DOI 10.33952/2542-0720-2019-3-19-18-30
УДК 631.152+519.6

Баденко В. Л.[1], Топаж А. Г.[2], Медведев С. А.[1], Захарова Е. Т.[1], Дунаева Е. А.[3]

ОЦЕНКА ПРОДУКТИВНОСТИ АГРОЛАНДШАФТОВ В РЕГИОНАЛЬНОМ МАСШТАБЕ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ АГРОЭКОСИСТЕМЫ И ГИС

[1]Агрофизический научно-исследовательский институт;
[2] ООО «Бюро Гиперборея»;
[3]ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»

Реферат. *Динамическое имитационное моделирование агроэкосистем – современный, мощный и достаточно широко распространенный научный инструмент для анализа, мониторинга и поддержки принятия решений в агрономии и агроэкологии. Но исторически большинство моделей агроэкосистем (так называемые crop models) являются одноточечными, то есть они разработаны для целей расчета продукционного процесса сельскохозяйственного посева в одной конкретной пространственной локализации, для одной конкретной культуры и технологии выращивания. А для прогнозных оценок продуктивности агроэкосистем на сравнительно больших территориях (в масштабах страны или региона) традиционно используются более простые и приближенные методы расчета (эмпирические регрессионные модели). В настоящей работе рассмотрены особенности, преимущества и перспективы использования динамических имитационных моделей для проведения региональных (мезомасштабных) расчетов. В частности, в ней освещены вопросы информационного обеспечения моделей в региональных проектах, а также перечислены возможные прецеденты использования массовых вычислительных экспериментов с выбранной моделью или моделями агроэкосистем для поддержки решений в региональном масштабе. Предложены стандартизованные процедуры подготовки массивов пространственно-распределенных исходных данных, а также обработки и представления полученных результатов в среде ГИС. Практическая применимость описанной методики продемонстрирована на примере массовых расчетов продукционного процесса ярового ячменя в Республике Крым. В качестве источников исходной информации использована оцифрованная электронная карта почв Крыма и сценарии фактических реализаций погоды по данным записей 15 метеостанций сети WMO. Расчеты для сезонов вегетации 2012 и 2014 гг. проводили по сетке выбранных 55 реперных точек, расположенных на полях сельскохозяйственных предприятий всех районов республики. Полученные результаты позволяют оценить степень вариабельности прогнозных значений урожайности и выдвинуть гипотезу о том, что она в данном случае в большей степени обусловлена разнообразием почвенных условий, нежели пространственной неоднородностью погодных условий на всей рассматриваемой территории.*

Ключевые слова: *динамическая модель агроэкосистемы, продукционный процесс, поливариантный анализ урожайности, вычислительный компьютерный эксперимент, базы данных, геоинформационные технологии.*

Введение

Оценка продуктивности сельскохозяйственных ландшафтов играет определяющую роль в решении важнейших проблем обеспечения устойчивого регионального развития [1–3]. При этом взаимосвязь между методами ведения сельского хозяйства и динамикой ландшафта до сих пор недостаточно изучена [4–6],

хотя концептуальные подходы к поддержке принятия решений по управлению динамикой ландшафта, в том числе, основанные на динамических (биофизических) моделях агроэкосистем, уже разработаны [7–9]. Так, выбор севооборотов и соответствующих технологий играет важную роль в поддержке устойчивого развития агроландшафтов, что, в частности требует адекватного исследования с помощью методов математического моделирования динамики агроэкосистем [10–13]. Оценка продуктивности агроландшафтов на региональном уровне также тесно связана с системами сельскохозяйственного мониторинга, которые предоставляют информацию для решения задач управления и прогнозирования [14–17]. Основные проблемы использования моделей агроэкосистем для регионального планирования связаны с тем, что изначально такие модели были разработаны, калиброваны и применены только для отдельных местоположений, конкретных культур и технологий выращивания. При этом ясно, что пространственная неоднородность параметров моделирования в географическом масштабе рассматриваемого региона может быть значительной, и, следовательно, модели должны быть адаптированы к широкому спектру варьирования входных условий, то есть учитывать различия в климатических условиях и агротехнологиях, [4, 9, 10, 18]. Однако есть несколько примеров успешного применения моделей сельскохозяйственных культур для целей долгосрочного прогнозирования в региональном масштабе, в том числе на территориях бывшего СССР [4, 7, 10, 19–21]. В настоящее время расширение сферы использования моделей агроэкосистем на региональном уровне безусловно предполагает их интеграцию с географическими информационными системами (ГИС) [22–24]. В целом, основываясь на анализе последних публикаций, можно сделать вывод, что именно такое сочетание информационных систем и технологий различной функциональной направленности предоставляет возможность для изучения изменчивости продуктивности агроландшафтов в региональном масштабе как во времени, так и пространстве.

Цель исследований – представить комплексный подход, который позволяет использовать одну и ту же модель агроэкосистемы в длительном масштабе времени и в расширенном пространственном масштабе для оценки агроландшафтной продуктивности в ГИС-среде. Апробация данного метода представлена на примере Республики Крым.

Материалы и методы исследований

Анализ продуктивности и устойчивости ландшафта при расширенном сельскохозяйственном использовании для конкретного географического региона относится к так называемому мезоскопическому пространственному уровню применения модели агроэкосистемы (таблица 1), которое имеет ряд специфических особенностей и требований, связанных с подготовкой исходных данных и выбором их пространственного разрешения. Это влечет за собой использование надлежащих инструментов и методов для адекватной интерпретации результатов моделирования в среде географических информационных систем (ГИС).

При рассмотрении проблемы исходных данных для моделирования агроэкосистем на региональном уровне будем использовать стандартную классификацию областей (доменов) входных данных для динамических моделей продукционного процесса сельхозкультур, которая соответствует предложенной ранее классификации основных факторов, влияющих на их продукционный процесс [11, 16, 21]. Единственное отличие состоит в том, что отдельно рассматриваются два разных типа и источника данных о погоде: 1) информация о фактически наблюдаемой или «прошедшей» погоде на локальной метеостанции; 2) данные о прогнозируемой «будущей» погоде на оставшуюся часть

вегетационного периода. В предыдущей работе [4] мы обсуждали проблему информационного обеспечения массовых расчётов для динамически скорректированного прогнозирования агроландшафтной продуктивности на макроуровне для всех сельскохозяйственных регионов России.

Для массовых расчетов на региональном уровне главным вопросом является выбор набора контрольных (базовых) точек, где будут выполняться расчеты по модели. Они, во-первых, должны принадлежать реальным сельскохозяйственным полям и, во-вторых, в достаточной степени отражать разнообразие почвенных и климатических условий рассматриваемого региона. Для нескольких базовых точек желательно наличие исторических и текущих данных фактических полевых наблюдений и измерений, что позволяет проводить предварительную поверку и калибровку модели. Так, в описанном ниже проекте моделирования продукционного процесса ярового ячменя в масштабе Республики Крым использованы три такие базовые точки, соответствующие расположению опытных полей ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма» и данных наземных наблюдений полей хозяйств, с которыми заключены творческие договора о сотрудничестве (с. Клепинино, с. Янтарное и с. Ароматное).

Таблица 1 – Источники и типы входных данных для моделирования продукционного процесса агроэкосистем с различной пространственной детализацией

Пространственный уровень / Фактор	Микроуровень (агрохозяйство)	Мезоуровень (географический регион)	Макроуровень (страна, континент)
Почва	Детальные данные по почвенным разрезам	Почвенные карты	Почвенные карты
Местоположение	Координаты и рельеф с микро-особенностями	Координаты	Координаты
Технология	Точное земледелие	Регионализированные системы земледелия	Системы земледелия
Культура	Конкретная выращиваемая культура	Рекомендуемая в системах земледелия культура	Рекомендуемая в системах земледелия культура
Погода (актуальная)	Локальная автоматическая метеостанция	Сеть ближайших метеостанций с прогнозом	Сеть метеостанций с прогнозом
Погода (предсказанная)	Генератор погоды, откалиброванный по одной метеостанции	Пространственно-временной генератор погоды	Набор эталонных лет-аналогов /генератор погоды
Начальное состояние	Севооборот (культура-предшественник)	Вычисления по всему севообороту	Условия по системе земледелия

В региональных расчетах разумно использовать не почвенные характеристики конкретных полей и разрезов, а некоторые условные наборы почвенных параметров, которые являются наиболее типичными для региона. Источником такой информации могут быть цифровые карты почв и связанные с ними базы данных о свойствах почвы из Единого государственного реестра почвенных ресурсов России (ЕГРПР) [32], который разработан в ФГБНУ «Почвенный институт имени В. В. Докучаева» и опубликован на официальном сайте Минсельхоза России.

При описании агротехнологии в модели (даты посадки, нормы внесения удобрений и т. д.) назначается не конкретный вариант (тем более, что он, как правило, не известен), а некая усредненная технология, соответствующая

наставлениям из рекомендованных систем земледелия, которую для региональных расчетов можно принять одинаковой для всех расчетных точек.

Существует несколько динамических переменных, которые определяют начальное состояние агроэкосистемы во время запуска модели (содержание влаги в почве, подвижные формы азота в почвенном профиле и т. д.). Неоднократно показано, что динамические агроэкологические модели очень чувствительны к начальным условиям [25]. Разумным решением для региона является начать моделирование текущего вегетационного сезона не с момента посева, а с достаточным временем упреждения. Тогда весенний (или осенний для озимых культур) временной интервал моделирования динамики агроэкосистемы с почвой «без растения» (то есть с учетом только абиотических процессов) будет играть роль «раскрутки» или «разогрева» модели. Этот метод особенно удобен для задания начального содержания воды в почве, поскольку позволяет смоделировать к моменту сева не только общую влажность в корневой зоне, но и ее распределение по профилю почвы.

В последнее время не возникает сколько-нибудь серьезных проблем с получением исторических данных о фактически наблюдаемой погоде для любого географического местоположения (по крайней мере, для ближайшей метеостанции сети Всемирной метеорологической ассоциации). Существует также большое количество интернет-сервисов (https://www.worldweatheronline.com [33], www.aerisweather.com [34]), которые предоставляют специальный программный интерфейс (API) для получения в автоматическом режиме информации о краткосрочных синоптических прогнозах на основе расчетов моделей общей циркуляции атмосферы. Устойчивая прогностическая оправдываемость таких прогнозов составляет три–пять дней.

В свою очередь, для прогнозирующего или проактивного варианта моделирования в «будущем времени» или для ансамблевых статистических расчетов требуется большое количество виртуальных погодных сценариев, которые должны использоваться в качестве источника информации о погоде. В качестве таких сценариев можно использовать так называемые «годы-аналоги» или виртуальные реализации, получаемые из стохастических генераторов погоды. На сегодняшний день разработана достаточно развитая теория построения стохастических генераторов погоды как многомерного дискретного случайного процесса, а также успешная практика их интеграции в компьютерные модели культур [26, 27]. Однако специфика модельных расчетов в региональном масштабе ставит дополнительную проблему – необходимость не только временной, но и пространственной согласованности генерируемых рядов метеопараметров. Действительно, в региональном масштабе можно говорить о «хорошем сезоне» или «плохом сезоне» для растениеводства, что, в частности позволяет считать однородным регионом в смысле сельскохозяйственного производства такой географический район, где межгодовая изменчивость продуктивности сельского хозяйства значительно превышает его пространственную изменчивость внутри региона. Для проверки этой гипотезы нами была обработана статистика урожайности основных сельскохозяйственных культур по региону (Крым) и по всей России. По результатам стандартного дисперсионного анализа показано, что для региона сравнительный вклад межгодовой (временной) изменчивости в общую дисперсию на порядок превышает долю пространственной, в то время как в масштабах страны эти значения вполне сопоставимы друг с другом.

Указанные причины влекут за собой необходимость существенной модификации метода стохастического моделирования погоды в качестве входных данных моделей культур для целей регионально-ориентированного моделирования.

Основное изменение заключается в том, что сгенерированные погодные ряды для базовых (опорных) местоположений должны иметь не только временную, но и пространственную корреляцию. Это требует разработки принципиально нового стохастического генератора погоды, основанного на моделировании методом Монте-Карло пространственно-временных случайных процессов и полей. Детали разработанного математического алгоритма для генерации пространственных случайных процессов и его использования в региональных моделях культур будут представлены в следующих публикациях.

Очевидно, что на региональном уровне модели используют для решения соответствующих проблем регионального масштаба. К ним, например, можно отнести проблему рационального водопотребления, а также нахождение баланса в объемах и типах сельскохозяйственного производства [23, 28]. Решение подобных проблем предполагает тесную интеграцию моделей культур и региональной ГИС [29]. Это позволяет учитывать интересы сельхозпроизводителей при решении задач регионального планирования на разные прогнозные периоды в условиях ограниченности ресурсов, прежде всего, почвы и воды. При этом перенос результатов моделирования, полученных в отдельных точках, на уровень региона требует использования специальных алгоритмов, которые относятся к довольно широкому классу алгоритмов точечного преобразования, встроенных в современное программное обеспечение ГИС [30].

В качестве основного инструмента автоматизации массовых расчетов моделей продукционного процесса использовалось программное обеспечение APEX (Automation of Polivariant EXperiments программная среда автоматизации поливариантных экспериментов). Первоначально APEX был разработан для проектирования и проведения многофакторных компьютерных экспериментов с динамическими моделями и включает две основные функции: 1) универсальный репозиторий дескрипторов произвольных моделей культур и 2) универсальную среду для их поливариантного анализа [4, 11, 25, 31]. Поливариантный анализ означает проектирование и подготовку многомерного компьютерного тематического исследования, выполнение прогонов модели в пакетном режиме и применение современных процедур статистической обработки полученных результатов.

Результаты и их обсуждение

Апробация предложенных методов проведена для Крымского полуострова (далее – Крым). На рисунке 1 показана обзорная карта Крыма и 13 метеорологических станций, которые использовали для моделирования фактической погоды в качестве ближайших ориентиров. На рисунке 2 показана использованная карта почв Крыма (для проведения исследований нами предварительно проведена ее оцифровка) и 55 сельскохозяйственных полей, которые являются точками, где выполнено моделирование (контрольные точки). Три базовых калибровочных локации отмечены красными кружками. Легенда карты на рисунке 2 содержит 18 типов почв и соответствующих им многосвязных контуров, но только 13 из них были использованы в расчетах, поскольку некоторые почвенные контуры не содержали контрольных точек.

Расчеты проводили в среде APEX для двух вегетационных сезонов 2012 и 2014 гг. В качестве моделируемой культуры выбран яровой ячмень. На рисунке 3 представлены результаты моделирования урожайности ячменя в 2012 г. и пространственное распределение урожайности ячменя и даты его созревания (в скобках – количество точек моделирования с той же датой созревания ячменя). Для формирования однородных зон урожая ячменя применен метод полигонов Тиссена (Вороного) [30].

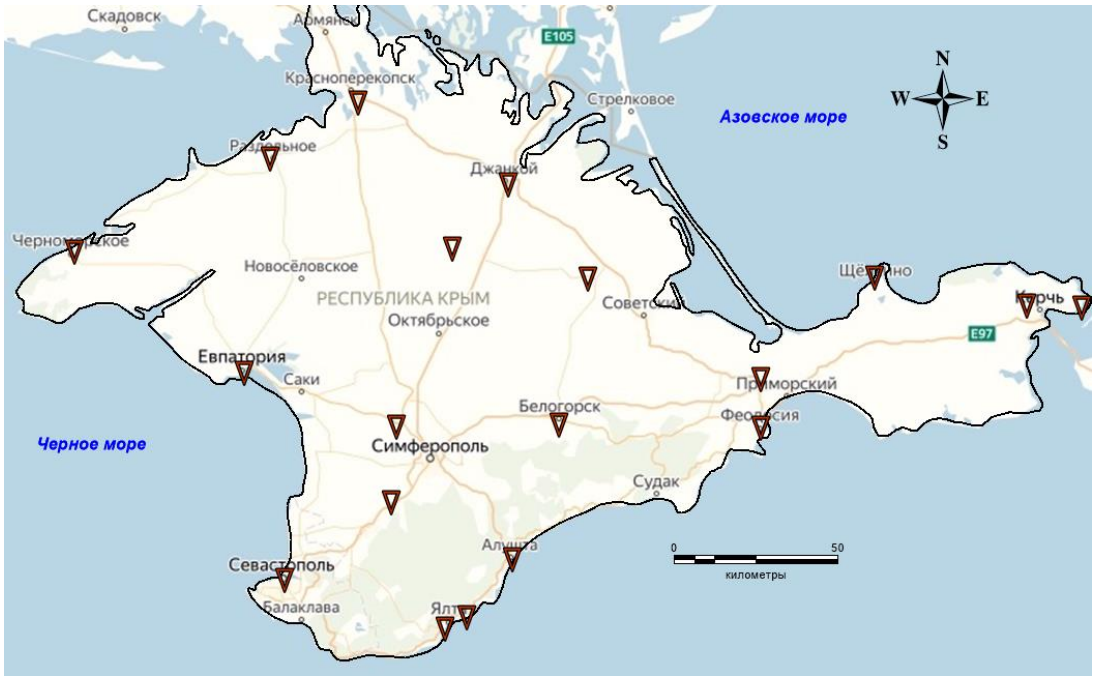

Рисунок 1 – Обзорная карта Крыма и метеостанции стационарной сети Гидрометцентра Российской Федерации

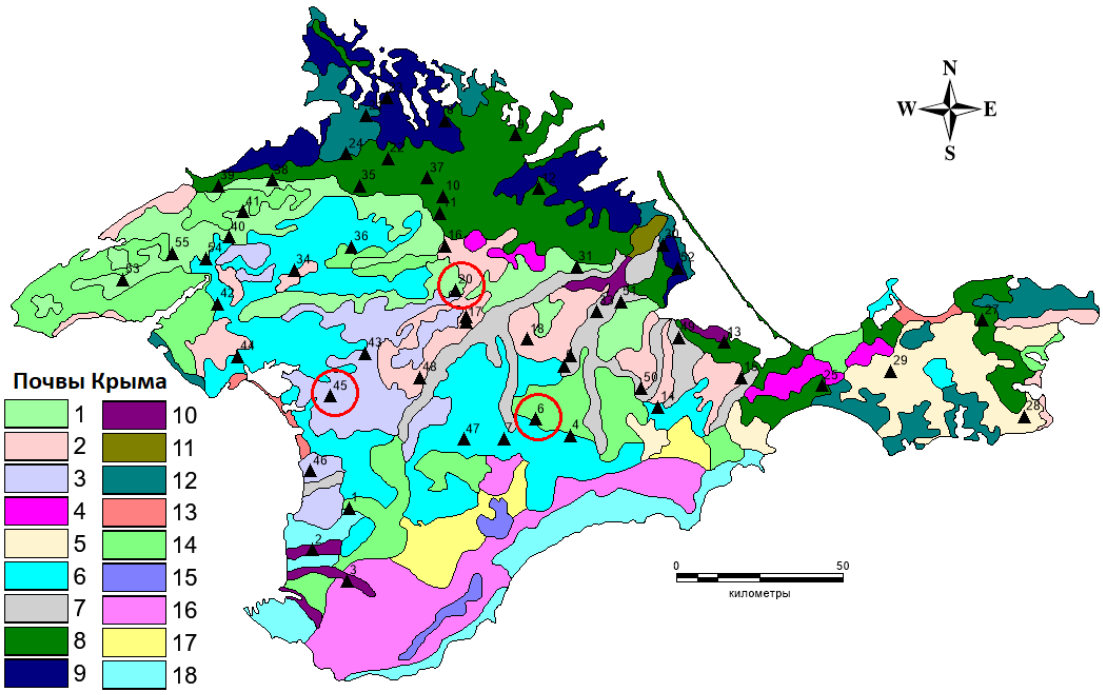

Рисунок 2 – Почвы Крыма и 55 опорных точек

Примечание. *1. Черноземы южные; 2. Черноземы южные и обыкновенные мицелярно-карбонатные (черноземы глубокие карбонатные); 3. Черноземы языковатые обыкновенные; 4. Черноземы солонцеватые; 5. Черноземы слитые; 6. Черноземы остаточно-карбонатные; 7. Лугово-черноземные; 8. Темно-каштановые; 9. Лугово-каштановые солонцеватые и солончаковатые; 10. Луговые (без разделения); 11. Луговые солонцеватые и солончаковатые; 12. Солонцы (автоморфные); 13. Горные примитивные; 14. Дерново-карбонатные (включая выщелоченные и оподзоленные); 15. Горно-луговые черноземовидные; 16. Горные лесные черноземовидные; 17. Бурые лесные слабоненасыщенные (буроземы слабоненасыщенные); 18. Горные щебнисто-органогенные.*

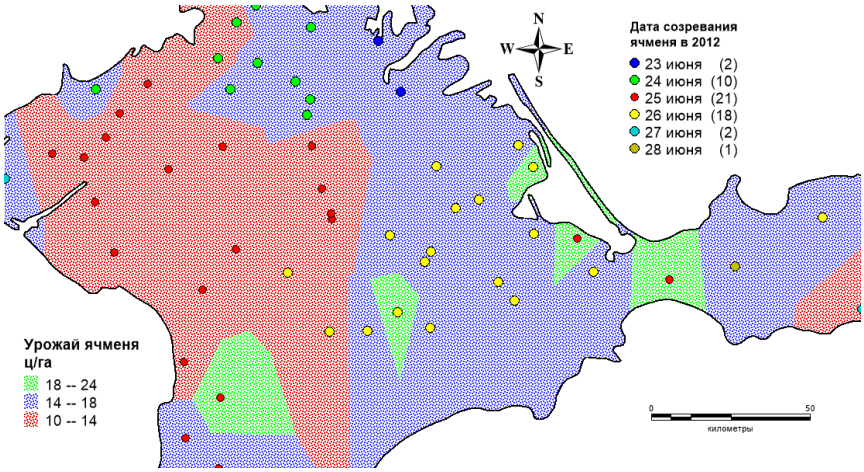

Рисунок 3 – Пространственное распределение урожайности ячменя и даты его созревания

Примечание. *В скобках указано количество точек моделирования с одинаковой датой созревания.*

Пространственное распределение всех других параметров модели, включая не только конечные (на момент сбора урожая), но и промежуточные характеристики, можно представить с помощью инструментов тематического картографирования на основе ГИС. Такие тематические карты являются эффективным средством для анализа процессов и событий, связанных с ростом и развитием сельскохозяйственных культур в регионе в течение вегетационного периода.

Пример последующей обработки компьютерного эксперимента для непространственных факторов с помощью инструментов статистического анализа, встроенных в функциональность системы APEX, представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Однофакторный анализ влияния почвы и погоды на продуктивность ячменя для регионального проекта расчета модели урожая ячменя в Республике Крым

Фактор «почва»	Средняя урожайность (т/га)		Фактор «метеостанция»	Средняя урожайность (т/га)	
	2012 г.	2014 г.		2012 г.	2014 г.
14	2,23	2,34	Владиславовка	1,80	2,26
1	1,40	2,20	Джанкой	1,42	2,38
2	1,41	2,36	Евпатория	1,39	1,72
3	1,23	2,11	Ишунь	1,36	2,35
6	1,31	1,94	Мыс Казантип, маяк (с. Мысовое)	1,81	2,49
5	1,38	2,19	Керчь	1,36	1,92
7	1,56	2,46	Клепинино	1,35	2,21
8	1,55	2,61	Крымская (г. Белогорск)	1,61	2,76
9	1,59	2,80	Новоселовская (Раздольненский р-н)	1,37	2,29
10	1,53	1,75	Нижнегорский	1,61	2,15
12	1,22	2,99	Почтовое	1,75	2,82
			Симферополь (Аэропорт)	1,19	2,28
			Черноморское	1,54	2,33
MIN	1,22	1,75	MIN	1,19	1,72
MAX	2,23	2,99	MAX	1,81	2,82
MEAN	1,49	2,34	MEAN	1,50	2,30
St. DEV	0,28	0,36	St. DEV	0,20	0,29

Показаны результаты одномерного анализа вышеупомянутых исследований для факторов «почва» (представленных номерами из таблицы 1) и «погода».

Наиболее значимым выводом из анализа таблицы 2 является то, что разнообразие почвенных условий в рассматриваемом регионе оказывает большее влияние на изменение урожайности моделей, чем пространственная неоднородность погодных условий на всей рассматриваемой территории.

Выводы

Традиционно, самые простые методы расчета (эмпирические регрессионные модели) используются для прогнозных оценок продуктивности агроэкосистем в масштабах региона. Точность результатов, полученных с их помощью, относительно невысока, и эти результаты невозможно использовать для решения задач поддержки оперативных технологических решений. Современный уровень развития вычислительных и информационных технологий позволяет в перспективе использовать для этой цели более точные и подробные динамические модели агроэкосистем. В то же время, остаются актуальными задачи по выбору оптимального агротехнического плана (путем вариативного моделирования для изучения эффектов различных вариантов) и, возможно, улучшения модели в режиме онлайн на основе результатов реальных измерений в течение вегетационного периода (путем ассимиляции данных дистанционного зондирования территорий сельскохозяйственных полей). Объем соответствующих прогонов модели (варианты расчета) при этом определяется путем одновременного варьирования нескольких влияющих факторов:

1. Пространственный фактор: набор ключевых местоположений для расчета, каждое из которых характеризуется своими географическими координатами, свойствами почвы и характеристиками изучаемой культуры, адаптированными для выращивания в данном регионе.

2. Метеорологический фактор: в задачах оперативного прогноза ожидаемой продуктивности агроэкосистем возможная динамика погоды за оставшийся период вегетационного периода моделируется с использованием «вариантов возможных траекторий», состоящих из репрезентативного числа синтетических погодных сценариев. Для их формирования следует использовать стохастический генератор погоды, который поддерживает как временные, так и пространственные корреляции между метеорологическими переменными.

3. Технологический фактор: чтобы сформировать стратегию проактивного управления процессом производства сельскохозяйственных культур, необходимо проанализировать влияние различных вариантов входных параметров (дата и качество/количество технологических операций), чтобы выбрать лучший в контексте выбранного критерия статистической оптимизации.

4. Модельный фактор: для получения достоверных результатов желательно использовать не одну, а несколько альтернативных моделей продукционного процесса агроэкосистем с интеграцией их результатов на основе анализа ансамблевых расчетов.

Одновременное изменение нескольких факторов, перечисленных выше, в соответствии с набором их градаций приводит к тому, что результирующее измерение полного факторного вычислительного эксперимента (общее количество вариантов одного прогона модели) делает невозможным выполнение всех соответствующих вычислений в последовательном режиме на стандартной персональной вычислительной технике в разумные сроки. Для реализации этих расчетов необходимо привлекать современные технологии распределенных параллельных вычислений и суперкомпьютерную технику.

Литература

1. Денисова Е. В. Оптимизация агроландшафтов Алексеевского района Волгоградской области // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. № 5-1 (83). С. 119–122.
2. Дубачинская Н. Н., Дубачинская Н. Н., Верещагина А. С. Агроэкологическая оценка агроландшафтов по продуктивности яровой пшеницы в зависимости от агромелиоративных свойств комплексных солонцовых почв в условиях Приуралья // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2019. № 2 (76). С. 47–51.
3. Mancinelli R., Di Felice V., Karkalis K., Bari S., Radicetti E., Campiglia E. Assessment of the state of agroecosystem sustainability using landscape indicators: a comparative study of three rural areas in Greece // International Journal of Sustainable Development & World Ecology. 2018. No. 25 (1). P. 35–46. DOI: 10.1080/13504509.2016.1277377.
4. Баденко В. Л., Топаж А. Г., Медведев С. А., Захарова Е. Т. Оперативно уточняющийся прогноз урожайности пшеницы в сельскохозяйственных зонах на всей территории России на базе имитационной модели продуктивности // АгроЭкоИнфо. 2018. № 3. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2018/3/st_345.doc (дата обращения 11.08.2019).
5. Мягкий П. А., Репенёк Д. А., Татаринцев В. Л., Татаринцев Л. М. Моделирование сельскохозяйственного землепользования в Алтайском крае // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2018. № 3 (161). С. 26–32.
6. Inwood S. E., López-Ridaura S., Kline K. L., Gérard B., Monsalue A. G., Govaerts B., Dale V. H. Assessing sustainability in agricultural landscapes: a review of approaches // Environmental Reviews. 2018. No. 26 (3). P. 299–315. DOI: 10.1139/er-2017-0058.
7. Баденко В. Л., Гарманов В. В., Иванов Д. А., Савченко А. Н., Топаж А. Г. Перспективы использования динамических моделей агроэкосистем в задачах средне- и долгосрочного планирования сельскохозяйственного производства и землеустройства // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2015. № 1-2. С. 72–76.
8. Nguyen T. H., Cook M., Field J. L., Khuc Q. V., Paustian K. High-resolution trade-off analysis and optimization of ecosystem services and disservices in agricultural landscapes // Environmental modelling & software. 2018. Vol. 107. P. 105–118. DOI: 10.1016/j.envsoft.2018.06.006.
9. Wenkel K. O., Berg M., Mirschel W., Wieland R., Nendel C., Köstner B. LandCaRe DSS – an interactive decision support system for climate change impact assessment and the analysis of potential agricultural land use adaptation strategies // Journal of environmental management. 2013. Vol. 127. P. 168–183. DOI: 10.1016/j.jenvman.2013.02.051.
10. Баденко В. Л., Топаж А. Г., Якушев В. В., Миршель В., Нендель К. Имитационная модель агроэкосистемы как инструмент теоретических исследований // Сельскохозяйственная биология. 2017. Т. 52. № 3. С. 437–445.
11. Medvedev S., Topaj A., Badenko V., Terleev V. Medium-term analysis of agroecosystem sustainability under different land use practices by means of dynamic crop simulation // IFIP Advances in Information and Communication Technology. 2015. Vol. 448. P. 252–261.
12. Chopin P., Blazy J. M., Doré T. A new method to assess farming system evolution at the landscape scale // Agronomy for sustainable development. 2015. Vol. 35. No. 1. P. 325–337. DOI: 10.1007/s13593-014-0250-5.
13. Dury J., Garcia F., Reynaud A., Bergez J. E. Cropping-plan decision-making on irrigated crop farms: a spatio-temporal analysis // European journal of agronomy. 2013. Vol. 50. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.eja.2013.04.008.
14. Безбородов В. Г., Гришин И. Ю., Тимиргалеева Р. Р. Космический мониторинг крупного сельскохозяйственного региона в интересах его устойчивого развития // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2018. Т. 14. № 4. С. 1028–1034.
15. Van der Velde M., Biavetti I., El-Aydam M., Niemeyer S., Santini F., van den Berg M. Use and relevance of European Union crop monitoring and yield forecasts // Agricultural systems. 2019. Vol. 168. P. 224–230. DOI: 10.1016/j.agsy.2018.05.001.
16. Jones J. W., Antle J. M., Basso B., Boot K. J., Conant R. T., Foster I., Godfray H. Ch. J., Herrero M., Howwit R. E., Janssen S., Keating B. A., Munor-Carpena R., Porter Ch. H., Rosenzweig C., Wheeler T. Toward a new generation of agricultural system data, models, and knowledge products: State of agricultural systems science // Agricultural systems. 2017. Vol. 155. P. 269–288. DOI: 10.1016/j.agsy.2016.09.021.
17. Баденко В. Л., Баденко Г. В. Роль геоинформационных технологий в мониторинге земель сельскохозяйственного назначения // Вестник факультета землеустройства Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2018. № 4. С. 7–9.
18. Топаж А. Г., Митрофанов Е. П. Ассимиляция данных в имитационном моделировании экологических процессов методом минимизации корректирующих возмущений // Вестник Санкт-

Петербургского университета. Серия 10 «Прикладная математика. Информатика. Процессы управления». 2017. № 3. С. 326–338.

19. Дунаева Е. А. Апробация агрогидрологической модели SWAT для моделирования биопродуктивности посевов // В сборнике научных трудов VI Международной научно-практической конференции «Коняевские чтения». Екатеринбург, 2018. С. 245–248.

20. Попович В. Ф., Моляр С. А. Сравнительный анализ применимости моделей AGROTOOL и WOFOST для условий степного Крыма // В сборнике научных трудов VI Международной научно-практической конференции «Коняевские чтения». Екатеринбург, 2018. С. 285–287.

21. Nendel C., Wieland R., Mirschel W., Specka X., Guddat C., Kersebaum K. C. Simulating regional winter wheat yields using input data of different spatial resolution // Field crops research. 2013. Vol. 145. P. 67–77. DOI: 10.1016/j.fcr.2013.02.014.

22. Баденко В. Л. Геоинформационные технологии для оценки влияния пространственной неоднородности водно-физических свойств почв на продуктивность зерновых культур // В сборнике материалов Международной научно-практической конференции «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. От идеи до внедрения». Санкт-Петербург, 2015. С. 207–211.

23. Арефьев Н. В., Баденко В. Л., Латышев Н. К. Геоэкологические подходы к разработке информационно-аналитических систем для гидромелиоративного строительства и природообустройства // Научно-технические ведомости СПбПУ. Серия «Естественные и инженерные науки». 2010. № 110. С. 205–210.

24. Lecerf R., Ceglar A., López-Lozano R., van Der Velde M., Baruth B. Assessing the information in crop model and meteorological indicators to forecast crop yield over Europe // Agricultural systems. 2019. Vol. 168. P. 191–202. DOI: 10.1016/j.agsy.2018.03.002.

25. Медведев С. А., Полуэктов Р. А., Топаж А. Г. Оптимизация стратегии орошения с использованием методов поливариантного анализа динамики агроэкосистем // Мелиорация и водное хозяйство. 2012. № 2. С. 10–13.

26. Полуэктов Р. А., Опарина И. В., Топаж А. Г., Миршель В. Адаптируемость динамических моделей агроэкосистем к различным почвенно-климатическим условиям // Математическое моделирование. 2000. Т. 12. № 11. С. 3–16.

27. Semenov M. A., Brooks R. J., Barrow E. M., Richardson C. W. Comparison of WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates // Climate Researches. 1998. Vol. 10. P. 95–107. DOI: 10.3354/cr010095.

28. Popovych V. F., Dunaieva I. A. Standardized precipitation index usage for reservoirs operation regime analysis // Water and Ecology. 2018. No. 3. P. 39–47. DOI: 10.23968/2305-3488.2018.20.3.39-47.

29. Баденко В. Л., Иванов Д. А., Топаж А. Г. Информационное обеспечение агроландшафтных исследований // Информация и космос. 2014. № 4. С. 52–54.

30. Арефьев Н. В., Баденко В. Л. Геоинформационные системы в природообустройстве: учебное пособие. СПб.: изд-во Политехнического университета, 2008. 108 с.

31. Медведев С. А. Технические аспекты поливариантного расчёта динамических моделей продукционного процесса сельскохозяйственных культур // АгроЭкоИнфо. 2018. № 1. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2018/1/st_113.doc (дата обращения 11.08.2019).

32. Официальный сайт Единого государственного реестра почвенных ресурсов России. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://infosoil.ru/reestr/ (дата обращения 11.08.2019).

33. Официальный сайт World Weather Online. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.worldweatheronline.com (дата обращения 11.08.2019).

34. The global weather data API & mapping platform for business [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.aerisweather.com (дата обращения 11.08.2019).

References

1. Denisova E. V. Optimization of cultivated lands of Alekseevsky district of Volgograd region // International Research Journal. 2019. No. 5-1 (83). P. 119–122.

2. Dubachinskaya N. N., Dubachinskaya N. N., Vereshchagina A. S. Agroecological assessment of agrolandscapes for spring wheat productivity depending on agromeliorative properties of complex alkaline soils under conditions of Preduralye// Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2019. No. 2 (76). P. 47–51.

3. Mancinelli R., Di Felice V., Karkalis K., Bari S., Radicetti E., Campiglia E. Assessment of the state of agroecosystem sustainability using landscape indicators: a comparative study of three rural areas in Greece // International Journal of Sustainable Development & World Ecology. 2018. No. 25 (1). P. 35–46. DOI: 10.1080/13504509.2016.1277377.

4. Badenko V. L., Topazh A. G., Medvedev S. A., Zakharova E. T. Rapidly updated forecast of wheat yield in agricultural zones throughout Russia based on a simulation model of productivity // AgroEcoInfo. 2018. No. 3. [Electronic resource]. Access point: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2018/3/st_345.doc

(reference's date 11.08.2019).

5. Myagkiy P. A., Repenek D. A., Tatarintsev V. L., Tatarintsev L. M. Modeling of agricultural land use in the Altai region // Bulletin of Altai State Agricultural University. 2018. No. 3 (161). P. 26–32.

6. Inwood S. E., López-Ridaura S., Kline K. L., Gérard B., Monsalue A.G., Govaerts B., Dale V. H. Assessing sustainability in agricultural landscapes: a review of approaches //Environmental Reviews. 2018. No. 26 (3). P. 299–315. DOI: 10.1139/er-2017-0058.

7. Badenko V. L., Garmanov V. V., Ivanov D. A., Savchenko A. N., Topazh A. G. Prospects of application of dynamic crop models in the problems of long-term planning in agriculture and land management // Russian Agricultural Sciences. 2015. No. 1-2. P. 72–76.

8. Nguyen T. H., Cook M., Field J. L., Khuc Q. V., Paustian K. High-resolution trade-off analysis and optimization of ecosystem services and disservices in agricultural landscapes // Environmental modelling & software. 2018. Vol. 107. P. 105–118. DOI: 10.1016/j.envsoft.2018.06.006.

9. Wenkel K. O., Berg M., Mirschel W., Wieland R., Nendel C., Köstner B. LandCaRe DSS – an interactive decision support system for climate change impact assessment and the analysis of potential agricultural land use adaptation strategies // Journal of environmental management. 2013. Vol. 127. P. 168–183. DOI: 10.1016/j.jenvman.2013.02.051.

10. Badenko V. L., Topazh A. G., Yakushev V. V., Mirschel W., Nendel C. Crop models as research and interpretative tools // Sel'skokhozyaistvennaya biologiya (Agricultural Biology). 2017. Vol. 52. No. 3. P. 437–445.

11. Medvedev S., Topazh A., Badenko V., Terleev V. Medium-term analysis of agroecosystem sustainability under different land use practices by means of dynamic crop simulation // IFIP Advances in Information and Communication Technology. 2015. Vol. 448. P. 252–261.

12. Chopin P., Blazy J. M., Doré T. A new method to assess farming system evolution at the landscape scale // Agronomy for sustainable development. 2015. Vol. 35. No. 1. P. 325–337. DOI: 10.1007/s13593-014-0250-5.

13. Dury J., Garcia F., Reynaud A., Bergez J. E. Cropping-plan decision-making on irrigated crop farms: a spatio-temporal analysis // European Journal of Agronomy. 2013. Vol. 50. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.eja.2013.04.008.

14. Bezborodov V. G., Grishin I. Yu., Timirgaleeva R. P. Space monitoring of the largest agricultural region in the interests of its sustainable development // Modern Information Technologies and IT-Education. 2018. Vol. 14. No. 4. P. 1028–1034.

15. Van der Velde M., Biavetti I., El-Aydam M., Niemeyer S., Santini F., van den Berg M. Use and relevance of European Union crop monitoring and yield forecasts // Agricultural systems. 2019. Vol. 168. P. 224–230. DOI: 10.1016/j.agsy.2018.05.001.

16. Jones J. W., Antle J. M., Basso B., Boot K. J., Conant R. T., Foster I., Godfray H. Ch. J., Herrero M., Howwit R. E., Janssen S., Keating B. A., Munor-Carpena R., Porter Ch. H., Rosenzweig C., Wheeler T. Toward a new generation of agricultural system data, models, and knowledge products: state of agricultural systems science // Agricultural systems. 2017. Vol. 155. P. 269–288. DOI: 10.1016/j.agsy.2016.09.021.

17. Badenko V. L., Badenko G. V. The role of geographic information technologies in monitoring agricultural land // Vestnik Faculty of Land Management Saint-Petersburg State Agrarian University. 2018. No. 4. P. 7–9.

18. Topazh A. G., Mitrofanov E. P. Assimilation of data in the imitative modeling of environmental processes by the method of minimizing corrective perturbations // Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta. Series "Prikladnaya Matematika, Informatika, Protsessy Upravleniya". 2017. No. 3. P. 326–338.

19. Dunaieva Ie. A. SWAT agrohydrological model application for crop productivity simulation // Konyaev readings. Collection of scientific papers of the VI International scientific and practical conference. Ekaterinburg, 2018. P. 245–248.

20. Popovich V. F., Molyar S. A. Comparative analysis of AGROTOOL and WOFOST models adaptability for conditions of steppe Crimea // Collection of scientific papers of the VI International scientific and practical conference. Ekaterinburg, 2018. P. 285–287.

21. Nendel C., Wieland R., Mirschel W., Specka X., Guddat C., Kersebaum K. C. Simulating regional winter wheat yields using input data of different spatial resolution // Field crops research. 2013. Vol. 145. P. 67–77. DOI: 10.1016/j.fcr.2013.02.014.

22. Badenko V. L. Geoinformation technologies for assessing the influence of spatial heterogeneity of the water-physical properties of soils on the productivity of grain crops // In the collection of materials of the International scientific and practical conference "Geodesy, cartography, geoinformatics and cadastres. From idea to implementation". Saint-Petersburg, 2015. P. 207–211.

23. Arefiev N. V., Badenko V. L., Latyshev N. K. Geoecological approaches to the development of information and analytical systems for irrigation and drainage construction and environmental management // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Series "Natural and Engineering Sciences". 2010. No. 110. P. 205–210.

24. Lecerf R., Ceglar A., López-Lozano R., van Der Velde M., Baruth B. Assessing the

information in crop model and meteorological indicators to forecast crop yield over Europe // Agricultural systems. 2019. Vol. 168. P. 191–202. DOI: 10.1016/j.agsy.2018.03.002.

25. Medvedev S. A., Poluektov R. A., Topazh A. G. Optimization of irrigation strategies using multivariate analysis methods of the agroecosystems dynamics // Melioration and Water Management. 2012. No. 2. P.10–13.

26. Poluektov R. A., Oparina I. V., Topazh A. G., Mirshel V. Adaptability of dynamic models of agroecosystems to various soil and climatic conditions // Mathematical modeling. 2000. Vol. 12. No. 11. P. 3–16.

27. Semenov M. A., Brooks R. J., Barrow E. M., Richardson C. W. Comparison of WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates // Climate Researches. 1998. Vol. 10. P. 95–107. DOI: 10.3354/cr010095.

28. Popovych V. F., Dunaieva Ie. A. Standardized precipitation index usage for reservoirs operation regime analysis // Water and Ecology. 2018. No. 3. P. 39–47 DOI: 10.23968/2305-3488.2018.20.3.39-47.

29. Badenko V. L., Ivanov D. A., Topazh A. G. Information support of agro-landscape researches // Information and Space. 2014. No. 4. P. 52–54.

30. Arefiev N. V., Badenko V. L. Geoinformation systems in environmental management: a training manual. Saint-Petersburg: publishing house of the Polytechnic University, 2008. 108 p.

31. Medvedev S. A. Technical aspects of multivariate calculation of dynamic models of the production process of crops // AgroEcoInfo. 2018. No. 1. [Electronic resource]. Access point: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2018/1/st_113.doc (reference's date 11.08.2019).

32. Official web-site Unified State Register of Soil Resources of Russia. [Electronic resource]. Access point: http://infosoil.ru/reestr/ (reference's date 11.08.2019).

33. Official web-site World Weather Online. [Electronic resource]. Access point: https://www.worldweatheronline.com (reference's date11.08.2019).

34. The Global Weather Data API & Mapping Platform for Business. [Electronic resource]. Access point: www.aerisweather.com (reference's date 11.08.2019).

UDC 631.152+519.6

Badenko V. L., Topazh A. G., Medvedev S. A., Zakharova E. T., Dunaieva Ie. A.

ASSESSMENT OF PRODUCTIVITY OF AGROLANDSCAPES ON THE REGIONAL SCALE ON THE BASIS OF INTEGRATION OF THE SIMULATION MODEL OF AGROECOSYSTEM AND GIS

Summary. *Evaluation of the productivity of agricultural landscapes plays an important role in solving the issue of ensuring sustainable development of rural territories. Dynamic simulation of agroecosystems is a modern, powerful and widespread scientific tool for analysis, monitoring and supporting decision-making in agronomy and agroecology. However, historically, most models of agroecosystems (the so-called crop models) are single-point, that is, they were developed for calculating the production process of agricultural sowing in one specific spatial location, for one specific crop and growing technology. For predictive estimates of the productivity of agroecosystems in the relatively large areas (on a national or regional scale), simpler and approximate calculation methods (empirical regression models) are traditionally used. This paper discusses the features, advantages, and prospects of using dynamic simulation models for regional (mesoscale) calculations. In particular, it raises issues of information support of models in regional projects and lists possible precedents for using mass computational experiments with a selected model or models of agroecosystems to support solutions on a regional scale. Standardized procedures for preparing arrays of spatially distributed source data, as well as processing and presenting the results in a GIS environment, are proposed. The practical applicability of the described methodology is demonstrated by the example of mass calculations of the production process of spring barley in the Republic of Crimea. As sources of initial information, a digitized electronic map of the Crimean soils and scenarios of actual weather realizations were used according to the records of 15 weather stations of the WMO network. The calculations for the vegetation seasons of 2012 and 2014 were carried out according to the grid of the selected 55 reference points located on the fields of agricultural enterprises of all regions of the republic. The obtained results*

make it possible to assess the degree of variability of the predicted yield values and to hypothesize that in this case it is more determined by the diversity of soil conditions than by the spatial heterogeneity of weather conditions at this territory.

Keywords: *dynamic model of agroecosystem, production process, multivariate yield analysis, computational computer experiment, databases, geoinformation technologies.*

Баденко Владимир Львович, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории математического моделирования агроэкосистем ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»; 195220, Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14; e-mail: vbadenko@gmail.com.

Топаж Александр Григорьевич, доктор технических наук, заместитель директора по науке ООО «Бюро Гиперборея»; 193312, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Подвойского, 40, корп. 2, кв. 87; e-mail: aleksandr.topazh@bureauhyperborea.ru.

Медведев Сергей Алексеевич, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник лаборатории математического моделирования агроэкосистем ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»; 195220, Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14; e-mail: glorguin@yandex.ru.

Захарова Елена Томовна, научный сотрудник лаборатории математического моделирования агроэкосистем ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»; 195220, Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14; e-mail: elenazaharova.afi@gmail.com.

Дунаева Елизавета Андреевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории ГИС технологий и моделирования агроэкосистем ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»; 295493, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 150; e-mail: dunaeva_e@niishk.ru.

Badenko Vladimir Lvovich, Dr. Sc. (Tech.), chief researcher, Laboratory for mathematical modeling of agroecosystems, FSBSI “Agrophysical Research Institute”; 14, Grazhdanskiy prospect, Saint-Petersburg, 195220, Russia; e-mail: vbadenko@gmail.com.

Topazh Aleksandr Grigorevich, Dr. Sc. (Tech.), deputy director for science, “Bureau Hyperborea”, Ltd.; 40 Podvoiskiy str. flat 87, build. 2, Saint-Petersburg, 193312; Russia e-mail: aleksandr.topazh@bureauhyperborea.ru.

Medvedev Sergey Alekseevich, Cand. Sc. (Agr.), researcher, Laboratory for mathematical modeling of agroecosystems, FSBSI “Agrophysical Research Institute”; 14, Grazhdanskiy prospect, Saint-Petersburg, 195220, Russia; e-mail: glorguin@yandex.ru.

Zakharova Elena Tomovna, researcher, Laboratory for mathematical modeling of agroecosystems, FSBSI “Agrophysical Research Institute”; 14, Grazhdanskiy prospect, Saint-Petersburg, 195220, Russia, e-mail: elenazaharova.afi@gmail.com.

Dunaieva Ielizaveta Andreevna, Cand. Sc. (Tech.), senior researcher of GIS technology and agroecosystem modeling Laboratory, FSBSI “Research Institute of Agriculture of Crimea”; 150, Kievskaya str., Simferopol, 295493, Russia; e-mail: dunaeva_e@niishk.ru.

Дата поступления в редакцию – 10.09.2019.
Дата принятия к печати – 01.10.2019.