

УДК 502/504:631.1

Ю. П. ДОБРАЧЕВ

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение

«Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова», г. Москва

А. Л. СОКОЛОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», г. Москва

МОДЕЛИ РОСТА И РАЗВИТИЯ РАСТЕНИЙ И ЗАДАЧА ПОВЫШЕНИЯ УРОЖАЙНОСТИ

Статья посвящена вопросам использования моделей формирования урожая в управлении сельскохозяйственным производством. Авторы подчеркивают, что использование модельного подхода особенно эффективно, если его сочетать с применением в технологий точного земледелия. В статье дается краткий обзор моделей продукционного процесса, разработанных за последние 40 лет. Разработана классификация моделей агроценозов, отражающая современное состояние вопроса. По своему назначению модели могут быть разделены на два основных класса: предназначенные для теоретических исследований и для решения практических задач. Модели для исследовательских целей служат для накопления и интеграции знаний, выполнения исследований и проверки гипотез, обучения студентов, междисциплинарных обменов информацией. Модели для практических целей позволяют решать широкий спектр технологических, экономических и экологических задач. По своему содержанию и формальному описанию модели можно подразделить на эвристические (статические) и причинно-следственные (динамические). В основу эвристических моделей закладываются различные подходы и концепции: черный ящик, обратная связь и передаточные функции, нахождение и описание статистических закономерностей в наблюдаемых или экспериментальных данных и другие методы, позволяющие связать отклик или реакцию моделируемого объекта на внешнее воздействие. По степени визуализации процессов модели можно подразделить численные (2D), структурные (3D) и структурно-функциональные модели. Авторы приходят к выводу, что методология имитационного моделирования растительных объектов заслуживает более широкого применения и развития в исследованиях экологических и агробиологических систем. Использование моделей роста и развития растений в управлении сельскохозяйственным производством в сфере экономики и технологии является одним из действенных средств повышения урожайности и рационального использования природных ресурсов.

Модель роста и развития растений, агроценоз, урожайность сельскохозяйственных культур, точное земледелие, классификация.

Введение. Обеспечение продовольственной безопасности является ключевой задачей, стоящей перед обществом. Хотя за последние несколько десятилетий, урожайность ряда культур в мире значительно выросла, уровень урожайности в РФ отстает от мировых показателей. Есть ряд факторов, несущих угрозы продовольственной безопасности России, например, глобальное изменение климата, в частности, повышенные частоты возникновения экстремальных погодных явлений, таких как наводнения, засухи и др. Повышение урожайности остается одной из наиболее актуальных задач, стоящих перед отечественной сельскохозяйственной наукой.

Среди традиционных способов

решения данной проблемы наиболее перспективными по-прежнему являются селекция растений и, получающая все большее распространение за рубежом, генная инженерия высокопродуктивных и устойчивых сортов сельскохозяйственных культур. В настоящее время в сельскохозяйственной практике России высокая продуктивность посевов достигается за счет использования гибридного посевного материала и сортовой агротехники с высоким насыщением технологическими операциями, такими как: подкормки, обработка посевов химическими средствами защиты культурных растений от болезней, вредителей и сорняков на фоне высоких доз удобрений, современных

систем орошения и дренажа. Очевидно, что даже при высокой урожайности посевов необходимая экономическая эффективность таких технологий достигается только в случае высоких закупочных цен на продукцию. При этом затраты на производство единицы продукции сопоставимы с тепличными технологиями, поэтому наблюдающийся прогресс характерен только для отдельных овощеводческих и садоводческих предприятий.

Еще одним из наиболее мощных факторов современного растениеводства является информационное сопровождение производственных процессов, обеспечивающее адаптацию номинальных параметров агротехнологий к реальным почвенно-климатическим характеристикам агроландшафта, дифференцированное назначение тех или иных технологических мероприятий и операций, сроков их выполнения в зависимости от текущего состояния почв, посевов и погоды или наличия ресурсов, а также прогнозирование урожайности и производственных рисков [1].

Материал и методы. Бурное развитие цифровой техники, средств связи и дистанционного зондирования земной поверхности открыло новые возможности для использования в сельскохозяйственной практике динамических моделей агроценозов, позволяющих управлять процессом формирования урожая, учитывая при этом конкретные почвенные и погодные условия. Возможность осуществлять оптимальное управление динамическим процессом роста и развития растений на основе текущей агро- и метеоинформации, регулируя минеральное питание, режим орошения и другие факторы жизни растений, позволяет получать гарантированную продуктивность посевов при минимальных ресурсных затратах. Так, согласно нашим исследованиям, по изучению влияния орошения при дождевании на урожайность ряда зерновых культур, при оперативном управления водным режимом посевов можно добиться повышения продуктивности на 5...30 % по сравнению с традиционным подходом назначения поливов [2]. При использовании более совершенных способов полива, например, капельного, комбинированного или внутрпочвенного орошения, наблюдающийся значительно больший прирост продуктивности связан с эффектом синергизма, обеспеченным техническими

возможностями реализации строго дозированного и своевременного управляющего воздействия на посев [2]. Регулирование минерального питания посевов и других факторов жизнедеятельности растений оказывает тем более выраженное влияние на продуктивность, чем сложнее почвенно-климатические условия выращивания.

Известно, что эффекты от управления отдельными факторами не просто складываются, а усиливают друг друга, в результате чего совокупный эффект может значительно превосходить их сумму. Это подтверждает практика точного (координатного) земледелия, при которой осуществляется комплексное регулирование разнообразных факторов на каждом однородном по характеристикам плодородия участкам поля. Так по результатам применения данной технологии одним из фермеров ФРГ повышение урожайности достигало 30 % при одновременном снижении затрат на минеральные удобрения на 30 % и на ингибиторы на 50 % [3].

В технологиях точного земледелия использование моделей формирования урожая в управлении процессом выращивания сельскохозяйственной продукции имеет значительный потенциал [4]. Многие современные модели сельскохозяйственных культур, агроценозов и агроэкосистем, способные отображать взаимодействие растений с окружающей средой, были разработаны специально для этой технологии.

Основу точного земледелия составляют информационные и технические средства мониторинга и управления производством растениеводческой продукции, которое осуществляется путем пространственно распределенного регулирования таких агротехнических факторов как плотность посева, внесение удобрений, орошение и другие, при этом должна в полной мере учитываться пространственная изменчивость агроценоза, включая микроклимат, неоднородность почвенного покрова и подпочвенного горизонта и состояние растений в посеве [5]. Эффективность новых технологий проявляется не только в существенном повышении урожайности, но и экономии ресурсов, снижении антропогенной нагрузки на окружающую среду [6].

Успех данного подхода в значительной степени зависит от возможности достоверного прогнозирования роста и

развития растений в исходном состоянии среды и реакции посева на изменения условий выращивания, что достижимо только с помощью адекватных динамических и комплексных многофакторных моделей и соответствующих технических средств мониторинга состояния почв и посевов (микро-метеостанции, дистанционное зондирование с помощью летающих роботов, передвижные экспресс анализаторы почв и др.).

За последние сорок лет разработано большое количество различных моделей, имитирующих и раскрывающих различные механизмы продукционного процесса. Среди них следует отметить работы де Вита, Торнли, Эдвардса (С. Т. de Wit, J. H. V. Thornley, Charles Edwards), инициировавшие развитие не только имитационного моделирования фитоценозов, но и экологической физиологии растений [7, 8].

В нашей стране большой вклад в разработку моделей продуктивности растительного покрова внесли Ю. К. Роос, Х. Г. Тооминг, Е. П. Галямин, В. В. Шабанов, Р. А. Полуэктов, О. Д. Сиротенко, Ю. П. Добрачев и др. [1, 9, 10, 11, 12, 13].

Результаты и обсуждение. Рассмотрим, подробнее, какие бывают модели, и приведем их простейшую классификацию, дифференцируя группы моделей по их назначению, формальным методам описания, пространственной и факторной размерности отображения растительного объекта.

По своему назначению модели могут быть разделены на два основных класса: предназначенные для теоретических исследований и для решения практических задач.

Модели для теоретических исследований создаются как инструментарий для изучения биологических процессов, протекающих в посевах, в отдельных особях, в органах и тканях растений, для проверок различных научных гипотез. Они позволяют рассматривать и анализировать важнейшие биологические, биофизические и биохимические процессы роста и развития растений в их взаимосвязи и под воздействием внешней среды. Модели позволяют выделить и оценить роль наиболее значимых эндогенных и экзогенных факторов, влияющих на продуктивность, скорость созревания плодов, водный

обмен и другие процессы. К этой категории можно отнести 3D-модели, описывающие структуру отдельного растения, его рост в трехмерном пространстве и связанные с этим оптические характеристики развивающегося одновидового посева [14].

Модели для исследовательских целей служат для накопления и интеграции знаний, выполнения исследований и проверки гипотез, обучения студентов, междисциплинарных обменов информацией.

Модели для практических целей позволяют решать широкий спектр технологических, экономических и экологических задач. Они предназначены для прогнозирования дохода от производства растениеводческой продукции, климат-контроля парниковых культур, управления технологией выращивания сельскохозяйственных культур в теплицах и открытом грунте, управления межхозяйственным и внутрихозяйственным водораспределением на гидромелиоративных системах, информационного обеспечения системы поддержки принятия экономических и экологических решений регионального уровня и уровня отдельного предприятия [15]. Простая и практичная модель, позволяющая рассчитать урожай в зависимости от режима орошения и различных факторов внешней среды, разработана Шабановым В. В. на кафедре мелиорации и рекультивации земель Московского государственного университета природообустройства [11].

Стоит отметить, что в силу сложности объекта моделирования, его многоуровневой организации, к настоящему времени не существует и не может существовать универсальной модели, которая бы обеспечивала возможность решение всех задач и проблем. Необходимы самые разнообразные модели, решающие как общие, концептуальные, так и вполне конкретные, актуальные научные и практические задачи. Как правило, эти задачи связаны между собой различными содержательными либо целевыми установками. Так, использование сложной модели, разработанной для исследовательских целей, позволяет обнаружить контринтуитивные закономерности, проявляющиеся в системе «почва-растение-атмосфера», выявить наиболее значимые факторы, влияющие на продукционный процесс, а затем, на основе этих знаний сформировать более простую

и быстродействующую модель для управления технологией выращивания культуры в заданной почвенно-климатической зоне или в теплице.

По своему содержанию и формальному описанию модели можно подразделить на **эвристические** (статические) и **причинно-следственные** (динамические).

В основу **эвристических** моделей закладываются различные подходы и концепции: черный ящик, обратная связь и передаточные функции, нахождение и описание статистических закономерностей в наблюдаемых или экспериментальных данных и другие методы, позволяющие связать отклик или реакцию моделируемого объекта на внешнее воздействие. В научной литературе представлено огромное количество удачных и востребованных эвристических моделей, достоверно отражающих корреляционные связи и функциональные зависимости между входом и выходом изучаемых систем, но слабо вскрывающих внутренние механизмы и закономерности, которым подчиняется поведение системы.

Причинно-следственные модели изначально формируются таким образом, чтобы множество поведенческих атрибутов моделируемого объекта проявлялось как следствие развития взаимодействующих между собой и с внешней средой внутренних механизмов и процессов, хорошо изученных и описываемых относительно простыми функциями. Модели данного класса, как правило, являются многофакторными, включая, в том числе временной фактор, обеспечивающий возможность отображения динамических свойств объекта. Выход таких моделей также представлен расчетными параметрами и характеристиками, описывающими состояние объекта и траекторию переходов из одного состояния в другое в форме временных многомерных рядов. Например, кроме интенсивности фотосинтеза, могут быть ряды накопления биомассы, нарастания площади листьев и корней, транспирации и поглощения элементов минерального питания, даты фенологического развития и другие характеристики.

Причинно-следственные модели, будучи формальными, являются по своей сути содержательными и в свою структуру включают подмодели, по крайней мере, на один иерархический уровень ниже, чем

основная модель. Например, в модель роста растения входит подмодель роста корневой системы, испарения влаги с растительного покрова, апертуры листовых устьиц. Чем больше иерархических уровней содержит модель, тем выше ее потенциальные возможности по описанию реальных процессов.

По степени визуализации процессов модели можно подразделить численные (2D), структурные (3D) и структурно-функциональные модели.

Численные (2D) модели представляют собой традиционные модели, результаты которых выдаются в виде числовых рядов, таблиц, различного вида диаграмм и графиков.

Структурные (3D) модели растений, которые называют также геометрическими моделями растения, предназначены для имитации формирования структуры посева или растения. В этих разработках ученые столкнулись с рядом проблем. Сложность описания развития пространственной организации одиночного растения связана с структурным многообразием процессов ветвления, которое задается не только генотипом, но и фенотипической пластичностью архитектоники, обусловленной воздействием внешних факторов. К ним относится влияние конкурентных отношений с соседними особями (затенение, площадь питания) в одновидовых и многовидовых фитоценозах. Использование междисциплинарных подходов и современных достижений компьютерной графики позволили в значительной мере преодолеть эти трудности [16].

Функционально-структурные модели растений (FSPM) позволяют имитировать фенологическое развитие, формирование органов и структуры растений в фитоценозе, опираясь на описание динамики физиологических процессов под воздействием факторов внешней среды. Численные эксперименты по заданным сценариям сопровождаются визуализацией пространственного строения растения или посева в объемном формате. Функционально-структурные модели растений позволяют исследовать и интегрировать отношения между архитектурой растения и физиологическими процессами, лежащими в основе его роста и развития. В последние годы функционально-структурный подход расширил области

своего применения. Созданы модели роста и развития, которые описывают процессы, протекающие на биохимическом, клеточном и органном уровне обеспечивающие возможность отображения формирования габитуса растений и структурной организации посева под влиянием факторов внешней среды. В то же время разработаны модели, функционирующие на макроскопическом уровне, в масштабах целых растений и растительных сообществ. Спектр существующих FSPM-моделей достаточно широк – от многоклеточных водорослей до древесной растительности [14, 17, 18].

Выводы

Многообразие созданных и разрабатываемых моделей роста растений и формирования урожая, быстрота внедрения новых методов и достижений современной науки и техники в их разработку и информационное обеспечение свидетельствует о том, что это направление науки во многом определило свои задачи, пути их решения и спектр возможного применения. Достижения последних лет показывают, что методология имитационного моделирования растительных объектов заслуживает более широкого применения в исследованиях экологических и агробиологических систем.

В настоящее время не существует других столь же мощных средств исследования интегративной и экологической физиологии растений. Количественная оценка значений различных физиологических, морфологических, фенологических и трофических особенностей, характеристик состояний, проведение неосуществимых на практике экспериментов и исследование механизмов интеграции от наследственной активности ферментных систем до формообразования и ценотических взаимоотношений – все это в пределах возможностей имитационного моделирования. Необходимо отметить требования практики к разработкам различных классов более совершенных и эффективных моделей и систем управления, обеспечивающих повышение урожайности и качество сельскохозяйственной продукции. Имитационные системы, предназначенные для исследовательских целей, играют важную роль в процессе разработки прикладных моделей.

Сельское хозяйство, мелиорация

и другие отрасли народного хозяйства, связанные с растениеводством, все в большей мере используют информационные системы управления технологиями выращивания сельскохозяйственных культур. Использование моделей роста и развития растений в управлении сельскохозяйственным производством в сфере экономики и технологии является одним из действенных средств повышения урожайности и рационального использования природных ресурсов.

Библиографический список

1. Полуэктов Р. А. Динамические модели агроэкосистем. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 312 с.
2. Соколов А. Л. Оптимизация управления водным режимом сельскохозяйственных культур с учетом влагопереноса: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: ТСХА, 1985. – 22 с.
3. Точное земледелие (Precision Agriculture) / Агрофизпродукт (Электронный ресурс). – URL: http://www.agrophys.com/Agrophys_files/Preagro/preagro.html (Дата обращения 31.03.2016).
4. Zhu X. G., Zhang G. L., Tholen D, et al. Thenextgenerationmodelsforcrops and agro-ecosystems // Sci. ChinaInfSci. – 2011. – Vol. 54. – Doi: 10.1007/s11432-011-4197. – P. 589–597.
5. Stafford J. V. Implementing precision agriculture in the 21st century // Journal AgrEngRes. – 2002. – Vol. 76. – P. 267–275.
6. Беленков А. И. Перспективы использования точного земледелия при производстве растениеводческой продукции // Нивы Зауралья. – 2014. – № 5(116).
7. Thornley J. H. B. Respiration, growth and maintenance in Plants // Nature. – 1976. – Vol. 227. – P. 233.
8. Wit C. T. de. BACROS, abasiccrop simulator. Simulationmonogr. (prepr.). 1975.
9. Росс Ю. К. Радиационный режим и архитектура растительного покрова. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 542 с.
10. Галямин Е. П. Оптимизация оперативного распределения водных ресурсов. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 272 с.
11. Шабанов В. В. Влагообеспеченность яровой пшеницы и ее расчет. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 141 с.
12. Сиротенко О. Д. Математическое моделирование водно-теплового режима

и продуктивности агроэкосистем. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 167 с.

13. Головатый В. Г., Добрачев Ю. П., Юрченко И. Ф. Модели управления продуктивностью мелиорируемых агроценозов. – М.: ВНИИГиМ, 2001. – 98 с.

14. Kang M. G., Cournide P. H., Mathieu A., Letort V., Qi R. A Functional-Structural Plant Model: Theories and its Applications in Agronomy (Cao, W. and White, J. and Wang, E.). Crop Modeling and Decision Support. – Springer, 2009. – P. 148–160

15. Петрова С. А. Совершенствование оперативного управления процессами в растениеводстве // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. – 2011. – № 6. – С. 62–64.

16. Deussen O., Lintermann B. Digital Design of Nature: Computer Generated Plants and Organics. – Springer, 2005. – 307 p.

17. Sievden R., Perttunen J., Nikinmaa E., Posada J. M. Functional Structural Plant Models – Case LIGNUM. (Invited Talk). In: Proceedings of Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA) // Third International Symposium on , 9–13 Nov. 2009, IEEE Compute Society, doi: 10.1109/PMA.2009.64. – P. 3–9,

18. Allen M. T., Prusinkiewicz P., DeJong

T. M. Using L-systems for modeling source-sink interactions, architecture and physiology of growing trees: the L-PEACH model // New Phytologist. – 2005. – Vol. 166(3). – P. 869–880.

Материал поступил в редакцию 31.03.2016.

Сведения об авторах

Добрачев Юрий Павлович, доктор технических наук, профессор; заведующий отделом; Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова»; 127550, г. Москва, ул. Б. Академическая 44, к. 2; тел.: 8(499)153-07-29; e-mail: dobrachev@vniigim.ru.

Соколов Андрей Львович, кандидат технических наук, доцент; старший научный сотрудник; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»; 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская д. 49; тел.: 8(499)976-0480; e-mail: andrey.sokolov2014@yandex.ru.

YU. P. DOBRACHEV

The Federal state budget scientific institution

«The All-Russian research institute of hydraulics and land reclamation named after A. N. Kostyakov», Moscow

A. L. SOKOLOV

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

«Russian Timiryazev State Agrarian University», Moscow

MODELS OF PLANTS GROWTH AND DEVELOPMENT AND TASK OF RAISING CROPS PRODUCTIVITY

The article is devoted to the use of models of formation of a crop in the management of agricultural production. The authors emphasize that the use of modeling approach is particularly effective if it is combined with the use in precision agriculture. The article provides a brief overview of the models of the production process, developed over the past 40 years. The classification models of formation of a crop reflecting the current state of the question. According to the destination model can be divided into two basic classes: dedicated to theoretical studies and to solve practical problems. Models for research purposes are used for accumulation and integration of knowledge, implementation research and testing hypotheses, student learning, interdisciplinary information exchange. Models for practical purposes, allow solving a wide range of technological, economic and environmental objectives. By their nature, and the formal description of the model can be divided into heuristic (static) and causal (dynamic). The basis of the heuristic models laid different approaches and concepts: black box, feedback and transfer functions, finding and description of statistical regularities in the observed or experimental data and other methods to link the response or reaction of the simulated object to an external stimulus. In terms of process visualization model can be divided into numerical (2D), structural (3D) structural and functional models. The authors conclude that the methodology of simulation objects plant deserves wider application

of research and development in environmental and agro-biological systems. Using models of plant growth and development in the management of agricultural production in the area of economy and technology is one of the most effective means of improving productivity and sustainable use of natural resources.

The model of plants growth and development, agrocenosis, productivity of agricultural crops, precision agriculture, classification.

References

1. **Poluektov R. A.** Dinamicheskiye modeli agroecosistem. – L.: Gidrometeoizdat, 1991. – 312 s.
2. **Sokolov A. L.** Optimizatsiya upravleniya vodnym rezhimom sel'skokozyaistvennyh kul'tur s uchetom vlagoperenosa: avtoref. dis.... cand. tehn. nauk. – M.: TSHA, 1985. – 22 s.
3. **Tochnoye zemledelie (Precision Agriculture) / Agrophizprodukt (Electronny resurs).** – URL: http://www.agrophys.com/Agropvodnym_files/Preagro/preagro.html (Data obrashcheniya 31.03.2016).
4. **Zhu X. G., Zhang G. L., Tholen D., et al.** Thenextgenerationmodelsforcrops and agro-ecosystems // *Sci. China Inf Sci.* – 2011. – Vol. 54. – Doi: 10.1007/s11432-011-4197. – P. 589–597.
5. **Stafford J. V.** Implementing precision agriculture in the 21st century // *Journal AgrEngRes.* – 2002. – Vol. 76. – P. 267–275.
6. **Belenkov A. I.** Perspektivy ispol'zovaniya tochnogo zemledeliya pri proizvodstve rastenievodcheskoj productsii // *Nivy Zaural'ya.* – 2014. – № 5(116).
7. **Thornley J. H. B.** Respiration, growth and maintenance in Plants // *Nature.* – 1976. – Vol. 227. – P. 233.
8. **Wit C. T. de.** BACROS, a basic crop simulator. *Simulation monogr.* (prepr.). 1975.
9. **Ross Yu. K.** Radiatsionny rezhim i arhitektonika rastitel'nogo pokrova. – L.: Gidrometeoizdat, 1975. – 542 s.
10. **Galyamin E. P.** Optimizatsiya operativnogo raspredeleniya vodnyh resursov. – L.: Gidrometeoizdat, 1981. – 272 s.
11. **Shabanov V. V.** Vlogoobespechennost' yarovoj pshenitsy i ee raschet. – L.: Gidrometeoizdat, 1981. – 141 s.
12. **Sirotenko O. D.** Matematicheskoye modelirovanie vodno-teplovogo rezhima i productivnosti agroecosistem. – L.: Gidrometeoizdat, 1981. – 167 s.
13. **Golovaty V. G., Dobrachev Yu. P., Yurchenko I. F.** Modeli upravleniya productivnost'ju melioriruemyh agrotsenzov. – M.: BNIIGiM, 2001. – 98 s.
14. **Kang M. G., Cournude P. H., Mathieu A., Letort V., Qi R.** A Functional-Structural Plant Model: Theories and its Applications in Agronomy (Cao, W. and White, J. and Wang, E.). *Crop Modeling and Decision Support.* – Springer, 2009. – P. 148–160
15. **Petrova S. A.** Sovershenstvovanie operativnogo upravleniya protsessami v rastenievodstve // *Vestnik FGOU VPO MGAU.* – 2011. – № 6. – S. 62–64.
16. **Deussen O., Lintermann B.** Digital Design of Nature: Computer Generated Plants and Organics. – Springer, 2005. – 307 p.
17. **Sievdnen R., Perttunen J., Nikinmaa E., Posada J. M.** Functional Structural Plant Models – Case LIGNUM. (Invited Talk). In: *Proceedings of Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA) // Third International Symposium on , 9–13 Nov. 2009, IEEE Compute Society, doi: 10.1109/PMA.2009.64.* – P. 3–9,
18. **Allen M. T., Prusinkiewicz P., DeJong T. M.** Using L-systems for modeling source-sink interactions, architecture and physiology of growing trees: the L-PEACH model // *New Phytologist.* – 2005. – Vol. 166(3). – P. 869–880.

Received on 31.03.2016.

Information about the authors

Dobrachev Yuriy Pavlovich, doctor of technical sciences, professor, head of the department; The Federal state budget scientific institution «The All-Russian research institute of hydraulics and land reclamation named after A. N. Kostyakov»; 127550, Moscow, ul. B. Akademicheskaya 44, k. 2; tel.: 8(499)153-07-29; e-mail: dobrachev@vniigim.ru.

Sokolov Andrej Ljvovich, candidate of technical sciences, associate professor, senior researcher; Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Russian Timiryazev State Agrarian University»; 127550, Moscow, ul. Timiryazevskaya, 49; tel.: 8(499)976-0480; e-mail: andrey.sokolov2014@yandex.ru.