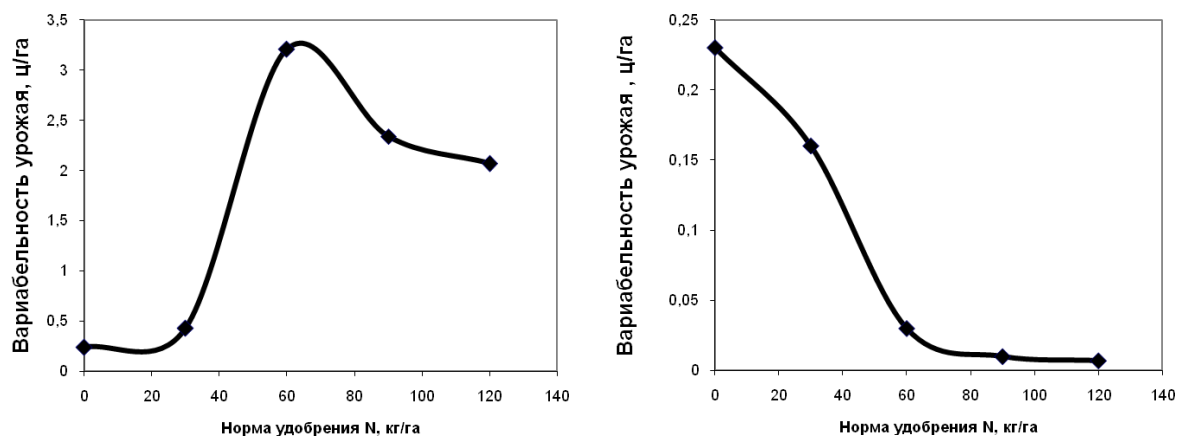


Рис. 5. Разница между наибольшим и наименьшим урожаем по всему полю (вариабельность урожая), ц га⁻¹ в 2008 (слева) и 2010 (справа) гг.

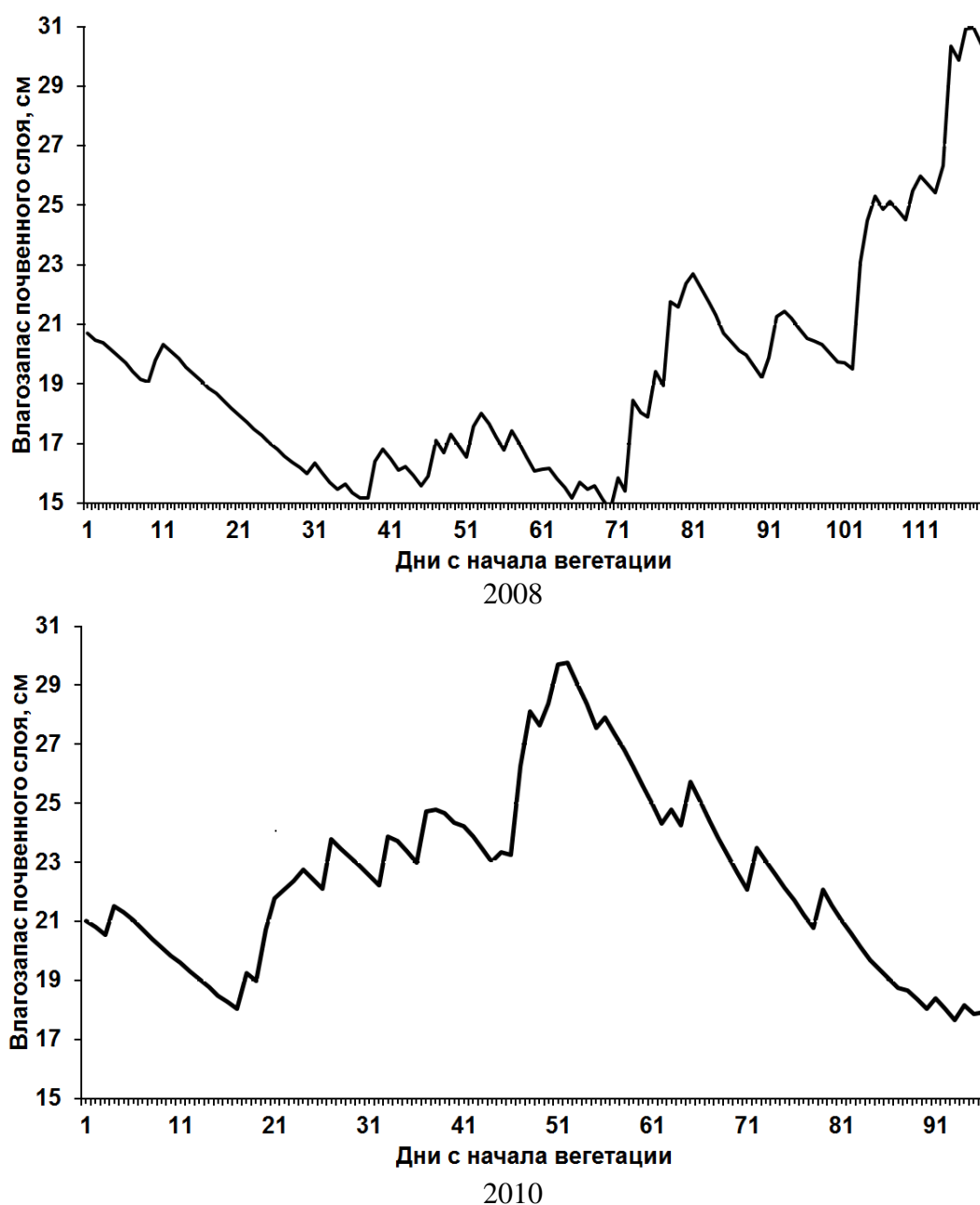


Рис. 6. Сравнение динамики влагозапаса в метровом слое в 2008 и 2010 гг.

ВЫВОДЫ

В работе представлены методические подходы к учету пространственной вариабельности гидрофизических свойств почв на основе количественных показателей продукционного процесса растений (посевов пшеницы), полученных с помощью динамической модели AGROTOOL, для принятия решений по управлению адаптивно-ландшафтными технологиями земледелия. Наличие информационно-аналитической системы, состоящей из ГИС, интегрированной с моделью продукционного процесса растений AGROTOOL, позволяет проводить компьютерные эксперименты по прогнозированию последствий проведения мелиоративных мероприятий на сельскохозяйственных полях. Разработана схема применения предлагаемых подходов при информационной поддержке принятия решений по управлению продукционным процессом. Приведены данные компьютерных экспериментов, которые позволяют утверждать, что специфические погодные условия определяют динамику влагозапаса, при которой суще-

ствующая вариабельность гидрофизических свойств либо оказывает влияние на продукционный процесс растений, либо данное влияние нивелируется.

Представленные примеры доказывают эффективность предлагаемых подходов. Совершенствование моделирования роста и развития сельскохозяйственных растений на основе учета пространственной вариабельности гидрофизических свойств почв позволит повысить обоснованность выбора агро-мелиоративных мероприятий применительно к адаптивно-ландшафтным системам земледелия. При этом использование геоинформационных технологий позволит передавать результаты исследований в другие информационные системы, в том числе региональные, а также использовать их для обоснования компромиссных решений по социально-экономическому развитию территорий и выбору стратегий природопользования.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке DAAD, DFG и РФФИ № 09-05-00415-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арефьев Н.В., Баденко В.Л., Осипов Г.К. 1998. Оценка природно-ресурсного потенциала территории с использованием ГИС-технологий. Региональная экология. 1:17.
- Арефьев Н.В., Баденко В.Л., Латышев Н.К. 2010. Геоэкологические подходы к разработке информационно-аналитических систем для гидромелиоративного строительства и природообустройства. Научно-технические ведомости СПбГПУ. 4:205-211.
- Арефьев Н.В., Баденко В.Л., Терлеев В.В., Латышев Н.К., Крылова И.Ю., Гляденкова Н.А. 2011. Определение водно-физических свойств почв при мелиоративных изысканиях. Мелиорация и водное хозяйство. 2:18-21.
- Апарин Б.Ф., Сухачева Е.Ю. 2009. Эволюция почв и почвенного покрова мелиорированных земель. Изд-во С.-Петербург. ун-та, Санкт-Петербург.
- Баденко В.Л., Осипов Г.К. 1998. Моделирование природно-аграрных систем. Научно-технические ведомости СПбГТУ. 4:32-35.
- Баденко В.Л., Латышев Н.К., Слинчук С.Г. 2009. Особенности геоинформационного обеспечения технологий точного земледелия. Информация и космос. 4:53-58.
- Баденко В.Л., Терлеев В.В., Латышев Н.К., Крылова И.Ю., Муравьева Л.С. 2011а. Агрофизические исследования почвы для технологий точного земледелия: постановка задачи и метод. Плодородие. 1:29-31.
- Баденко В.Л., Баденко Г.В., Терлеев В.В., Латышев Н.К. 2011б. ГИС-технологии в информационном обеспечении системы имитационного моделирования AGROTOOL. Агрофизика. 3:1-5.
- Благовещенский Ю.Н., Самсонова В.П. 2007. Моделирование влияния пространственной изменчивости почвенных свойств на урожайность сельскохозяйственных культур (в масштабе угодья). Агрохимия. 8:76-82.
- Гончаров В.М., Тымбаев В.Г., Фаустова Е.В. 2008. Латеральная изменчивость агрофизического состояния комплексного почвенного покрова. Почвоведение. 10:1224-1233.
- Жуковский Е.Е., Закарян Ю.А. 1983. Об учете пространственной изменчивости характеристик сельскохозяйственного поля. Науч.-техн. бюл. агрономич. физики. 54:39-42.
- Литвинович А.В. 2007. Пространственная неоднородность агрохимических показателей пахотных дерново-подзолистых почв. Агрохимия. 5:89-94.
- Моисеев К.Г. 2011. К оценке физического состояния дерново-подзолистых почв. Агрофизика. 1:38-43.
- Полужтков Р.А., Опарина И.В., Терлеев В.В. 2003. Три способа расчета динамики почвенной влаги. Метеорология и гидрология. 11:90-98.
- Полужтков Р.А., Терлеев В.В. 2005. Моделирование водоудерживающей способности почвы с использованием агрогидрологических характеристик. Метеорология и гидрология. 12:98-103.

- Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г. 2006. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. Изд. СПбГУ, Санкт-Петербург.
- Полуэктов Р.А., Терлеев В.В. 2010. Компьютерная модель динамики содержания азота в корнеобитаемом слое почвы. Агрохимия. 10:68-74.
- Самсонова В.П. 2008. Пространственная изменчивость почвенных свойств: На примере дерново-подзолистых почв. Изд-во ЛКИ, Москва.
- Терлеев В.В., Полуэктов Р.А., Бакаленко Б.И. 2012а. Структура информационного обеспечения модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. Агрофизика. 2:29-36.
- Терлеев В.В., Mirschel W., Баденко В.Л., Гусева И.Ю., Гурин П.Д. 2012б. Физико-статистическая интерпретация параметров функции водоудерживающей способности почвы Агрофизика. 4:1-8.
- Шейн Е.В., Иванов А.Л., Бутылкина М.А., Мазиров М.А. 2001. Пространственно-временная изменчивость, агрофизических свойств комплекса серых лесных почв в условиях интенсивного сельскохозяйственного использования. Почвоведение. 5:578-585.
- Якушев В.П., Полуэктов Р.А., Петрова М.В., Терлеев В.В., Петрушин А.Ф., Бакаленко Б.И. 2008а. Имитационно-экспертная система поддержки агротехнологических решений (концепция). Вестник РАСХН. 5:7-9.
- Якушев В.П., Полуэктов Р.А., Петрова М.В., Терлеев В.В., Петрушин А.Ф., Бакаленко Б.И. 2008б. Имитационно-экспертная система поддержки агротехнологических решений (реализация). Вестник РАСХН. 6:6-9.
- Terleev V.V., Mirschel W., Schindler U., Wenkel K.-O. 2010. Estimation of soil water retention curve using some agrophysical characteristics and Voronin's empirical dependence. Journal International Agrophysics. 24(4):381-387.